

# 蓝天保卫战政策的PM<sub>2.5</sub>减排效应

葛荣辉, 吕明洋

哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2024年10月31日; 录用日期: 2025年2月7日; 发布日期: 2025年2月19日

## 摘要

本文以各地级市年平均PM<sub>2.5</sub>空气污染物浓度为研究对象, 运用双重差分方法, 深入分析蓝天保卫战对地方空气质量的改善作用。通过对政策效应的经验分析, 验证蓝天保卫战在降低PM<sub>2.5</sub>含量、改善大气质量方面的实际效果, 并为进一步推进大气污染治理提供科学合理的政策建议, 助力我国打赢蓝天保卫战, 实现经济、社会与环境的协调发展。

## 关键词

PM<sub>2.5</sub>, 减排效应, 大气污染

# PM<sub>2.5</sub> Emission Reduction Effect of the Blue Sky Defense Policy

Ronghui Ge, Mingyang Lyu

School of Geographical Sciences, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Oct. 31<sup>st</sup>, 2024; accepted: Feb. 7<sup>th</sup>, 2025; published: Feb. 19<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

This paper takes the annual average PM<sub>2.5</sub> air pollutant concentration of each prefecture-level city as the research object, and uses the double difference method to deeply analyze the improvement effect of the Blue Sky Defense on local air quality. Through the empirical analysis of the policy effect, the actual effect of the Blue Sky Defense in reducing PM<sub>2.5</sub> content and improving air quality is verified, and scientific and reasonable policy recommendations are provided for further promoting air pollution control, helping my country win the Blue Sky Defense War and achieve coordinated development of the economy, society and environment.

## Keywords

PM<sub>2.5</sub>, Emission Reduction Effect, Air Pollution

Copyright © 2025 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

近年来, 大气污染治理成为政府和公众关注的焦点[1][2]。随着工业化、城市化进程的加速推进, 大气污染问题日益严峻, 严重影响了人们的生活质量和身体健康。 $PM_{2.5}$  作为大气中的主要污染物之一, 其对人体健康的危害尤为突出。 $PM_{2.5}$  粒径小, 富含大量的有毒、有害物质且在大气中的停留时间长、输送距离远, 可引发呼吸系统疾病、心血管疾病等, 给公共健康带来巨大威胁。为了有效改善大气环境质量, 我国政府积极采取行动, 大力推进大气污染治理工作。其中, “蓝天保卫战” 作为一项重大战略举措, 旨在通过加强生态环境管理、推进污染防治、控制煤炭消费等一系列措施, 降低大气中的污染物排放, 尤其是减少  $PM_{2.5}$  的含量, 提升空气质量, 为人民群众创造更加清洁、健康的生活环境。

蓝天保卫战的实施, 不仅是对人民群众对美好生态环境需求的积极回应, 也是我国实现可持续发展的必然选择。在经济快速发展的同时, 我们不能忽视环境问题, 而应坚持经济发展与环境保护并重, 努力实现人与自然的和谐共生。通过蓝天保卫战, 我们期望能够切实提高当地空气污染治理成效, 推动我国大气环境质量持续改善。

本文以各地级市年平均  $PM_{2.5}$  空气污染物浓度为研究对象, 运用双重差分方法, 深入分析蓝天保卫战对地方空气质量的改善作用。通过对政策效应的经验分析, 验证蓝天保卫战在降低  $PM_{2.5}$  含量、改善大气质量方面的实际效果, 并为进一步推进大气污染治理提供科学合理的政策建议, 助力我国打赢蓝天保卫战, 实现经济、社会与环境的协调发展。

## 2. 方法与数据

### 2.1. 理论机制

当地政府能否切实贯彻落实大气环境法律和政策, 是提高当地空气污染治理成效的重要因素。蓝天保卫战提出: 一是要加强对生态环境的管理。随着我国经济社会的快速发展, 我国的经济社会发展面临着前所未有的严峻挑战。要科学施策, 标本兼治, 铁腕治理, 才能交出一份合格的答卷。二是要坚定不移地打赢“蓝天保卫战”。2017年,  $SO_2$  和  $NO_x$  排放量将分别降低 3%,  $PM_{2.5}$  在重点区域的浓度将显著降低。一要抓紧抓好煤炭资源的治理。全面开展散煤综合整治, 推动北方冬季清洁供暖, 实现 300 万户以上的“以电代煤”和“以气代煤”, 在地级以上城市建成区全面淘汰小型燃煤锅炉。东部、中部和西部要在 2020 年前基本完成超低排放和节能改造。要加快推进新能源发电的体制、技术等方面的研究, 确保新能源的并网, 使我国弃水弃风弃光现象得到有效缓解。我们要加速推进秸秆综合利用。二是要做好污染防治工作。在重点行业中, 我们要做好环境保护工作。三是要加强对水和土壤的污染控制。2017年, COD 和氨氮排放量将减少 2 个百分点。因此, 本文提出两个假设。

假设一: 蓝天保卫战能降低当地大气  $PM_{2.5}$  含量。

假设二: 蓝天保卫战能够改善当地大气质量。

### 2.2. 双重差分模型

双重差分方法是一种有效识别政策处理效应的方法, 其思路是将新政策的实施视为一种“准自然实验”, 通过比较受实验冲击影响的实验组与对照组的平均变化的差异来评价政策的实施效果, 在环境政

策领域, 该方法亦在检验环境规制对于环境质量改善效果的研究上得到了广泛运用[3]。本文以蓝天保卫战报告为外生冲击, 准备采用双重差分模型识别蓝天保卫战对 PM<sub>2.5</sub> 的减排效应。本文所用的数据来源于中国统计年鉴, 样本数为 xxx 个地级市。根据蓝天保卫战三年行动计划书, 本文将京津冀地区与汾渭平原地区城市作为试点地区。在本文的 xxx 个地级市样本中, 有 19 个地级市构成实验组, 其余未作为重点的 xxx 个地级市就构成了控制组。因此, 本文构建以下双重差分模型, 检验蓝天保卫战计划书对 PM<sub>2.5</sub> 的减排效应:

$$Y_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \text{treat} * \text{time} + \gamma_c X_{it} + \beta_t + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中:  $Y_{it}$  为在  $t$  期间地级城市  $i$  的 PM<sub>2.5</sub> 排放量;  $X_{it}$  为控制变量, 即产业结构、教育支出水平、人口密度、经济发展水平、政府干预水平以及外商直接投资;  $\beta_t$  为年份固定效应, 是所有地级市共有的时间要素;  $\mu_i$  是区域固定效果, 也就是城市的非时间特性;  $\varepsilon_{it}$  是随机误差项。treat 是政策虚拟变量, 如果一个地级市位于试点地区, treat 等于 1, 否则等于 0; time 为时间虚拟变量, 如果在 2017 年及以后, 等于 1, 否则等于 0; treat × time 为 2 个虚拟变量的交互项, 交互项系数  $\alpha_1$  是双重差分法关键估计量, 其捕获的是试点地区在计划期间相对于非试点地区排名排放浓度的平均变化, 如果  $\alpha_1$  显著为负值, 可以推断蓝天保卫计划具有显著 PM<sub>2.5</sub> 减排效应。

## 2.3. 指标和数据选取

### 2.3.1. 解释变量与被解释变量

PM<sub>2.5</sub> 浓度为被解释变量  $Y_{it}$ , 本文选用各地级市 PM<sub>2.5</sub> 年平均浓度, 解释变量包含政策虚拟变量与时间虚拟变量 time\*treat, 产业结构、教育支出水平、人口密度、经济发展水平、政府干预水平以及外商直接投资。

人口密度(LNDES): 其可以反映人口的集聚程度, 人口生活和生产活动的集聚通常会加剧环境污染程度[4]。

产业结构(IND): 第二产业属于能源密集型产业, 且我国以第二产业为主的产业结构是导致 PM<sub>2.5</sub> 增加的主要原因[5]。

经济发展水平(LNRGDP): 经济发展水平越高面临的污染问题也就越严重。

外商直接投资(FDI): 其是实现先进技术转移的主要方式之一, 更有效率的生产技术通过该方式引进到中国。同时, 外商直接投资带来的技术溢出效应也能使国内企业的生产技术得到一定的提升[6]。

### 2.3.2. 数据来源

PM<sub>2.5</sub> 浓度来源于《中国统计年鉴》, 产业结构、教育支出水平、人口密度、经济发展水平、政府干预水平以及外商直接投资均来源《中国统计年鉴》。

## 3. 实证结果与分析

### 3.1. 基准回归结果

本文运用双重差分方法, 研究在蓝天保卫战下, 我国大气中 PM<sub>2.5</sub> 的含量变化, 通过对政策效应的经验分析, 识别出蓝天保卫战的政策建议。计划实施后, 实验组与对照组相比, 其 PM<sub>2.5</sub> 排放量的平均变化, 即蓝天保卫战政策的平均处理效应, 结果如表 1:

如表 1 的第(1)~(2)所示, 核心解释变量 treat\*time 的回归系数在 1%, 5%的显著水平上为负值, 这表明试验组的 PM<sub>2.5</sub> 排放量在蓝天保卫战实施后得到显著改善。在政策冲击下, 经济增长速度明显下降, 也就是实行了蓝天保卫战的政策, 从而大幅度减少了试验区域的 PM<sub>2.5</sub> 浓度。加入控制变量之后(如列 2)回

归分析显示, 与未实施地区相比, 蓝天保卫战后, 试点区域的  $PM_{2.5}$  排放强度降低 0.92。研究表明, 假设一成立, 蓝天保卫战能降低当地大气  $PM_{2.5}$  含量。

**Table 1.** Double difference results  
**表 1.** 双重差分结果

	(1)	(2)
	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5}$
treat*time	-3.496** (1.55)	-4.899** (1.96)
实际利用外商投资		-2.122 (6.82)
教育支出水平		-13.897* (8.33)
政府干预水平		-11.184*** (1.82)
第二产业		-0.007*** (0.00)
人口密度		-0.000 (0.00)
人均 gdp		-0.000 (0.00)
常数项		46.542*** (1.74)
样本量		1,622
$R^2$		0.950
时间固定效应		yes
地区固定效应		yes

注: (1) 括号中为 t 值; (2) \*, \*\*, \*\*\* 分别表示显著性水平为 10%、5% 和 1%; (3) 回归采用了以地级市为聚类变量的聚类稳健标准误。

### 3.2. 稳健性分析

结果表明, 蓝天保卫计划对我国的  $PM_{2.5}$  排放具有明显的抑制作用。为了消除其他原因造成的偏差, 确保前面双重差分模型基准回归结果的稳定性。在稳健性方面, 我们将采用平行趋势检验法, 安慰剂检验, 对前面的结果进行了稳定性分析和可靠性分析。

#### 3.2.1. 平行趋势检验

双重差分结果满足的前提是, 若试验组与对照组均满足平行倾向, 即在没有政策介入时, 试验组与对照组的情况是一样的, 只有这样, 试验组与对照组在政策执行前与执行后的测量才有比较意义, 而且,

模式(1)只确认了蓝天保卫战在试验区域,  $PM_{2.5}$  排放强度的平均效应, 很难对蓝天保卫战后的效果进行有效判断, 并且不能研究试验区域内  $PM_{2.5}$  浓度的持续影响。所以本文在实行计划年前和年后引入了交互项, 严谨地分析蓝天保卫战对  $PM_{2.5}$  排放强度的影响效果, 模型如下:

$$Y_{it} = \alpha_0 + \sum_{t=2014}^{2020} \alpha_1 \text{treat} * \text{time}_t + \gamma_c X_{it} + \beta_t + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

式中:  $\text{time}_t$  是年的虚拟变量( $t=2014, 2015, \dots, 2020$ ), 在研究第  $t$  年时, 则  $\text{time}_t = 1$ , 其余年份均为 0, 当  $\alpha_{2014} \sim \alpha_{2016}$  显著时, 说明试验组和对照组的  $PM_{2.5}$  排放强度在蓝天保卫战发布前的变化趋势相同, 即模型满足平行趋势检验。当  $\alpha_{2017} \sim \alpha_{2020}$  均显著时, 则说明该蓝天保卫战的  $PM_{2.5}$  减排效应具有持续性。

图 1 表明了蓝天保卫战对减少  $PM_{2.5}$  排放的影响在蓝天保卫战实行之前的 3 年内, 该模型的回归系数都是不显著的。这些系数都接近于 0, 显示试验区域和未纳入的区域在 2017 年以前。

在没有政策的情况下, 试验区域的变化趋势没有明显的差别。在无政策干扰下, 实验组与对照组的变化趋势一致, 均满足平行倾向假定。

对政策动力效果进一步分析, 见附图 1, 表明政策执行年以后,  $PM_{2.5}$  排放量快速降低, 也就是蓝天保卫战实行后对  $PM_{2.5}$  的影响。结果显示, 2017~2020 年间存在明显的抑制作用。政策效应呈逐年加强的态势, 说明蓝天保卫战政策的实施, 不但会产生持续性的减排效果, 而且会随政策的执行而不断增强, 并随着计划实行时间的持续, 减排效果愈加显著。

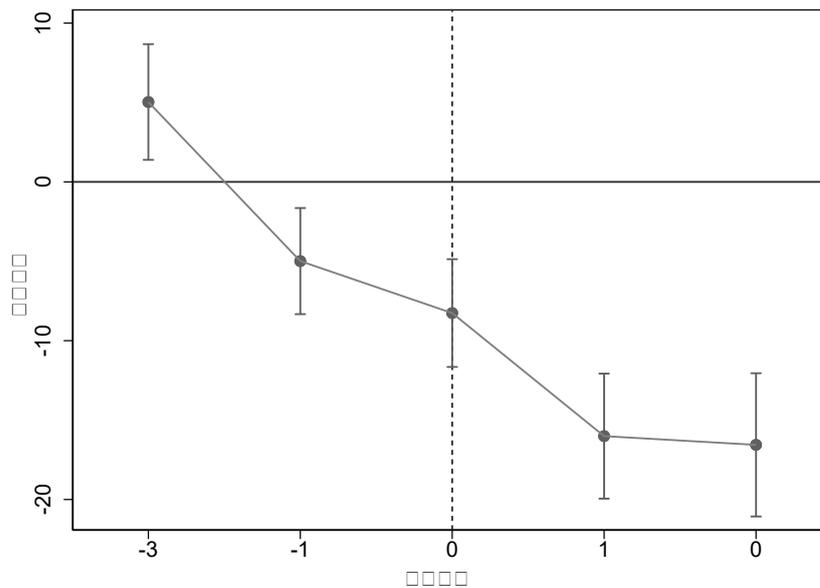


Figure 1. Dynamic effect  
图 1. 动态效应

### 3.2.2. 反事实检验

使用时间反事实检验对其他影响因素进行排除, 将政策发生的时间推迟 3a, 即 2014 年, 其他变量不改变, 并进行回归。如果回归结果显著, 则说明存在其他因素的干扰; 如果回归不显著, 则说明模型具有稳定性。如表 2 所示, 反事实回归结果显示不显著, 并没有得到与真实效应相同的显著负效应, 说明 DID 模型回归结果稳健。

**Table 2.** Counterfactual tests**表 2.** 反事实检验

	(1)
	PM <sub>2.5</sub>
treat*time	-0.890 (1.94)
实际利用外商投资	66.081 (54.50)
教育支出水平	-194.247*** (40.20)
政府干预水平	-72.061** (32.68)
第二产业	3.886 (8.96)
人口密度	-0.006 (0.00)
人均 gdp	-0.000 (0.00)
常数项	108.140*** (15.70)
R <sup>2</sup>	0.785
时间固定效应	yes
地区固定效应	yes

注: (1) 括号中为值; (2) \*、\*\*、\*\*\*分别表示显著性水平为 10%、5%和 1%; (3) 回归采用了以地级市为聚类变量的聚类稳健标准误。

### 3.2.3. 缩尾处理

防止离群值且为了进一步验证前文结论的稳健性, 接下来本文对核心变量 PM<sub>2.5</sub> 进行了 1%、5%分位上双边缩尾处理[7]。缩尾处理平均处理效果如表 3 所示, 关键解释变量的估计系数仍在 5%的水平下显著性为负, 回归结果表明蓝天保卫战可显著降低 PM<sub>2.5</sub> 排放量, 进一步印证前文结果具有稳健性。

**Table 3.** Excluding extreme values**表 3.** 剔除极端值

	(1)	(2)
	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>2.5</sub>
treat*time	-2.648*** (0.59)	-2.991* (0.55)
实际利用外商投资	-0.114 (6.17)	-0.556 (5.78)
教育支出水平	-3.095 (3.93)	-2.345 (3.70)

续表

政府干预水平	-7.643*** (1.68)	-8.514*** (2.40)
第二产业	-0.007 (0.01)	-0.006 (0.00)
人口密度	0.000 (0.00)	0.001** (0.00)
人均 gdp	-0.000* (0.00)	-0.000*** (0.00)
常数项	50.546*** (0.94)	49.953*** (0.99)
样本量	1622	1622
R <sup>2</sup>	0.786	0.778
时间固定效应	yes	yes
地区固定效应	yes	yes

注: (1) 括号中为值; (2) \*、\*\*、\*\*\*分别表示显著性水平为 10%、5%和 1%; (3) 回归采用了以地级市为聚类变量的聚类稳健标准误。

## 4. 结论与建议

### 4.1. 结论

本文以各地级市年平均  $PM_{2.5}$  空气污染物浓度作为被解释变量, 运用双重差分的科学方法, 深入探究了蓝天保卫战对地方空气质量的改善成效, 进而得出如下结论:

其一, 蓝天保卫战在降低  $PM_{2.5}$  浓度值含量方面发挥了显著的促进作用。通过严谨的实证分析, 我们清晰地看到, 在蓝天保卫战实施后, 相关地区的  $PM_{2.5}$  排放量得到了有效控制, 浓度值显著下降。这一成果得益于蓝天保卫战一系列针对性措施的有力实施, 如对污染源的严格管控、能源结构的优化调整以及产业布局的合理规划等, 共同推动了  $PM_{2.5}$  浓度的降低, 为地方空气质量的改善奠定了坚实基础。

其二, 就政策效果的持续性而言, 蓝天保卫战对地方  $PM_{2.5}$  浓度的改善呈现出持续稳定的态势。从长期的数据分析来看, 随着蓝天保卫战的持续推进, 其对  $PM_{2.5}$  浓度的改善效果不仅没有减弱, 反而逐年增强。这表明蓝天保卫战所采取的措施具有长效性和可持续性, 能够持续地对大气环境产生积极影响, 为地方空气质量的长期稳定改善提供了有力保障。

### 4.2. 政策建议

基于上述研究结论, 为了进一步巩固和提升蓝天保卫战的成果, 我们提出以下政策建议。

#### 4.2.1. 常态化推进与治理优化

考虑到蓝天保卫战对  $PM_{2.5}$  的浓度值降低具有显著的促进作用, 我们建议进一步将蓝天保卫战工作常态化。这意味着要建立长效的工作机制, 持续加强对大气污染治理的投入和监管力度, 以有效应对大气治理中可能出现的政府失灵问题。具体而言, 应加强政策的执行力度和监督机制, 确保各项环保政策能够切实落实到基层。同时, 要不断优化治理策略, 根据不同地区的实际情况, 制定差异化的治理方案, 精准施策, 推动重点地方大气环境质量的持续改善。例如, 对于工业污染较为严重的地区, 应加大对企业的环保监管力度, 鼓励企业进行技术创新和产业升级, 减少污染物排放; 对于交通拥堵、机动车尾气

排放量大的城市, 应加强交通管理, 推广公共交通, 鼓励绿色出行等。

#### 4.2.2. 强化建筑工地与流动污染源管控

论及蓝天保卫战的作用持续性问题, 各地应高度重视建筑工地粉尘污染。建筑工地是城市扬尘的重要来源之一, 对空气质量有着显著影响。因此, 要加强对建筑工地的日常监管, 要求施工单位严格落实防尘降尘措施, 如设置围挡、洒水降尘、物料覆盖等。同时, 在加强预防和控制的过程中, 要注重方式方法, 避免采取简单粗暴的“一刀切”手段[8], 充分考虑企业的实际情况, 合理安排施工进度, 减少对企业正常业务的不必要影响。

此外, 要特别关注流动来源的污染。随着我国经济的发展和城市化进程的加速, 流动污染源如机动车尾气排放、道路扬尘等问题日益突出。在目前我国汽车拥有量持续增长的情况下, 应积极采取措施鼓励消费者购买新能源车等低排放车辆, 通过提供购车补贴、完善充电设施等方式, 降低机动车尾气中一氧化碳等污染物的排放量。同时, 考虑到国 III 级的柴油车辆对我国大气环境的影响, 尤其是其氮氧化物排放量在全年中所占比例较大, 各城市可根据实际情况, 适当将控车对象扩大至此类机动车, 加强对其排放的监管和治理, 如加快淘汰老旧柴油车、加强尾气检测等, 以有效减少流动污染源对空气质量的负面影响。

#### 4.2.3. 拓展试验区与加强综合管理

为了更好地发挥蓝天保卫战的政策效果, 应积极拓展试验区。随着蓝天保卫战的深入推进, 我们发现其在试点地区取得了显著的成效, 抑制了  $PM_{2.5}$  排放量, 且政策效应逐渐增强。因此, 可考虑在更多地区开展试点工作, 将成功的经验和模式进行推广应用。在拓展实验区的过程中, 要主动增设监测点, 实现对  $PM_{2.5}$  含量的持续监控, 及时掌握空气质量的变化情况, 为政策的调整和优化提供科学依据。

在蓝天保卫战的引导和激励下, 政府和有关部门应认真贯彻和执行政策, 综合考虑降低  $PM_{2.5}$  排放量带给环境的多方面效益。政府要加大对环保领域的投资力度, 不仅要投入资金用于污染治理设施的建设和升级, 还要加强对环保科研的支持, 推动环保技术的创新和应用。同时, 要注重生态环境的整体建设, 通过植树造林、湿地保护等生态工程, 提高生态系统的自净能力, 努力营造出绿水青山蓝天白云的美好生态环境, 实现经济、社会与环境的协调可持续发展。

## 基金项目

黑龙江省哲学社会科学规划项目(22JYE462), 哈尔滨师范大学研究生创新项目(HSDSSCX2024.02)。

## 参考文献

- [1] Xu, S., Miao, Y., Gao, C., Long, R., Chen, H., Zhao, B., *et al.* (2019) Regional Differences in Impacts of Economic Growth and Urbanization on Air Pollutants in China Based on Provincial Panel Estimation. *Journal of Cleaner Production*, **208**, 340-352. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.114>
- [2] Yang, W., Yuan, G. and Han, J. (2019) Is China's Air Pollution Control Policy Effective? Evidence from Yangtze River Delta Cities. *Journal of Cleaner Production*, **220**, 110-133. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.287>
- [3] 斯丽娟, 曹昊煜. 排污权交易对污染物排放的影响——基于双重差分法的准自然实验分析[J]. 管理评论, 2020, 32(12): 15-26.
- [4] 邵帅, 李欣, 曹建华, 等. 中国雾霾污染治理的经济政策选择——基于空间溢出效应的视角[J]. 经济研究, 2016, 51(9): 73-88.
- [5] 刘安国, 张克森, 聂蓓, 等. 江苏省第二产业演进与工业三废排放关系研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(4): 1579-

1588.

- [6] Petrović, P., Filipović, S. and Radovanović, M. (2018) Underlying Causal Factors of the European Union Energy Intensity: Econometric Evidence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **89**, 216-227.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.061>
- [7] 刘瑞明, 李林, 亢延锴, 等. 景点评选、政府公共服务供给与地区旅游经济发展[J]. 中国工业经济, 2018, 36(2): 118-136.
- [8] 沈洪涛, 周艳坤. 环境执法监督与企业环境绩效: 来自环保约谈的准自然实验证据[J]. 南开管理评论, 2017, 20(6): 73-82.