

北京采暖季大气 PM_{2.5} 中致癌重金属组分差异研究

北京环境诱变剂学会 潘小川

GREENPEACE 绿色和平

目录

研究摘要	3
一 研究背景	3
1. 北京市空气质量改善目标及现状	3
2. PM _{2.5} 中重金属的危害.....	4
二 研究目的	4
三 材料与方法	4
1. 技术路线图示	5
2. 大气监测站数据收集	5
3. PM _{2.5} 的采集和检测.....	6
4. PM _{2.5} 样品的分析.....	6
5. 质量控制	7
6. 统计分析	7
7. 同期采样点大气 PM _{2.5} 浓度与监测站点 PM _{2.5} 浓度的相关性验证	7
四 研究结论	10
1. 北京采暖季大气 PM _{2.5} 中重金属元素质量百分比差异变化.....	10
2. 北京采暖季《环境空气质量标准》中包含的砷、镉、铅的浓度变化.....	11
五 政策建议	12
六 附录	12
2013-2015 年北京主要大气污染物的浓度	12
2015-2016 年相关 PM _{2.5} 浓度数据	13
2012-2013 年相关 PM _{2.5} 浓度数据	15
2012-2013 年采样点大气 PM _{2.5} 各金属组分含量	16
2015-2016 年度研究中检测的采样点大气 PM _{2.5} 各金属及非金属成分的含量.....	17
2015-2016 大气 PM _{2.5} 中各检测元素所占质量比	Error! Bookmark not defined.

研究摘要

大气细颗粒物（PM_{2.5}）是目前影响北京空气质量的首要污染物，PM_{2.5}可携带砷、镉、铅等致癌重金属。研究表明北京 PM_{2.5} 上的致癌重金属主要来源于燃煤源、机动车排放及区域性污染源的输送¹，并会对人体健康造成不良影响。为了改善空气质量，北京市政府于 2013 年发布的《北京市 2013-2017 年清洁空气行动计划》，2013 年环境保护部、国家发展和改革委员会等六部委印发了《京津冀及周边地区落实大气污染防治行动计划实施细则》。

经过了三年的大气污染治理工作，北京的大气细颗粒物污染是否有所改善，特别是大气细颗粒物中的有害物质含量是否有所降低，是一个有待检验的问题。

本研究针对北京 2012-2013 年供暖季和 2015-2016 年供暖季大气中细颗粒物的重金属组分进行比较和分析。研究显示，在《环境空气质量标准（GB3095-2012）》中有浓度限值或参考浓度限值要求的砷（As）、镉（Cd）和铅（Pb）三种重金属元素在 PM_{2.5} 中的质量百分比分别下降了 85.9%、40.7% 和 48.9%。

本研究表明压减燃煤、控车减油等一系列大气污染防治措施有助于大气细颗粒物中砷、镉和铅三种重金属的含量。

一 研究背景

1. 北京市空气质量改善目标及现状

2013 年 9 月，北京市人民政府印发《北京市 2013-2017 年清洁空气行动计划》，提出经过五年努力，全市空气质量明显改善，重污染天数较大幅度减少。到 2017 年，全市空气中的细颗粒物年均浓度比 2012 年下降 25% 以上，控制在 60 微克/立方米左右。重点实施压减燃煤、控车减油、治污减排、清洁降尘等八大污染减排工程²。经过近三年的治理，北京市 2015 年的空气质量相比 2013 年出现了一定程度的改善，在四种主要大气污染物上，二氧化硫的年均浓度下降了 49.1%，氮氧化物下降了 10.7%，PM_{2.5} 下降了 10.0%，PM₁₀ 下降了 6.1%^{3 4}。

2. 研究对象

尽管本研究在 2012-2013 年检测了 $PM_{2.5}$ 中的 10 种元素，2015-2016 年检测了 $PM_{2.5}$ 中 24 种元素，但本研究仅重点讨论我国《环境空气质量标准》中提供了浓度参考限值的砷、镉和铅 3 种致癌重金属。

3. $PM_{2.5}$ 中重金属的危害

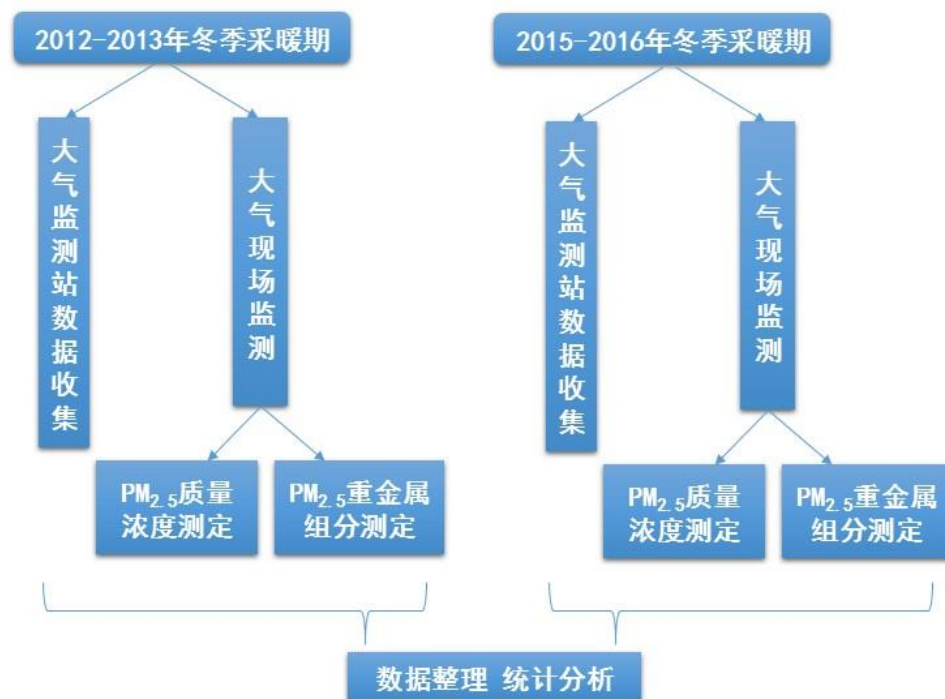
美国 1990 年清洁空气修正法案列出 187 种有害空气污染物 (HAPs)，其中包含砷、铅、镉等多种重金属⁵。美国毒物与疾病登记署明确将砷、镉归入人类致癌物质⁶。我国最新颁布的《环境空气质量标准》(GB3095-2012) 将铅列入常规监测指标，而将砷和镉等列入附录 A 的参考指标。

二 研究目的

北京市为强化对大气污染的控制措施，于 2001 年开始实施“煤改电”政策，2013 年出台了《北京市 2013-2017 年清洁空气行动计划》，2014 年开始陆续关闭了四大燃煤火力发电厂。2013 年环境保护部、国家发展和改革委员会等六部委印发了《京津冀及周边地区落实大气污染防治行动计划实施细则》。但一系列大气污染防治的政策措施实施后对于北京市改善大气质量，特别是 $PM_{2.5}$ 中重金属组分是否有所变化，尚未见相关的研究。同时了解城市大气环境中重金属的含量，对于保护公众健康以及制定切实可行的控措施同样具有一定意义。

三 材料与方法

1. 技术路线图示



2. 大气监测站数据收集

收集研究期间北京市环境保护监测中心网站公布的距离采样地点最近的 2 个监测站点（西直门北大街 N39.954 E116.349、朝阳奥体中心

N39.982 E116.397) 及北京市 35 个大气监测站同期的大气 PM_{2.5} 小时浓度均值, 所有数据均来源于国家环保机构网站正式公布的数据。

3. PM_{2.5} 的采集和检测

3.1 PM_{2.5} 样品采集方法

样品采集地点设置在北京地区某高校办公楼 (N39.981 E116.348) 6 层平台。使用武汉天虹® TH-150C 大气采样仪, 采样流量设置为 100 L/min; 使用 PALL® 石英纤维滤膜, 滤膜直径为 90 mm。以当日 10:00 至次日 8:00 为一个采样周期进行采样。采样时间在北京冬季采暖期, 分两个时间段: 燃煤电厂关闭前的 2012-2013 年度 (2012 年 12 月——2013 年 1 月) 和燃煤电厂关闭后的 2015-2016 年度 (2015 年 12 月——2016 年 1 月), 每个时间段各选取至少 15 天进行样品采集, 同时记录气温、气湿、气压和风速等数据。

3.2 PM_{2.5} 样品检测方法

PM_{2.5} 质量浓度检测采用膜称重法。用铝箔将滤膜包好, 放入马弗炉中 600°C 下焙烧 2h-3h, 去除有机物并增加滤膜韧性。采样开始前, 将滤膜放在恒温恒湿箱中平衡至少 24h 后 (平衡条件: 温度 20-25°C, 湿度 50±5%), 使用感量 0.01mg 的分析天平进行初称, 称量后放入干燥器中备用; 采样结束后, 采样膜在恒温恒湿箱中平衡至少 24h 后复称。初称、复称时均至少需进行连续 3 次称量并记录滤膜重量, 称量结果之差小于 0.04mg 时, 记录滤膜质量数据。

4. PM_{2.5} 样品的分析

本研究的细颗粒物样品由北京新奥环标理化分析测试中心依照《HJ 657-2013 空气和废气颗粒物中铅等金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法》标准要求进行测定, 测定用仪器为 Thermo X series 电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS)。测定内容为 PM_{2.5} 中的砷、镉、铅等元素的含量。

仪器相关参数: 功率 1200W; 冷却气流量 14.0 L; 功率谱仪; 辅助气流量 0.8 L 量: 功率谱仪; 载气流量 0.71 L: 功率谱仪; 样品提升速率 1 MI 升速率功率谱; 采样深度 2.8mm; 采样锥孔径 1.0mm; 截取锥孔径 0.7mm; 分析模式: 全定量分析; 氧化物<2%; 双电荷<3%。

该方法的性能指标如下:

测试项目	测定范围	回收率	精密度	检出限
单位	(µg/L)	(%)	(%)	(µg/L)
砷	0~100	80~120	10%	0.100

镉	0~100	80~120	10%	0.005
铅	0~100	80~120	10%	0.100

5. 质量控制

使用同一批次的 PALL®石英纤维滤膜，滤膜对 0.3 微米标准粒子的截留效率大于 99%。滤膜使用前，用铝箔将滤膜包好，并留有开口，放入马弗炉中 600℃ 下焙烧 2h-3h，去除有机物并增加滤膜韧性。采样开始前，将滤膜放在恒温恒湿箱中平衡至少 24h 后(平衡条件: 温度 20-25℃, 湿度 50±5%), 使用感量 0.01mg 的分析天平进行初称, 称量后放入干燥器中备用; 采样结束后, 采样膜在恒温恒湿箱中平衡至少 24h 后复称。初称、复称时均至少需进行连续 3 次称量并记录滤膜重量, 称量结果之差小于 0.04mg 时, 方可满足恒重要求。

每阶段采样前, 需对仪器切割头进行清洁; 采样前后, 均需使用转子流量计测定 TH-150C 流量, 测定结果误差不超过 2% 时, 方可认为采样期间仪器流量满足设置要求。采样器入口距地面高度高于 1.5m, 仪器间隔距离大于 5m。

采样时, 使用镊子将已称重的滤膜放入洁净采样夹内的滤网上, 滤膜毛面朝进气方向, 将滤膜压紧至不漏气。采样结束后, 用镊子取出并将采样面两次对折后置于铝箔内, 等待称重, 如不能立即称重, 在 4℃ 条件下冷藏保存。记录整个采样过程中的气温、气压及相对湿度。

对研究工作人员进行统一培训, 统一操作标准。每次使用仪器前均进行检查, 以确保其正常工作。由专人进行每日颗粒物采样工作, 并做好每日的仪器运转情况记录。采样前、后均先将滤膜放置在恒温恒湿条件下, 衡重后进行称重。由同一工作人员进行滤膜的初称和复称工作, 以减小偶然误差。数据录入时采用双录入, 双核查的方法, 确保数据录入的准确性。

6. 统计分析

颗粒物中化学元素含量利用 Excel2013 建立数据库, 采用 SPSS20.0 统计软件进行统计分析。

7. 同期采样点大气 PM_{2.5} 浓度与监测站点 PM_{2.5} 浓度的相关性验证

北京市环保监测站点共 35 个, 空间分布如图 1 所示。其中, 距采样点位置距离最近的两个监测站点为朝阳奥体中心和西直门北大街, 如图 2 所示。本研究收集 2012-2013 和 2015-2016 年度采样期间北京市环境保护监测中心网站公布的 35 个 PM_{2.5} 浓度值数据。分别将 2012-2013

年度和 2015-2016 年度采样期采样点大气 $PM_{2.5}$ 浓度与同期离采样点最近的两个监测站 $PM_{2.5}$ 浓度数据、两站点的 $PM_{2.5}$ 平均浓度数据以及北京市所有监测站点 $PM_{2.5}$ 平均浓度数据进行 Spearman 相关分析，相关系数如表 1 所示。表中所示采样点大气 $PM_{2.5}$ 浓度与离采样点最近的两个监测站点 $PM_{2.5}$ 浓度、两个站点的平均 $PM_{2.5}$ 浓度和北京市所有监测站点 $PM_{2.5}$ 浓度的相关关系均具有统计学意义 ($P<0.01$)，且相关系数 r 不小于 0.70，其中 2015-2016 年度监测期相关系数 r 均大于 0.90，呈现强相关性，进一步说明采样大气 $PM_{2.5}$ 浓度数据的科学可靠性。

表 1 采样点大气 $PM_{2.5}$ 与监测站点 $PM_{2.5}$ 浓度的 Spearman 相关系数

年份	朝阳奥体中心	西直门北大街	两站点	北京市所有监测站点
2012-2013	0.80*	0.70*	0.79*	0.78*
2015-2016	0.93*	0.90*	0.92*	0.91*

注：* $P<0.01$

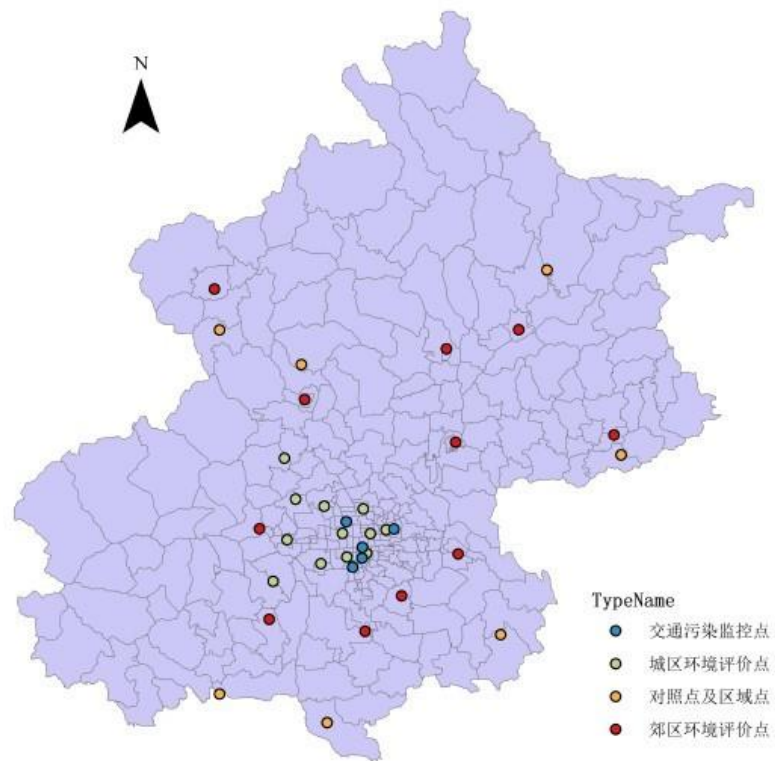


图 1 北京市所有大气监测站点分布图 (N=35)

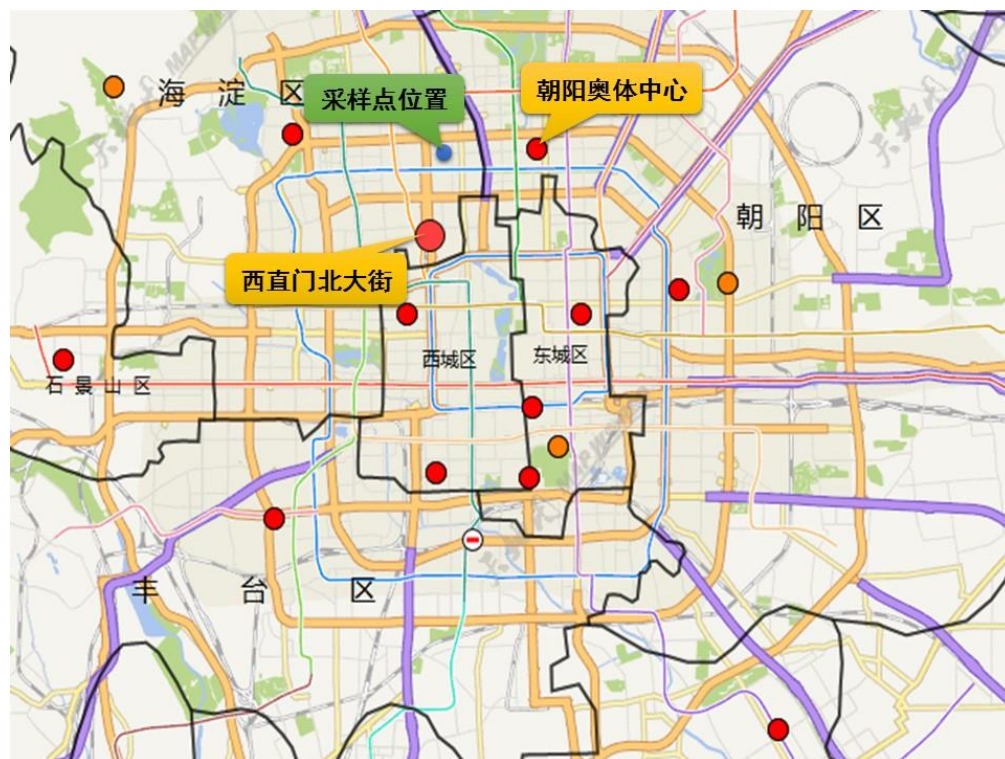


图 2 距采样点最近距离两大气监测站点（朝阳奥体中心、西直门北大街）位置分布

四 研究结论

1. 北京采暖季大气 $PM_{2.5}$ 中重金属元素质量百分比差异变化

为消除 $PM_{2.5}$ 浓度变化、监测时间、气候等因素的影响，采用重金属元素质量百分比（相对含量）进行分析研究。检测结果砷、铅、镉三种致癌重金属元素在两次检测中比值均有统计学意义的显著差异。2015-2016 年检测的砷、镉、铅三种元素在 $PM_{2.5}$ 上的质量百分比中位数相较于 2012-2013 年检测的样品分别下降了 85.9%、40.7% 和 48.9%。各检测元素所占 $PM_{2.5}$ 质量百分比情况如表 2 所示，各元素的浓度见附录

表 8。

表 2 大气 PM_{2.5} 中各检测元素所占质量比 (10⁻⁴)

金属元素	2012-2013				2015-2016				P 值*
	平均值	最小值	中位数	最大值	平均值	最小值	中位数	最大值	
As	1.81	0.70	1.28	4.40	0.30	0.00	0.18	1.26	<0.001
Cd	0.41	0.13	0.27	2.03	0.15	0.05	0.16	0.31	<0.001
Pb	20.48	10.14	18.16	50.99	9.84	4.52	9.28	20.75	<0.001

注：*为 Wilcoxon 秩和检验所得 P 值

2. 北京采暖季《环境空气质量标准》中包含的砷、镉、铅的浓度变化

目前我国、WHO 和欧盟制定了环境空气中部分金属成分年均限值的标准（表 3），但并没有细颗粒物中金属元素日均限值的标准，本研究仅将年均限值作为参考对照之用。

- 砷：2012-2013 年度检测中砷浓度的中位数为 23.08ng/m³，2015-2016 年度检测中砷浓度的中位数为 2.22 ng/m³。与中国环境空气质量标准中的砷的参考浓度年均限值相比，2012-2013 年度的 15 个检测日中，超限值的天数为 12 天；2015-2016 的 34 个检测日中，没有一天浓度超过 6ng/m³。
- 镉：2012-2013 年度检测中镉浓度的中位数为 4.20ng/m³，2015-2016 年度检测中镉浓度的中位数为 1.40ng/m³。与中国环境空气质量标准中的镉的参考浓度年均限值相比，2012-2013 年度的 15 个检测日中，超限值的天数为 4 天；2015-2016 的 34 个检测日中，仅有 2 天浓度超过 5ng/m³。
- 铅：2012-2013 年度检测中铅浓度的中位数为 244.10ng/m³，2015-2016 年度检测中镉浓度的中位数为 81.40ng/m³。与中国环境空气质量标准中的铅的年均限值相比，2012-2013 年度的 15 个检测日中，超限值的天数为 2 天；2015-2016 的 34 个检测日中，没有一天浓度超过 500ng/m³。

表 3 环境空气中重金属相关标准限值 (ng/m³)

	砷	镉	铅
中国	6	5	500
WHO			500

五 政策建议

依据本研究的研究结论，经过三年的大气污染治理，《环境空气质量标准》中涉及的大气中砷、镉和铅三种重金属元素含量在 $PM_{2.5}$ 中的质量百分比相比 2013 年的检测值分别下降了 85.9%、40.7% 和 48.9%。考虑到有研究表明北京城区的砷、镉、铅致癌重金属主要来源于城区周边的燃煤源、城区机动车排放及区域性污染源的输送⁷，因此建议：

1. 针对北京：建议北京继续并强化“无煤化”的进程，尽快关停所有燃煤电厂。提高城区公共交通出行比例，降低城区内车辆使用强度，减少机动车污染物排放。
2. 针对京津冀鲁地区：考虑不在区域内新建任何燃煤电厂，逐步提高京津冀地区可再生能源的发电比例。
3. 针对全国其它人口密集型和现代化程度较高的大型城市及周边区域：这些城市及区域是空气污染治理的重点区域，同样应借鉴北京的“去煤化”的决心和行动力，加快燃煤减排的工作力度。

六 附录

2013-2015 年北京主要大气污染物的浓度

表 4 2013-2015 年北京主要污染物的浓度

	2013 年年均浓度 ⁸	2014 年年均浓度 ⁹	2015 年年均浓度 ¹⁰	2015 年浓度相对 2013 年浓度
二氧化硫（微克/立方米）	26.5	21.8	13.5	-49.1%
氮氧化物（微克/立方米）	56	56.7	50.0	-10.7%
$PM_{2.5}$ （微克/立方米）	89.5	85.9	80.6	-10.0%
PM_{10} （微克/立方米）	108.1	115.8	101.5	-6.1%

2015-2016 年相关 PM_{2.5} 浓度数据

2015-2016 年度采样期间，采样点 PM_{2.5} 浓度数据，朝阳奥体中心和西直门北大街两站点 PM_{2.5} 浓度数据和北京市 35 个监测站点的 PM_{2.5} 浓度数据及见表 5，2012-2013 年度相应数据见表 6。

表5 2015-2016年监测期北京市大气监测站点PM_{2.5}浓度与采样点PM_{2.5}浓度记录(μg/m³)

采样日期	采样点PM _{2.5} 浓度	朝阳奥体中心			西直门北大街			两站点*			北京市所有监测站点		
		平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值
2015/12/18	74.46	71.38	18.00	171.00	69.74	19.00	164.00	70.57	18.00	171.00	77.39	3.00	381.00
2015/12/19	154.41	140.75	54.00	238.00	143.67	86.00	220.00	142.21	54.00	238.00	127.88	20.00	409.00
2015/12/20	216.48	196.83	157.00	271.00	205.17	159.00	277.00	201.00	157.00	277.00	209.81	78.00	666.00
2015/12/21	234.90	245.58	160.00	354.00	272.54	217.00	375.00	259.06	160.00	375.00	260.04	78.00	770.00
2015/12/22	271.84	322.54	129.00	485.00	338.46	178.00	501.00	330.50	129.00	501.00	308.65	78.00	831.00
2015/12/25	442.88	512.29	393.00	657.00	559.38	437.00	669.00	531.13	393.00	669.00	422.09	14.00	787.00
2015/12/27	82.24	44.17	12.00	92.00	56.75	21.00	101.00	50.46	12.00	101.00	51.60	3.00	249.00
2015/12/28	161.86	125.46	78.00	230.00	126.46	90.00	239.00	125.96	78.00	239.00	120.71	12.00	361.00
2015/12/29	215.26	287.46	199.00	538.00	288.29	198.00	560.00	287.88	198.00	560.00	284.38	17.00	706.00
2015/12/31	104.12	56.09	11.00	193.00	67.53	14.00	187.00	61.26	11.00	193.00	77.87	3.00	543.00
2016/1/1	193.35	164.96	89.00	324.00	183.08	99.00	322.00	174.02	89.00	324.00	191.54	57.00	525.00
2016/1/2	273.23	272.79	170.00	519.00	281.30	205.00	525.00	276.96	170.00	525.00	279.01	58.00	747.00
2016/1/5	47.75	31.17	6.00	89.00	39.13	8.00	105.00	35.15	6.00	105.00	36.74	3.00	239.00
2016/1/6	12.41	23.88	9.00	64.00	28.96	13.00	66.00	26.42	9.00	66.00	41.85	3.00	290.00
2016/1/7	13.41	11.92	7.00	24.00	21.95	6.00	40.00	16.60	6.00	40.00	16.82	3.00	283.00
2016/1/8	55.37	30.96	7.00	126.00	38.25	9.00	148.00	34.60	7.00	148.00	41.01	3.00	337.00
2016/1/9	73.07	68.00	15.00	148.00	94.47	23.00	216.00	79.70	15.00	216.00	98.92	7.00	481.00
2016/1/10	33.60	43.67	16.00	85.00	53.83	19.00	157.00	48.75	16.00	157.00	67.73	3.00	563.00
2016/1/11	13.04	11.65	6.00	17.00	14.92	8.00	21.00	13.32	6.00	21.00	14.26	3.00	230.00
2016/1/13	28.44	19.58	8.00	45.00	33.95	12.00	71.00	26.46	8.00	71.00	46.54	3.00	323.00
2016/1/14	84.60	60.54	13.00	119.00	85.00	37.00	152.00	71.66	13.00	152.00	86.88	4.00	395.00
2016/1/15	99.75	88.71	36.00	213.00	96.38	38.00	216.00	92.54	36.00	216.00	112.72	10.00	437.00
2016/1/16	107.90	121.92	82.00	226.00	130.00	97.00	227.00	125.96	82.00	227.00	135.25	79.00	282.00

2016/1/17	30.46	42.58	12.00	173.00	44.96	13.00	170.00	43.77	12.00	173.00	43.16	3.00	200.00
2016/1/18	34.59	8.91	3.00	19.00	13.32	7.00	24.00	11.07	3.00	24.00	11.98	3.00	140.00
2016/1/19	95.25	54.17	15.00	119.00	31.17	17.00	63.00	46.50	15.00	119.00	64.96	3.00	323.00
2016/1/20	135.18	126.50	88.00	173.00	152.17	131.00	173.00	135.06	88.00	173.00	123.41	14.00	413.00
2016/1/21	94.75	137.38	100.00	173.00	154.21	120.00	182.00	145.79	100.00	182.00	133.11	4.00	326.00
2016/1/22	22.40	17.75	4.00	173.00	21.50	4.00	166.00	19.63	4.00	173.00	19.78	3.00	206.00
2016/1/24	32.50	12.46	6.00	22.00	19.00	7.00	57.00	15.73	6.00	57.00	17.51	3.00	222.00
2016/1/25	39.35	20.17	10.00	47.00	42.21	14.00	61.00	31.19	10.00	61.00	45.77	3.00	441.00
2016/1/26	64.73	33.14	15.00	109.00	40.96	15.00	130.00	37.23	15.00	130.00	42.69	3.00	468.00
2016/1/27	135.42	104.50	26.00	190.00	111.58	41.00	216.00	108.36	26.00	216.00	110.40	10.00	403.00
2016/1/28	82.94	142.71	66.00	267.00	142.00	69.00	252.00	142.35	66.00	267.00	133.01	23.00	450.00

注：*指朝阳奥体中心和西直门北大街两个站点综合监测结果

2012-2013 年相关 PM_{2.5} 浓度数据

表 6 2012-2013 年监测期北京市大气监测站点 PM_{2.5} 浓度与采样点 PM_{2.5} 浓度记录 (μg/m³)

采样日期	采样点 PM _{2.5} 浓度	朝阳奥体中心			西直门北大街			两站点*			北京市所有监测站点		
		平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值
2012/12/9	43.54	10.88	8.00	16.00	13.94	10.00	20.00	12.41	8.00	20.00	19.71	3.00	201.00
2012/12/10	81.54	87.20	76.00	102.00	92.60	78.00	123.00	89.90	76.00	123.00	92.32	30.00	172.00
2012/12/11	130.72	104.96	58.00	157.00	105.92	70.00	152.00	105.44	58.00	157.00	106.85	3.00	240.00
2012/12/12	275.75	172.17	70.00	310.00	179.79	79.00	310.00	175.98	70.00	310.00	152.35	3.00	310.00
2012/12/13	194.26	187.79	133.00	260.00	213.04	162.00	271.00	200.42	133.00	271.00	173.48	3.00	303.00
2012/12/16	54.54	96.79	8.00	215.00	115.04	3.00	262.00	105.92	3.00	262.00	96.29	3.00	341.00
2012/12/17	13.42	55.86	3.00	145.00	43.43	3.00	114.00	49.64	3.00	145.00	47.73	3.00	145.00

2012/12/18	59.37	37.69	3.00	81.00	42.15	3.00	90.00	39.92	3.00	90.00	37.13	3.00	109.00
2012/12/19	161.18	149.13	84.00	260.00	140.83	89.00	230.00	144.98	84.00	260.00	130.57	3.00	382.00
2012/12/20	187.46	203.83	104.00	282.00	203.58	126.00	249.00	203.71	104.00	282.00	190.16	3.00	383.00
2013/1/13	331.87	481.47	282.00	799.00	169.67	92.00	281.00	342.89	92.00	799.00	441.09	92.00	818.00
2013/1/14	179.90	272.05	3.00	451.00	98.20	3.00	176.00	187.24	3.00	451.00	258.15	3.00	893.00
2013/1/15	116.74	91.00	48.00	177.00	38.67	20.00	68.00	67.91	20.00	177.00	95.15	3.00	291.00
2013/1/16	43.15	88.29	18.00	207.00	43.00	17.00	79.00	65.65	17.00	207.00	107.53	3.00	348.00
2013/1/17	132.86	47.75	20.00	157.00	23.35	11.00	74.00	35.81	11.00	157.00	54.85	3.00	304.00

注：*指朝阳奥体中心和西直门北大街两个站点综合监测结果

2012-2013 年采样点大气 PM_{2.5} 中砷、镉、铅的浓度

表 7 2012-2013 年采样点大气 PM_{2.5} 砷、镉、铅浓度 (ng/m³)

采样日期	As	Cd	Pb
2012/12/9	3.25	0.56	47.95
2012/12/10	16.67	4.20	415.72
2012/12/11	41.26	5.77	318.25
2012/12/12	33.95	8.01	616.96
2012/12/13	34.68	4.63	312.43
2012/12/16	7.96	1.47	77.81
2012/12/17	1.60	2.72	17.50
2012/12/18	25.03	2.77	136.35
2012/12/19	70.91	6.68	292.66
2012/12/20	39.25	4.73	244.10
2013/1/13	29.29	7.36	985.24

2013/1/14	23.08	4.66	462.20
2013/1/15	8.14	1.66	169.35
2013/1/16	4.80	1.41	90.47
2013/1/17	11.03	1.79	134.74
平均值	23.39	3.90	288.12
最小值	1.60	0.56	17.50
中位数	23.08	4.20	244.10
最大值	70.91	8.01	985.24

注：— 表示未检出

2015-2016 年度研究中检测的采样点大气 PM_{2.5} 中砷、镉、铅的浓度

表 8 2015-2016 年采样点大气 PM_{2.5} 砷、镉、铅浓度 (ng/m³)

采样日期	As	Pb	Cd
2015/12/18	1.31	97.08	1.79
2015/12/19	2.41	169.08	3.62
2015/12/20	-	200.75	3.43
2015/12/21	4.52	230.30	3.73
2015/12/22	3.77	258.97	5.13
2015/12/25	4.77	200.10	6.99
2015/12/27	1.75	94.24	1.41
2015/12/28	2.64	120.18	1.77
2015/12/29	3.66	166.40	3.24
2015/12/31	0.53	102.02	1.71

2016/1/1	3.72	192.31	3.04
2016/1/2	4.89	193.56	4.22
2016/1/5	3.86	49.23	0.70
2016/1/6	0.45	18.08	0.15
2016/1/7	-	19.34	0.27
2016/1/8	0.81	44.66	0.82
2016/1/9	4.31	67.52	1.14
2016/1/10	2.02	56.60	0.70
2016/1/11	-	27.05	0.09
2016/1/13	-	33.64	0.38
2016/1/14	2.94	74.61	1.05
2016/1/15	3.90	112.09	2.39
2016/1/16	1.72	104.40	1.95
2016/1/17	2.60	28.13	0.19
2016/1/18	4.22	15.73	0.20
2016/1/19	1.61	50.26	0.73
2016/1/20	2.97	213.39	3.08
2016/1/21	2.99	85.75	1.38
2016/1/22	2.82	13.25	0.12
2016/1/24	1.21	17.84	0.23
2016/1/25	1.60	31.29	0.42
2016/1/26	0.49	48.83	0.90
2016/1/27	2.00	111.75	2.25
2016/1/28	-	77.05	2.59
平均值	2.25	97.81	1.82
最小值	0.45	13.25	0.09

中位数	2.22	81.40	1.40
最大值	4.89	258.97	6.99

注：— 表示未检出

鸣谢：空气质量指数APP为此次研究提供的数据支持

¹ 陶俊、张仁健、段菁春等. 北京城区 PM_{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析[J] 环境科学 2014 年 2 月
<http://www.klcp.ac.cn/kycg/zwlw/201502/W020150319582070511062.pdf>

² 《北京市2013-2017年清洁空气行动计划》 <http://zhengwu.beijing.gov.cn/ghxx/qtgh/t1324558.htm>.

³ 《2013 北京市环境状况公报》

⁴ 《2015 北京市环境状况公报》

⁵ <https://www.epa.gov/haps/initial-list-hazardous-air-pollutants-modifications>

⁶ http://ntp.niehs.nih.gov/ntp/roc/content/listed_substances_508.pdf

⁷ 陶俊、张仁健、段菁春等. 北京城区 PM_{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析[J] 环境科学 2014 年 2 月
<http://www.klcp.ac.cn/kycg/zwlw/201502/W020150319582070511062.pdf>

⁸ <http://www.bjepb.gov.cn/bjepb/resource/cms/2014/06/2014061911140819230.pdf>

⁹ <http://www.bjepb.gov.cn/bjepb/resource/cms/2015/04/2015041609380279715.pdf>

¹⁰ <http://www.bjepb.gov.cn/bjepb/resource/cms/2016/04/2016041514503583104.pdf>