

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

张继平^{1 2 3}, 宁杨翠^{1 2 3}, 刘春兰^{1 2 3 ①}, 李 铮^{1 2 3}, 王海华^{1 2 3}, 陈 龙^{1 2 3}, 鲁春霞⁴ (1. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037; 2. 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037; 3. 国家环境保护工业废水污染控制工程技术(北京)中心, 北京 100037; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 北京市农村地区煤炭消费严重影响区域空气质量。为改善空气质量,减少农村地区燃煤污染,北京市开展了以“煤改电”工程为代表的农村地区“减煤换煤、清洁空气”行动。为科学评估“煤改电”工程对区域大气环境质量的改善作用,研究选择门头沟区王平镇辖区内的东马各庄村和西石古岩村分别作为实施“煤改电”工程和未实施“煤改电”工程的典型区域,对比 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 及 NO_2 等大气污染物浓度的差异,分析“煤改电”工程的大气污染物减排效果。结果表明,实施了“煤改电”工程的东马各庄村 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2 质量浓度分别比未实施“煤改电”工程的西石古岩村低 44.90%、24.75%、20.41% 和 26.67%; $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2 的采暖季质量浓度分别是非采暖季的 1.4、1.6、1.8 和 1.4 倍。“煤改电”工程能够有效改善区域空气质量,尤其是在降低细颗粒物浓度方面具有较好的环境效益。建议未来加强对农村地区煤炭消费的监督管理,在积极巩固“煤改电”工程现有成果的基础上,加强政府政策引导,稳步推进“煤改电”工程实施规模。

关键词: “煤改电”工程; 大气污染物; 大气环境监测; 北京市; 门头沟区

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1673-4831(2017)10-0898-09

DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2017.10.005

Monitoring and Analysis of Effect of Project "Replacing Coal With Electricity" Improving Atmospheric Environmental Quality in Mentougou District, Beijing. ZHANG Ji-ping^{1 2 3}, NING Yang-cui^{1 2 3}, LIU Chun-lan^{1 2 3}, LI Zheng^{1 2 3}, WANG Hai-hua^{1 2 3}, CHEN Long^{1 2 3}, LU Chun-xia⁴ [1. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 2. National Engineering Research Center of Urban Environmental Pollution Control, Beijing 100037, China; 3. State Environmental Protection Engineering (Beijing) Center for Industrial Wastewater Pollution Control, Beijing 100037, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China]

Abstract: Coal consumption in the rural areas of Beijing severely affects air quality of the region. The government has unfolded a movement entitled "Reducing Coal Consumption and Replacing Coal to Clean the Air", with the project of "Replacing Coal with Electricity" as representative in the rural areas of Beijing in an attempt to clean the air and reduce the pollution of smoke from coal burning. For scientific evaluation of effects of the project on regional air environmental quality, Dongmagezhuang Village and Xishiguyan Village in Wangping Town of Mentougou District were picked as two cases for study, one representing areas before unfolding of the project and the other representing areas after implementation of the project. Comparison was made between the two, in concentration of pollutants in the air, such as $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 and NO_2 for analysis of effects of the project reducing pollutant emission into the atmosphere. Results show that Dongmagezhuang Village was 44.90%, 24.75%, 20.41% and 26.67% lower respectively, than Xishiguyan Village in concentration of $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 and NO_2 , and mass concentration of $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 and NO_2 , in the heating season was 1.4, 1.6, 1.8 and 1.4 times as high as their respective one in the non-heating season. All the findings in the study demonstrate that the project improved the regional air quality, generating better environmental benefits, like lowering $PM_{2.5}$ concentration in the air. It is, therefore, suggested that supervisory management of coal consumption in the rural areas should

收稿日期: 2016-10-27

基金项目: 北京市科技计划(Z161100001116017); 国家自然科学基金(41701209, 41501607, 41371486); 北京市环境保护科学研究院基金(2017-A-03)

① 通信作者 E-mail: liuchunlan@cee.cn

be strengthened in the future. And in addition to the consolidation of the beneficial effects of the project, more efforts should be devoted to intensification of government guidance using policies and steady extrapolation of the project in scale.

Key words: "Replacing coal with electricity" project; atmospheric pollutants; atmospheric environmental monitoring; Beijing; Mentougou District

煤炭燃烧时除了产生大量颗粒物外,还会生成 CO、CO₂、SO₂ 及少量 SO₃、NO_x、烃类有机物等有害气体,对环境及人体健康造成危害^[1-5]。北京市环保监测中心的数据表明,本地污染源中,燃煤对 PM_{2.5} 的贡献率是 22.4%,仅次于机动车^[6]。因此,治理散煤是北京能源清洁化、大气污染防治的重点工作内容之一^[7-10]。据统计,北京市农村地区 2014 年全年煤炭消费 286 万 t,其中 60%~70% 用于冬季采暖,户均采暖用煤 2.6 t。农村住宅普遍缺乏保温措施,采用设施效率低,采暖能耗达 28.3 kg·m⁻² (以标准煤计),远高于城镇 8 kg·m⁻² 的水平^[11]。可见,有效减少农村地区煤炭消费,尤其是冬季采暖煤炭消费,是推动北京市能源消费结构调整及大气污染治理的关键。

为改善空气质量,减少农村燃煤污染,北京市自 2013 年 8 月启动了农村地区“减煤换煤、清洁空气”行动,该行动的主要措施包括“煤改电”、型煤置换、天然气入户、太阳能热利用、液化石油气下乡、沼气利用、农村住宅清洁能源分户自采暖等多种方式^[12-15]。其中,“煤改电”措施具有污染物零排放、采暖效率高、耗能低等优点,受到广大农村用户的一致认可。为进一步推进“煤改电”工程,北京市市政府出台了电价补贴、采暖设备补贴、电网改造投资补贴等多项优惠政策^[16-18]。2015 年北京市共有 72 个乡镇、166 个村、5 万居民实施“煤改电”工程。目前,“煤改电”主要有空气源热泵、蓄热式电采暖器、电地暖、电锅炉供暖等多种方式,其中,空气源

热泵因功率小、耗能低、散热均匀、保温效果好等优点,最受居民青睐^[19-21]。

迄今为止,北京市农村地区“煤改电”工程已实施 3 a,该工程的效果以及对区域大气环境的改善作用如何,都迫切需要科学评估。已有相关研究多基于设备耗能情况及国家相关污染物排放标准计算污染物排放总量^[22-23],或基于排放因子法估算减少燃煤导致的大气污染物减排量^[5-7],而缺乏基于实际大气环境监测数据的分析。

该研究以门头沟区“煤改电”工程为例,选择典型地区设置大气环境监测对照样点,对比 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂ 及 NO₂ 等大气污染物浓度的差异,以及采暖季和非采暖季各污染物浓度的差异,分析“煤改电”工程的大气污染物减排效果,为北京市能源消费结构调整及大气污染治理提供决策依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

截至 2015 年底,门头沟区已累计完成 11 个村“煤改电”计划,涉及 3 815 户 6 622 人,累计减煤 1.15 万 t^[24]。综合考虑“煤改电”工程实施情况、区域代表性、电力供应条件及设备维持需求,项目选择门头沟区王平镇辖区内的东马各庄村和西石古岩村分别作为实施“煤改电”工程和未实施“煤改电”工程的典型区域,设置监测点开展大气环境监测。2 个监测点的基本情况如表 1 所示。

表 1 监测点基本情况

Table 1 Introduction to monitoring sites

监测点	地理位置	村庄面积/ hm ²	海拔/ m	总人口/ 人	常住人口/ 人	常住人口密度/ (人·hm ⁻²)	主导 产业	主要能源 消费	取暖方式
东马各庄村	39.9627° N, 116.0269° E	60	220	254	150	2.50	种植业	电、天然气	空气源热泵
西石古岩村	39.9735° N, 116.0005° E	90	192	380	200	2.22	种植业	型煤	型煤

2 个监测站点地理位置毗邻,周边自然地理环境相仿,气象条件大体一致,因此,可以认为各监测点的大气环境本底基本相同,大气污染物浓度之间的差异主要受区域人类活动的影响。由于 2 个村庄均无工业生产,除民用燃烧外,区域内的人为排放源主要包括汽车尾气、道路扬尘及农业施肥等。2

个村庄规模均较小,村庄内道路狭窄,过往机动车数量有限,种植的作物又基本一致,据此推测 2 个监测站点大气污染物浓度之间的差异主要与型煤燃烧有关。

为进一步分析 2 个监测点与门头沟区及北京市城区整体大气环境质量状况的差异性,研究采用北

京市环境保护监测中心发布的门头沟区龙泉镇和北京市城区空气质量监测数据进行比较,各监测点空间分布如图1所示。

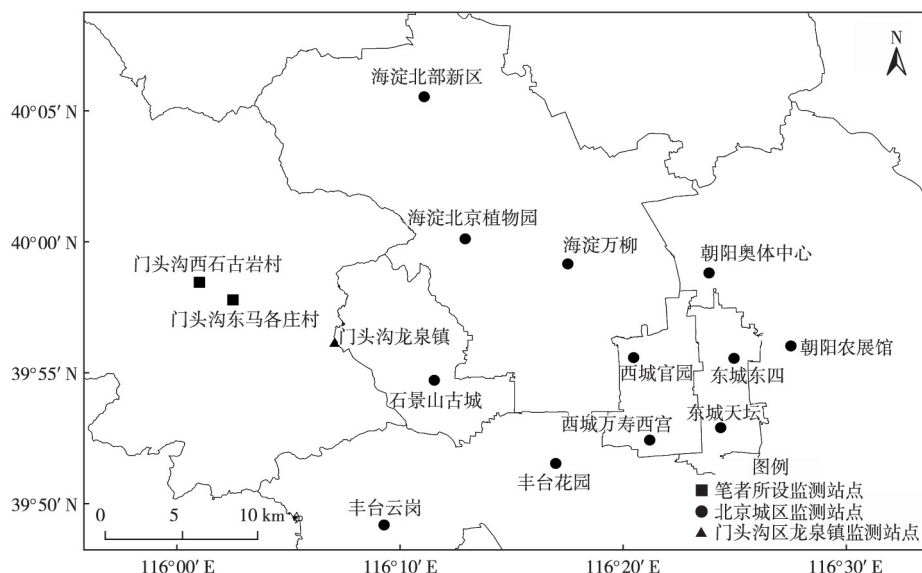


图1 监测点空间分布示意

Fig. 1 Distribution of monitoring sites

1.2 监测及检测方法

研究主要对 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 及 NO_2 这4项大气污染物浓度进行分析,其中 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 数据取自2个监测点位的在线颗粒物监测仪,其采样时间为1 min,基于每分钟数据计算每小时浓度值,进而计算日浓度值。每隔24 h对 SO_2 、 NO_2 空气样品进行1次样品采集,样品检测结果即为日浓度值,日浓度监测值符合 GB 3095—2012《环境空气质量标准》^[25]对数据有效性的规定。

1.2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 监测

使用北京市环科公司研发 HBKLW-2 型在线颗粒物监测仪,开展颗粒物浓度连续在线监测。

监测时间为2015年3月5日—4月17日,根据当地信息员的记录,3月下旬开始,村民们陆续开始停止采暖,至3月31日,停止采暖的户数达到各村总户数的90%左右。因此,将3月31日之前视为采暖季,3月31日之后视为非采暖季。

1.2.2 SO_2 与 NO_2 监测

采样点、采样环境、采样高度及采样频率按 HJ/T 194—2005《环境空气质量手工监测技术规范》^[26] 执行,采样仪器为 KB-BE 型大气采样仪。采样前使用皂膜流量计进行流量校准,采样流量的相对误差小于±5%。采样时取内装50.0 mL吸收液的多孔玻板吸收瓶,以 $0.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 流量进行24 h连续采

样。采样结束时,迅速将采样管用硅胶管封闭。

NO_2 : 根据 HJ 479—2009《环境空气 氮氧化物(一氧化氮和二氧化氮)的测定 盐酸萘乙二胺分光光度法》^[27] 测定,检出限为 $0.005 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

SO_2 : 根据 HJ 482—2009《环境空气 二氧化硫的测定 甲醛吸收-副玫瑰苯胺分光光度法》^[28] 测定,检出限为 $0.007 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

SO_2 及 NO_2 的监测时间分为2个阶段(每个阶段分为1周采样期和1周室内测试分析期),其中3月6—13日为采暖季监测时段,4月11—17日为非采暖季监测时段。

1.3 数据处理与分析方法

受意外断电及异常干扰活动等不可控因素的影响,部分日期的颗粒物浓度数据出现缺测和误测。2015年3月5日和4月17日分别为仪器安装和卸载日期,从3月5日10时开始获取监测数据,至4月17日15时结束监测;3月8日、3月11日、3月27日和4月9日各有5 min的监测数据缺失,4月12日有20 min的监测数据缺失;3月14日、3月19日、3月20日及4月15日均有2~5 min的监测数据异常,表现为监测数据骤然升高数十倍。通过对数据进行质量控制分析,对缺测及误测数据进行了剔除,进而获得有效数据。数据统计分析应用 SPSS 17.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 $PM_{2.5}$ 监测结果分析

2.1.1 $PM_{2.5}$ 日浓度变化分析

监测时段内 $PM_{2.5}$ 日浓度呈波动变化趋势,日变化情况主要受区域大气环境的气象条件影响。

日浓度较小值一般出现在强风或降水天气过后,如 4 月 1—2 日出现降雨过程,4 月 12 日出现 4~5 级北风。日浓度较大值出现在连续的低压、无风、较高相对湿度的雾霾天气下。此外,受元宵节燃放烟花爆竹等特殊事件的影响,3 月 5—6 日 $PM_{2.5}$ 浓度出现高峰(图 2)。

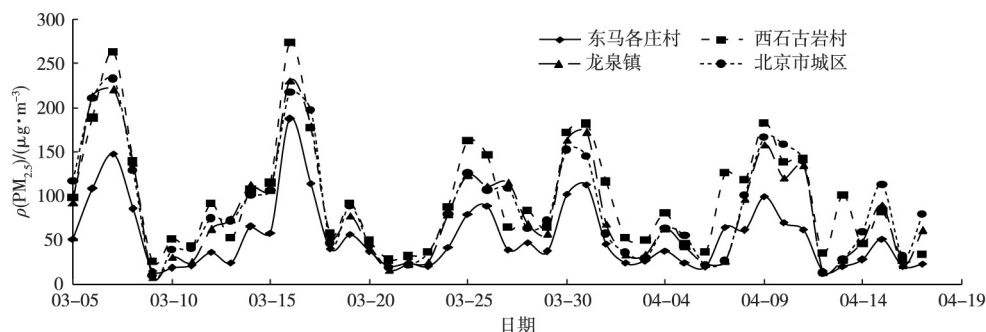


图 2 $PM_{2.5}$ 日浓度变化曲线

Fig. 2 Daily variation curve of $PM_{2.5}$ concentration

将监测结果与 HJ 633—2012《环境空气质量指数(AQI) 技术规定(试行)》标准进行比较可知,监测时段内,各监测点均出现 $PM_{2.5}$ 浓度超标情况,具体统计结果如表 2 所示。

表 2 监测时段内 $PM_{2.5}$ 日浓度对应空气质量等级统计

Table 2 Statistics of daily $PM_{2.5}$ concentration and its corresponding grade of air quality within the monitoring period

监测点	d					
	优	良	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染
东马各庄村	16	18	8	1	1	0
西石古岩村	5	14	10	7	6	2
龙泉镇	13	11	9	4	7	0
北京市城区	9	14	9	5	7	0

由表 2 可知,东马各庄村 $PM_{2.5}$ 日浓度所对应的空气质量级别以优、良为主,占监测总天数的 77.3%。西石古岩村 $PM_{2.5}$ 日浓度有 2 d 达严重污染级别,只有 19 d 空气质量为优、良级,达标率仅为 43.2%。北京城区和门头沟区龙泉镇的 $PM_{2.5}$ 日浓度达标率均为 50% 左右。

2.1.2 $PM_{2.5}$ 日均浓度分析

经过“煤改电”的东马各庄村 $PM_{2.5}$ 日均浓度为 $(54 \pm 38) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,明显低于其他 3 个区域。西石古岩村的 $PM_{2.5}$ 日均浓度最大,达 $(99 \pm 63) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,龙泉镇和北京市城区的 $PM_{2.5}$ 日均浓度差异较小(表 3)。

表 3 $PM_{2.5}$ 日浓度统计分析

Table 3 Statistics of daily $PM_{2.5}$ concentration $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

监测点	日均浓度	日浓度最大值	日浓度最小值	标准差	标准误
东马各庄村	54	187	15	38	6
西石古岩村	99	274	26	63	9
龙泉镇	84	231	8	60	9
北京市城区	89	232	10	60	6

方差分析表明,两村监测点 $PM_{2.5}$ 日浓度之间存在极显著差异($\text{sig. 值} = 0.0001, P < 0.01$)。可见,“煤改电”工程的实施能够有效降低大气中 $PM_{2.5}$ 浓度,可使其浓度水平下降 45% 左右。

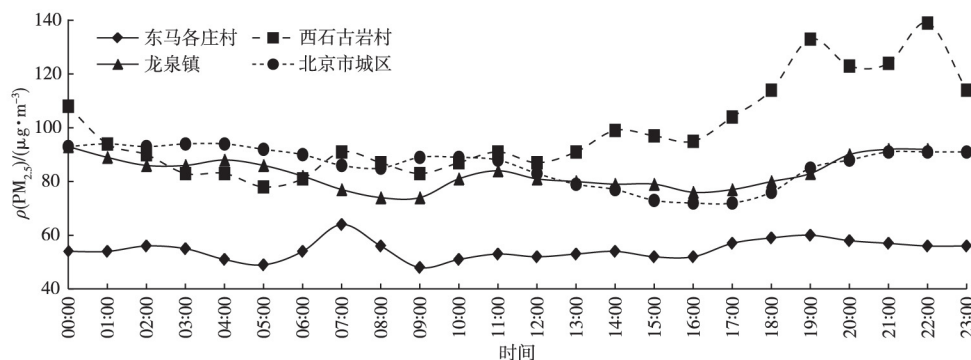
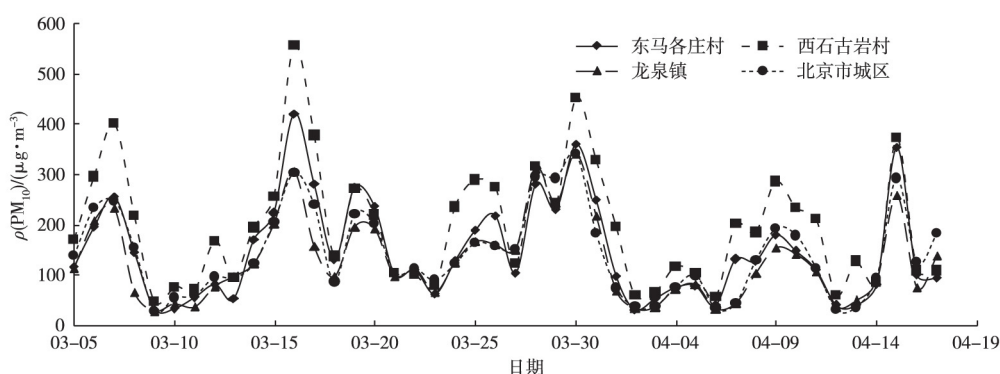
2.1.3 $PM_{2.5}$ 小时浓度分析

以监测期间各监测点每分钟监测数据为基础,分析监测点每小时 $PM_{2.5}$ 浓度的平均值,进而计算颗粒物逐小时 $PM_{2.5}$ 浓度平均值,计算结果图 3 所示。由图 3 可见,采取“煤改电”措施的东马各庄村每小时 $PM_{2.5}$ 浓度均远低于其他 3 个监测点。从波动幅度来看,西石古岩村的波动幅度最大,中午 11 时至次日凌晨为全天浓度最高值,17 时至次日凌晨的 $PM_{2.5}$ 浓度水平明显高于其他 3 个区域,这与该村村民夜间的燃煤取暖活动密切相关。

2.2 PM_{10} 监测结果分析

2.2.1 PM_{10} 日浓度变化分析

PM_{10} 日浓度变化总体上与 $PM_{2.5}$ 的变化一致,其浓度值大约是 $PM_{2.5}$ 浓度的 1.5~2 倍左右(图 4)。

图3 PM_{2.5}小时浓度变化曲线Fig. 3 Hourly variation curve of PM_{2.5} concentration图4 PM₁₀日浓度变化曲线Fig. 4 Daily variation curve of PM₁₀ concentration relative to monitoring site

监测时段内,各监测点均出现 PM₁₀ 浓度超标情况,东马各庄村和龙泉镇的 PM₁₀ 日浓度对应的空气质量级别以优、良为主,两者占监测总天数的 63.6%,北京城区达标天数占比为 56.8%,而西石古岩村的空气质量达优、良等级天数仅占 43.2%,空气污染比较严重(表 4)。

表 4 监测时段内 PM₁₀ 日浓度对应空气质量等级统计Table 4 Statistics of daily mean PM₁₀ concentration and its corresponding grade of air quality within monitoring period

监测点	优	良	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染
东马各庄村	6	22	9	4	2	1
西石古岩村	1	18	12	8	3	2
龙泉镇	8	20	12	4	0	0
北京市城区	7	18	14	5	0	0

2.2.2 PM₁₀ 日均浓度分析

门头沟区龙泉镇 PM₁₀ 日均浓度最小,为 (131±82) μg·m⁻³,西石古岩村 PM₁₀ 日均浓度最大,达

(198±119) μg·m⁻³。实施“煤改电”的东马各庄村和北京市城区基本持平,PM₁₀ 日均浓度分别为 (149±98) 和 (144±84) μg·m⁻³(表 5)。

表 5 PM₁₀ 日浓度统计分析Table 5 Statistics of daily PM₁₀ concentration μg·m⁻³

监测点	日均浓度	日浓度最大值	日浓度最小值	标准差	标准误差
东马各庄村	149	422	32	98	15
西石古岩村	198	557	49	119	18
龙泉镇	131	342	28	82	12
北京市城区	144	342	30	84	12

方差分析表明,两村监测点 PM₁₀ 日浓度之间存在显著性差异 (sig. 值 = 0.038, $P < 0.05$),而东马各庄村和城区 PM₁₀ 日浓度之间不存在显著性差异 (sig. 值 = 0.15, $P > 0.05$)。可见,“煤改电”工程的实施能够有效降低大气中 PM₁₀ 浓度,可使其浓度水平下降 25% 左右。

2.2.3 PM₁₀ 小时浓度分析

以监测期间各监测点每分钟监测数据为基础,

分析各监测点每小时 PM_{10} 浓度平均值, 计算颗粒物 逐小时 PM_{10} 浓度的多日平均值, 结果见图 5。

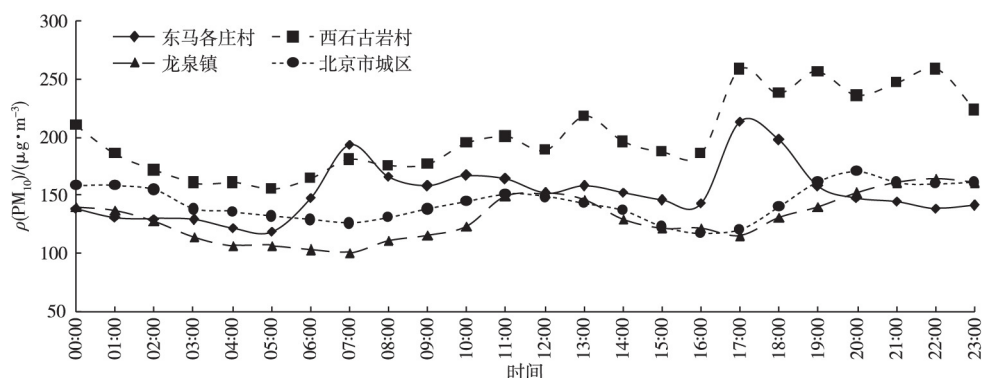


图 5 PM_{10} 小时浓度变化曲线

Fig. 5 Hourly variation curve of PM_{10} concentration

从日变化规律来看, 17 时以前 2 个监测村的变化趋势基本一致, 东马各庄村的 PM_{10} 浓度低于西石古岩村, 17 时以后, 东马各庄村 PM_{10} 浓度呈明显下降趋势, 而西石古岩村的 PM_{10} 浓度居高不下, 并且各时刻浓度均高于其他 3 个区域 (7 时除外), 反映出煤炭燃烧对区域大气质量的负面影响。

2.3 SO_2 检测结果分析

监测时段内门头沟 3 个监测点和北京市城区的 SO_2 日浓度全部达标, 且绝大多数达到一类区要求, 其对应的空气质量也以优级为主 (表 6)。

表 6 监测时段内 SO_2 日浓度达标天数统计

Table 6 Statistics of up-to-standard daily SO_2 concentration within monitoring period

监测点	一类区	二类区	空气质量优	空气质量良
东马各庄村	14	1	14	1
西石古岩村	14	1	14	1
龙泉镇	14	1	14	1
北京市城区	14	1	14	1

东马各庄村及西石古岩村的 SO_2 日均浓度分别为 $(0.019\ 5 \pm 0.018\ 1)$ 和 $(0.024\ 5 \pm 0.019\ 5)$ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 龙泉镇和北京城区 SO_2 日均浓度分别为 $(0.014\ 3 \pm 0.011\ 5)$ 和 $(0.019\ 2 \pm 0.014\ 9)$ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (表 7)。东马各庄村 SO_2 日均浓度较西石古岩村下降 20.41%, 表明“煤改电”工程的实施能够降低大气中 SO_2 浓度, 可使其浓度水平下降 20% 左右。

2.4 NO_2 检测结果分析

监测时段内门头沟 3 个监测点 NO_2 日浓度全部达标。其中东马各庄村和西石古岩村的空气质量以优级为主, 龙泉镇优、良级各占一半。北京市

城区有 12 d 达优级, 另外 3 d 的 NO_2 日浓度超过 $0.08\ \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 属于轻度污染等级。监测期内, 东马各庄村 NO_2 日浓度全部达到一类区要求, 且其对应的空气质量等级全部为优。从 NO_2 日浓度的达标情况和对应的空气质量级别来看, 实施了“煤改电”工程的东马各庄村整体情况要好其他 3 个区域。监测时段内, 各监测点 NO_2 日浓度均达标 (表 8)。

表 7 SO_2 日浓度统计分析结果

Table 7 Statistics of daily SO_2 concentration $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$

监测点	日均浓度	日浓度最大值	日浓度最小值	标准差	标准误
东马各庄村	0.019 5	0.080 0	0.007 0	0.018 1	0.004 7
西石古岩村	0.024 5	0.090 0	0.007 0	0.019 5	0.005 0
龙泉镇	0.014 3	0.052 0	0.002 0	0.011 5	0.001 7
北京市城区	0.019 2	0.065 0	0.003 0	0.014 9	0.002 5

表 8 监测时段内 NO_2 日浓度达标天数统计

Table 8 Statistics of up-to-standard daily NO_2 concentration within monitoring period

监测点	一类区	二类区	空气质量优	空气质量良
东马各庄村	15	0	15	0
西石古岩村	14	1	12	3
龙泉镇	15	0	7	8
北京市城区	12	0	12	0

由各监测点 NO_2 日浓度统计结果 (表 9) 可知, 东马各庄村的 NO_2 日均浓度最低, 为 $(0.022\ 3 \pm 0.013\ 3)$ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 其次为西石古岩村, 为 $(0.030\ 3 \pm 0.020\ 3)$ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 龙泉镇为 $(0.042\ 9 \pm 0.022\ 0)$ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 北京市城区最高, 达 $(0.053\ 2 \pm 0.025\ 7)$ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。东马各庄村 NO_2 日均浓度较西石古岩村下降 26.67%, 表明“煤改电”工程的实施能够降低

大气中 NO_2 浓度,可使其浓度水平下降 25% 左右。农村地区的 NO_2 日浓度要明显低于城区 (sig. 值 = 0.002, $P < 0.01$)。

表 9 NO_2 日浓度统计分析结果

Table 9 Statistics of daily NO_2 concentration $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$

监测点	日均浓度	日浓度最大值	日浓度最小值	标准差	标准误
东马各庄村	0.022 3	0.039 0	0.005 0	0.013 3	0.003 4
西石古岩村	0.030 3	0.080 0	0.005 0	0.020 3	0.005 2
龙泉镇	0.042 9	0.072 0	0.008 0	0.022 0	0.005 7
北京市城区	0.053 2	0.090 0	0.014 0	0.025 7	0.006 6

2.5 采暖季及非采暖季大气污染物浓度比较分析

从监测结果(图 6)可知,4 个监测区域采暖季内各类大气污染物浓度均高于非采暖季。 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2 的采暖季日均浓度分别为 91、182、23 和 43 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,分别是非采暖季的 1.4、1.6、1.8 和 1.4 倍。采暖季与非采暖季之间的浓度差异主要是由于气象条件和冬季燃煤取暖等活动的影响。

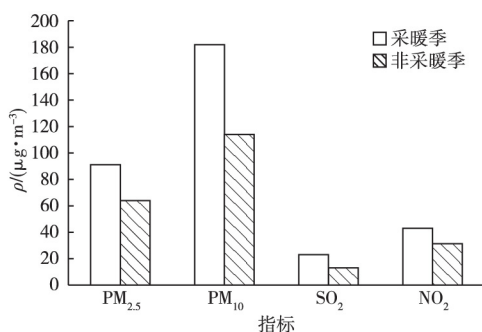


图 6 采暖季与非采暖季大气污染物日均浓度比较

Fig. 6 Comparison between heating season and non-heating season in daily mean concentration of atmospheric pollutants

从各监测区域比较结果(图 7)来看,采暖季和非采暖季东马各庄村各类大气污染物浓度均低于西石古岩村,表明“煤改电”工程的实施不仅可以改善采暖季期间的大气环境状况,对非采暖季期间的大气环境改善也有一定的促进作用。

从采暖季与非采暖季大气污染物浓度变化幅度来看,东马各庄村 SO_2 和 NO_2 浓度的变化幅度明显小于其他 3 个监测区域,而西石古岩村变化幅度最大,表明在实施“煤改电”工程后,东马各庄村采暖季期间的大气污染物浓度与非采暖季差异较小,而未实施“煤改电”工程的西石古岩村,其采暖季和

非采暖季之间的污染物浓度差异更为明显,说明“煤改电”措施可有效降低采暖季期间的 SO_2 和 NO_2 浓度。4 个监测点颗粒物浓度的变化幅度差异不大,这可能与气象条件和其他人为因素对颗粒物浓度的影响有关。

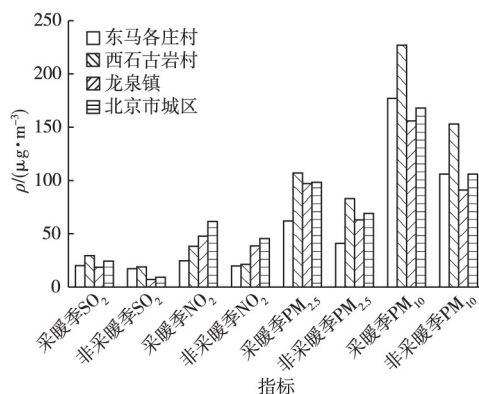


图 7 各监测点采暖季与非采暖季大气污染物日均浓度比较

Fig. 7 Comparison between heating season and non-heating season in daily mean concentration of atmospheric pollutants relative to monitoring sites

3 结论

(1) “煤改电”措施实施后,由于采用了零排放的电力能源,区域污染物排放总量降低,大气环境质量趋于改善。监测结果显示,实施了“煤改电”工程的东马各庄村 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2 日均浓度分别为 $(54 \pm 38) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $(131 \pm 82) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $(0.019 5 \pm 0.018 1) \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(0.022 3 \pm 0.013 3) \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,比未实施“煤改电”工程的西石古岩村分别低 44.90%、24.75%、20.41% 和 26.67%。可见,“煤改电”工程能够有效改善区域空气质量,尤其在降低细颗粒物浓度方面具有较好的环境效益。

(2) 与门头沟区龙泉镇及北京市城区比较可知,虽然东马各庄村的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_2 浓度水平低于龙泉镇和北京市城区平均水平,但是其 SO_2 和 PM_{10} 浓度要高于后两者;西石古岩村的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和 PM_{10} 浓度均高于龙泉镇和北京市城区平均水平。该结果表明北京市农村地区空气质量仍然面临艰巨考验,减煤行动有待进一步加强。

(3) 监测结果显示,4 个监测区域 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2 的采暖季日均浓度分别为 91、182、23 和 43 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,是非采暖季的 1.4、1.6、1.8 和 1.4 倍。采暖季与非采暖季之间的浓度差异主要受气象条件和冬季燃煤取暖活动等影响。

4 建议

4.1 不确定性分析

研究设置的2个监测点虽然在自然地理环境及社会经济发展等方面具有较好的一致性和较高的可比性,但是不能排除2村在交通状况、燃煤活动以外的其他人为干扰等方面的差异性,这些因素对监测结果具有一定的影响。从 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 小时浓度变化曲线来看,某些时段两者变化趋势有较大差异,这是否与人类活动影响相关有待进一步调查。同时,研究将2个监测点与龙泉镇和北京市城区的数据进行了对比分析,由于数据来源不同,监测的仪器、频率和数据采集过程存在一定的差异性,也可能在一定程度上影响数据的可比性。

4.2 “煤改电”工程实施的对策与建议

建议未来政府应一方面进一步加强政府政策引导,稳步推进“煤改电”工程实施规模;另一方面,要积极巩固“煤改电”工程的现有成果,加强监督管理,杜绝“煤改电”后返烧散煤的现象。要多角度、全方位地做好“煤改电”工程宣传工作,采暖设备供应企业应保证设备质量,做好售后服务,及时解决村民电采暖设备使用和维修等方面的问题。此外,建议将居民用煤污染控制工作与地区领导和管理部门的政绩考核挂钩,促进“煤改电”工程的落实。在加大“煤改电”工程实施力度、加强监督管理的同时,需进一步加强区域环境监测,争取早日实现农村大气环境在线实时监测,一旦发现大气环境出现异常及污染现象,可以及时查明原因并采取相关措施。

参考文献:

- [1] HALLQUIST M, WENGER J C, BALTENSPERGER U *et al.* The Formation, Properties and Impact of Secondary Organic Aerosol: Current and Emerging Issues [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics* 2009, 9(14): 5155–5236.
- [2] YANG F, TAN J, ZHAO Q, *et al.* Characteristics of $PM_{2.5}$ Speciation in Representative Megacities and Across China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics* 2011, 11: 5207–5219.
- [3] ZHAO X J, ZHANG X L, XU X F *et al.* Seasonal and Diurnal Variations of Ambient $PM_{2.5}$ Concentration in Urban and Rural Environments in Beijing [J]. *Atmospheric Environment* 2009, 43(18): 2893–2900.
- [4] 易鹏, 段宁, 许亚宣, 等. 成渝经济区火电发展的大气环境影响 [J]. *环境科学研究*, 2012, 25(10): 1107–1114. [YI Peng, DUAN Ning, XU Ya-xuan, *et al.* Effects of Coal-Fired Thermal Power Industry Development on the Atmospheric Environment in the Chengdu-Chongqing Economic Zone [J]. *Research of Environ-*

- mental Sciences* 2012, 25(10): 1107–1114.]
- [5] 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. [XUE Yi-feng, YAN Jing, WEI Xiao-qiang. Impact on Air Quality of Beijing City by Controlling the Consumption of Coal-Fired [J]. *Research of Environmental Sciences* 2014, 27(3): 253–258.]
- [6] 北京市环境保护局. 北京市正式发布 $PM_{2.5}$ 来源解析研究结果 [EB/OL]. (2014-04-16) [2016-03-21]. <http://www.bjepb.gov.cn/bjepb/323265/340674/396253/index.html>. [Beijing Municipal Environmental Protection Bureau. The Research Results of $PM_{2.5}$ Source Apportionment of Beijing Was Officially Released [EB/OL]. (2014-04-16) [2016-03-21]. <http://www.bjepb.gov.cn/bjepb/323265/340674/396253/index.html>.]
- [7] 赵文慧, 徐谦, 李令军, 等. 北京平原区城乡结合部燃煤散烧及污染物排放量估算 [J]. *环境科学研究*, 2015, 28(6): 869–876. [ZHAO Wen-hui, XU Qian, LI Ling-jun, *et al.* Estimation of Air Pollutant Emissions From Coal Burning in the Semi-Rural Areas of Beijing Plain [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(6): 869–876.]
- [8] 钟连红, 刘晓, 李志凯, 等. 北京居民生活用煤大气污染控制思路与对策 [J]. *环境保护*, 2015, 43(3/4): 77–78. [ZHONG Lian-hong, LIU Xiao, LI Zhi-kai, *et al.* The Thoughts and Control Countermeasures of Air Pollution Caused by Coal Products Consuming From Beijing Residents [J]. *Environmental Protection*, 2015, 43(3/4): 77–78.]
- [9] 张原, 和绿茵. 北京雾霾治理任重道远 [J]. *生态经济*, 2016, 32(1): 10–13. [ZHANG Yuan, HE Lü-yin. Haze Control in Beijing, Long Way to Go [J]. *Ecological Economy* 2016, 32(1): 10–13.]
- [10] 严晓辉, 李政, 谢克昌. 京津冀农村能源体制机制问题初探 [J]. *中国能源*, 2016, 38(1): 32–36. [YAN Xiao-hui, LI Zheng, XIE Ke-chang. A Preliminary Study on the Institutional Problems of Rural Energy in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Energy of China*, 2016, 38(1): 32–36.]
- [11] 北京市农村工作委员会. 北京市农村工作委员会落实国务院政策措施推进减煤换煤清洁能源工作情况 [EB/OL]. (2014-11-18) [2016-02-01]. http://www.bjnw.gov.cn/zfxgk/ywdt/zwdt/201411/t20141117_343971.html. [Beijing Municipal Commission of Rural Affairs. Working Progress of the Beijing Municipal Commission of Rural Affairs to Implement the State Council Policy of “Clean Air Act of Reduction and Replacement of Coal Consumption” [EB/OL]. (2014-11-18) [2016-02-01]. http://www.bjnw.gov.cn/zfxgk/ywdt/zwdt/201411/t20141117_343971.html.]
- [12] 北京市人民政府办公厅. 北京市人民政府办公厅关于印发《北京市2014年农村地区“减煤换煤、清洁能源”行动实施方案》的通知 [EB/OL]. (2014-06-30) [2016-03-30]. <http://zhengwu.beijing.gov.cn/gzdt/gggs/t1359071.htm>. [General Office of the People’s Government of Beijing Municipality. Circular of the General Office of the People’s Government of Beijing Municipality, on Action Plan for “Clean Air Act of Reduction and Replacement of Coal Consumption” in Rural Areas of Beijing in 2014 [EB/OL]. (2014-06-30) [2016-03-30]. <http://zhengwu.beijing.gov.cn/gzdt/gggs/t1359071.htm>.]

- [13] 吉卫华.京津冀散煤治理攻坚农村[N].中国电力报,2015-10-31(3). [JI Wei-hua. Bulk Coal Management in Rural Area of Jing-Jin-Ji is in the Stage of Storming Fortifications [N]. China Electric Power News, 2015-10-31(3).]
- [14] 徐春芳.北京市“送气下乡”百万农民受益[J].城市管理与科技,2015,17(1):38-39. [XU Chun-fang. Liquefied Petroleum Gas Promotion Benefit Millions of Farmers in Beijing [J]. Municipal Administration & Technology, 2015, 17(1):38-39.]
- [15] 贺勇.北京郊区无煤化渐行渐近[N].人民日报,2016-03-19(9). [HE Yong. “No Coalification” Is Coming Gradually in Beijing Suburbs [N]. People's Daily, 2016-03-19(9).]
- [16] 李煜.煤改电工程的环境影响[J].环境与生活,2014(6):102-103. [LI Yu. Environment Affection of Coal-to-Electricity Project [J]. Green Living, 2014(6):102-103.]
- [17] 赵一,李艳娜,杜敏.十三年“煤改电”见证幸福生活变迁[J].农电管理,2014(1):22-23. [ZHAO Yi, LI Yan-na, DU Min. Thirteen Years of Coal-to-Electricity Project Witness the Happiness and Changes of Life [J]. Rural Power Management, 2014(1):22-23.]
- [18] 王婧.促进城市低碳发展还北京一片蓝天:北京城区平房“煤改电”工程规划建设[J].北京规划建设,2010,23(2):48-51. [WANG Jing. Promote Low-Carbon Development to Re-Blue the Sky of Beijing: Planning and Construction of Coal-to-Electricity Project in the Bungalow Area of Urban Beijing [J]. Beijing City Planning & Construction Review, 2010, 23(2):48-51.]
- [19] 赵建康.城镇清洁采暖新模式:空气源热泵采暖技术[J].建设科技,2015(2):53-58. [ZHAO Jian-kang. New Urban Clean Heat Mode: Heating System of Air Source Heat Pump [J]. Construction Science and Technology, 2015(2):53-58.]
- [20] 杜敏.煤改电:用清洁电留住首都蓝天[N].中国电力报,2015-09-05(7). [DU Min. Coal to Electricity Project: Keep the Capital Sky Blue by Clean Electricity [N]. China Electric Power News, 2015-09-05(7).]
- [21] 张慧.聚焦煤改电[J].能源,2013(12):60-61. [ZHANG Hui. Focusing Coal-to-Electricity Project [J]. Energy, 2013(12):60-61.]
- [22] 赵婷婷,解国珍,成建宏.空气源热泵采暖对缓解空气雾霾程度的探讨[J].建筑节能,2015,43(3):1-4. [ZHAO Ting-ting, XIE Guo-zhen, CHENG Jian-hong. Easing the Air Haze in China by Heating System of Air Source Heat Pump [J]. Building Energy Efficiency, 2015, 43(3):1-4.]
- [23] 李玉幸,狄彦强,刘芳,等.锅炉房“煤改电”的可行性和成效分析[J].建筑电气,2015,34(11):24-29. [LI Yu-xing, DI Yan-qiang, LIU Fang et al. Analysis on Feasibility and Effect of Coal-to-Electricity Project for Boiler Rooms [J]. Building Electricity, 2015, 34(11):24-29.]
- [24] 北京市农村工作委员会.门头沟区大力推进郊区新城“无煤化”进程[EB/OL]. (2016-03-07) [2016-04-25]. http://www.bjnw.gov.cn/cxyth/hjbh/201603/t20160307_367941.html. [Beijing Municipal Commission of Rural Affairs. “No Coalification” is Vigorously Promoted in the Suburban Area of the Mentougou District [EB/OL]. (2016-03-07) [2016-04-25]. http://www.bjnw.gov.cn/cxyth/hjbh/201603/t20160307_367941.html.]
- [25] GB 3095—2012 环境空气质量标准[S]. [GB 3095-2012, Ambient Air Quality Standards [S].]
- [26] HJ/T 194—2005 环境空气质量手工监测技术规范[S]. [HJ/T 194-2005, Manual Methods for Ambient Air Quality Monitoring [S].]
- [27] HJ 479—2009 环境空气 氮氧化物(一氧化氮和二氧化氮)的测定 盐酸萘乙二胺分光光度法[S]. [HJ 479-2009, Ambient Air, Determination of Nitrogen Oxides-N(1-Naphthyl) Ethylene Diamine Dihydrochloride Spectrophotometric Method [S].]
- [28] HJ 482—2009 环境空气 二氧化硫的测定 甲醛吸收-副玫瑰苯胺分光光度法[S]. [HJ 482-2009, Ambient Air, Determination of Sulfur Dioxide-Formaldehyde Absorbing Pararosaniline Spectrophotometry [S].]

作者简介:张继平(1983—),女,河南郑州人,助理研究员,博士,主要研究方向为城市生态学。E-mail: zhangjiping@cee.cn

(责任编辑:许素)