

# 大气网格化治理是否改善了西安市空气质量?

吴文宗<sup>1</sup>, 董利民<sup>2</sup>

<sup>1</sup>西安理工大学经济与管理学院, 陕西 西安

<sup>2</sup>华中师范大学经济与工商管理学院, 湖北 武汉

Email: 534477208@qq.com, dlm6805@126.com

收稿日期: 2020年8月13日; 录用日期: 2020年9月3日; 发布日期: 2020年9月10日

## 摘要

自西安市大气网格化治理于2014年深入实践以来, 西安市空气质量得到显著改善, 但冬季依然存在极端天气现象, 雾霾污染依旧非常严峻。直观上难以判断大气网格化治理机制对于空气质量改善是否有效, 其治理效果甚至受到外界质疑。为分析该问题, 运用2013至2017年的日度时间序列数据与工具变量回归进行实证分析。结果表明: 无论从整体空气质量角度还是从污染物异质性(SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>)角度分析, 该环境规制政策效果十分显著。研究进一步发现, 西安市不同时期空气污染物存在结构性差异, 夏季以SO<sub>2</sub>污染为主, 网格化治理通过遏制SO<sub>2</sub>排放而显著改善空气质量; 冬季则以NO<sub>x</sub>污染为主, 网格化对此治理效果并不显著, 无法进一步改善空气质量。综合考虑, 网格化治理能够发挥预期治理成效, 只是进入冬季后, 能源消费季节性变化导致污染物结构性变化, 进而弱化网格化冬季治霾效果, 但西安市大气网格化治理依然能够为汾渭平原雾霾协同治理提供决策依据, 奠定实践基础。

## 关键词

网格化治理, 时间序列, 工具变量, 雾霾污染

# Has Grid Management Improved the Air Quality of Xi'an City?

Wenzong Wu<sup>1</sup>, Limin Dong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Economics and Administration, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>School of Economics and Business Administration, Central China Normal University, Wuhan Hubei

Email: 534477208@qq.com, dlm6805@126.com

Received: Aug. 13<sup>th</sup>, 2020; accepted: Sep. 3<sup>rd</sup>, 2020; published: Sep. 10<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

Since the implementation of grid management in Xi'an City, the air quality has been improved obviously, but there were still some extreme weather issues that were not addressed totally. Thus, we cannot directly draw the conclusion of whether grid management can improve air quality; even it can be easily criticized by society. This paper uses time series data from 2013 to 2017 and instrument variables to take empirical research. The results manifest that whatever in the perspective of AQI or different air pollutants ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ), the effect of this environmental regulation policy is very remarkable. Research further found that air pollutants of Xi'an have structural differences in different seasons. In summer, pollutants are  $\text{SO}_2$  mainly, and grid management can improve AQI obviously by controlling emission of  $\text{SO}_2$ ; but during winter, pollutants are  $\text{NO}_x$  mainly, so grid management can not improve AQI. To sum up, the mechanism of grid management is effective; merely, structural change of energy consumption leads to that of pollutants in winter, so it weakens the governance effect of grid management. But grid management of Xi'an can provide the basis of collaborative governance about haze pollution for these areas.

## Keywords

Grid Management, Time Series, Instrument Variable, Haze Pollution

Copyright © 2020 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

2013年西安市在全国率先提出并实施治污减霾工作。为保证大气污染防治活动有序进行,相继出台《西安市“治污减霾”工作实施方案(2013年)》与《西安市人民政府办公厅关于印发西安市治污减霾网格化治理实施意见的通知》,成立自上而下的四级网格,共计3748个小网格,消除治霾“盲区”。大气网格化治理是雾霾治理的创新方式。旨在解决各职能部门工作职责交叉、执法力量分散、基层机构不全、任务落实不力等问题。划分的3748个热点网格,实则由人(网格员)落实治理过程:网格员利用五官感知(视觉、嗅觉)监测大气污染源,并从源头进行遏制。首先对造成污染的行为主体进行劝阻,劝阻无效则将污染情况上报至“智慧平台”,“智慧平台”根据污染源类型,确定责任主体,对其进行问责,然后再对污染源进行处理。西安市空气质量得到改善的同时,冬季极端天气现象仍然存在。2013至2017年西安市优良天数依次为138、211、251、192与180天,虽然西安市优良天数在实施网格化治理后相比之前有所增加,且2015年治理效果最为明显。但此后,西安市的优良天数逐年减少,2018年也仅有188天优良天数,直观反映难免为西安市治霾效果有所减弱。2015年12月30日,网格化治理更是受到外界批评,环保部指出西安市大气污染防治网格化和精细化管理不到位。西安市地处汾渭平原,相邻省市的空气污染物容易跨区域传输至关中境内,来自西北方向的沙尘天气又极易影响关中地区空气质量,此外,南北方向坐落秦岭与黄土高原,因此关中城市群境内空气流通较为滞缓,空气污染物容易在此滞留。另外,气象因素,比如降雨、降雪、风速均能够影响空气质量。因此,直观上难以简单得到网格化治理与空气质量关系的相关结论。然而,是否真如外界所言,网格化治理存在问题?本文通过实证对以上问题进行回答,以进一步完善西安市大气污染防治机制,使作为国家中心城市以及西部开放高地的西安市能够为极

端天气地区提供大气污染防治方案的“西安模式”。

## 2. 文献回顾与研究创新

在研究环境规制与空气质量关系领域中, 目前已有研究大致分为两条脉络。第一条脉络为直接度量环境规制强度, 来研究其与空气质量关系。该脉络中, 度量环境规制的方法非常丰富, 如王书斌与徐盈之以地方颁布的环境行政法规数、地区当年受理环境行政处罚案件数量、地区排污费用与工业总产值比值三项指标分别度量环境行政管制强度、环境污染监管强度、环境经济规制强度, 并作为环境规制变量[1]; 祁毓等通过设置虚拟变量表示空气质量限期达标与非达标城市以度量环境规制[2]; 张同斌采用排污费收入额与污染排放变量比值作为度量环境规制强度的指标[3]; 孙坤鑫与钟茂初使用单位产值的工业废气治理设施运行费用表示环境规制水平[4]; 朱向东等使用污染密度法度量环境规制强度[5]。第二条脉络为研究某个具体环境规制政策对空气质量的影响, 如研究机动车限行政策[6] [7] [8]、城市轨道交通[9] [10]、能源替代政策[11]、排污费征收标准改革[12]、以及中央环保督察[13]对空气质量影响。

虽然环境规制与空气质量关系的研究内容与角度均较为丰富。但网格化治理已践行多年, 环境规制领域在该方面却鲜有研究。本文顺承二条脉络, 拟研究其与空气质量的关系, 并根据本文研究结果为网格化治理提供相关政策建议, 完善该治理机制, 同时本文还能够一定层面上丰富网格化治理实证研究, 为环境规制提供新的研究内容与视角。

目前环境规制领域使用较为广泛的实证研究方法为双重差分模型(Differences-in-Differences, DID)、断点回归设计(Regression Discontinuity Design, RDD)或倾向得分匹配(Propensity Score Matching, PSM)等进行政策评估。基于本文研究选题角度, 若考虑使用 DID, 需要寻找与西安市各方面发展相似的城市作为对照组样本, 西安市虽然地处西部, 但作为国家中心城市与“丝绸之路”起点城市, 具有独特的战略定位, 难以寻找到与之相似的城市作为对照组; 若使用 RDD, 需要政策具有强烈的“一刀切”性质, 而网格化治理是阶段推进过程, 大气热点网格覆盖率是逐渐累加的过程, 因此不能使用 RDD 进行政策评估; 若使用 PSM 方法, 同样需要寻找与西安市发展相近的城市, 构造“合成西安”, 进行政策评估, 即使寻找到此类城市用于“合成西安”, 但政策的阶段推进特征同样使得 PSM 方法不适用。

基于以上分析, 本文最终选取时间序列模型进行实证研究。主要创新点体现在以下方面: ① 本文将较为正式研究大气网格化治理与空气质量的关系, 并能够将“网格化治理”进行量化; ② 由于该环境规制政策具有时间趋势(大气热点网格覆盖率随时间推进, 具有动态变化特征), 本文不是直接将其简单设定为政策虚拟变量(即单差法[14]), 而是寻找能够量化该政策的指标(覆盖率差分值), 作为本文最为关心的解释变量, 此方法能够将政策在时间上的异质性表现出来, 使研究结果更加准确; ③ 本文除研究网格化治理对空气质量影响外, 还将进一步分析网格化治理与空气污染物异质性关系, 同时以环保部批评日期为时间断点(准实验), 分析时间断点前后的政策效应。

## 3. 计量模型与数据说明

### 3.1. 基准模型与数据说明

本文拟研究西安市网格化治理能否对空气质量起到改善作用, 同时考虑到其他环境规制政策(如网格化治理政策实施前的“保卫蓝天”)产生的影响(若网格员进行劝阻无效, 上报给“智慧平台”的污染突发事件将会直接与部分“保卫蓝天”责任主体挂钩, 因此两者具有一定相关性, 若不控制此环境规制政策, 将使得网格化治理的参数估计值在绝对值上偏大, 因此必须将“保卫蓝天”作为控制变量放入基准模型中), 构建如下基准模型, 以较精确衡量网格化治理对空气质量的影响:

$$aqi_t = \alpha_0 + \alpha_1 coverage_t + \sum_{i=1}^7 \beta_i X_{it} + \sum_{i=1}^5 \gamma_i Z_{it} + \eta_t + \xi_t + \sum_{i=1}^{11} \varphi_{it} + \varepsilon_t \quad (1)$$

其中,  $aqi_t$  表示每日空气质量指数 AQI 数值, 下标  $t$  表示日期(2013 年 10 月 28 日至 2017 年 12 月 31 日);  $coverage_t$ , 表示大气网格化覆盖率差分值(阶段推进期内不变值);  $X_{it}$  为控制变量, 表示所有度量“保卫蓝天”六大举措的指标以及规模以上工业增加值;  $Z_{it}$  表示气象变量, 包括每日最高温、最低温、风速以及天气情况虚拟变量(是否有雨、是否有雪)。由于空气质量指数呈现较强时间分布特性, 因此必须将时间效应分离出来, 才能更加准确观测网格化治理对空气质量的真实影响。 $\eta_t$  表示国家法定节假日时间效应,  $\xi_t$  表示双休日时间效应,  $\varphi_{it}$  代表一月至十一月各月份时间效应。

被解释变量, AQI 数据整理自天气后报网<sup>1</sup>, 考虑到不同网站对空气质量以及天气气象测度水平的差异性, 气象变量(最高温、最低温、风速、雨雪虚拟变量)同样选自天气后报网。由于天气后报网的西安市历史天气数据能够追溯到 2011 年 1 月 1 日, 而历史空气质量数据只能追溯到 2013 年 10 月 28 日<sup>2</sup>, 因此样本时间序列起始日期为 2013 年 10 月 28 日。另一问题是, 天气后报网的西安市历史空气质量存在 5 日数据缺失(2014 年 1 月 23 日、2014 年 3 月 24 日、2014 年 8 月 8 日、2014 年 8 月 22 日、2017 年 10 月 4 日), 缺失数据用真气网中国空气质量在线监测分析平台<sup>3</sup>进行数据修补。

对于风速控制变量, 天气后报网只提供风力和风向数据, 本文通过风力等级表将风力转化为风速。国家法定节假日、双休日虚拟变量整理自 2012 至 2016 年国务院办公厅发布的部分节假日安排通知。

“保卫蓝天”行动包含“减煤、控车、抑尘、治源、禁燃、增绿”六项举措, 本文根据 2013 年至 2017 年《西安市“治污减霾”工作实施方案》中各项举措具体的任务数量, 作为量化六大举措的指标。

其中“减煤”指对规模以上工业推行“煤改气”以及“电能替代”来削减煤炭消费量, 对煤炭市场进行规制(用优质煤替代劣质煤), 同时禁止散煤使用, 以全方位减少燃煤空气污染。而选用规模以上工业增加值作为控制变量的逻辑如下, 企业使用燃煤将直接排放空气污染物, 因此, 统计年鉴中标准煤消费量成为空气质量的支配变量, 倘若直接使用该指标作为解释变量对空气质量进行回归分析, 将减弱其余解释变量系数显著性。对此, 本文选择规模以上工业增加值来避免使用支配变量。另一方面, 无论煤炭、天然气或电能最终都将转化为工业增加值。董会忠等指出工业总产值与能源消费量具有协整关系[15], 进一步说明工业增加值与能源消费量高度相关。若工业增加值参数显著为负, 说明工业增加值促进空气质量改善, 进而说明随着“煤改气”以及“电能替代”工程不断推进, 企业能源消费结构得到改善, 产值增加同时减少污染。

对于“增绿”变量, 选取年末绿化覆盖面积增加值进行度量。以外, 其余 4 大举措根据《西安市“治污减霾”工作实施方案》每年安排的任务数量, 作为解释变量。原因如下: ① 虽然“控车、治源”等举措能够选取淘汰黄标车及老旧车数量等作为量化指标, 但这些指标也仅来自某一项任务, 并不能突出“控车、治源”的政策全面性, 将产生遗漏变量, 同时“抑尘、禁燃”没有直接量化的数据或指标来度量该两项举措(本文还进一步尝试从“抑尘、禁燃”举措各个任务执行部门官方出台的某些政府公文或发布信息中, 寻找能够量化的指标, 但并没有此类数据), 因此为保证指标选取一致性, 本文直接选取该四大举措任务数量作为代理变量; ② 每项举措任务数量不同, 执行期限已给出且各有差异, 因此能够有效避免时间序列模型中, 变量过多而容易产生的多重共线性问题; ③ 这种方法还能够进一步简化控制变量数量。倘若根据某项举措每个任务中能够量化的指标来共同度量该举措, 则每项举措将被分解为至少两个变量, 增加模型中解释变量个数, 减少样本自由度。

<sup>1</sup>天气后报网, [www.tianqihoubao.com](http://www.tianqihoubao.com)。

<sup>2</sup>大约为 113 个环境保护重点城市和国家环境保护模范城市正式实行《环境空气质量标准》(GB3095-2012)的日期, 2013 年 10 月 28 日后才能获取 AQI、O<sub>3</sub> 等数据, 故排除网站存在数据缺失的情况。

<sup>3</sup>真气网中国空气质量在线监测分析平台, [www.aqistudy.cn/historydata](http://www.aqistudy.cn/historydata)。



本文最为关注的变量为  $coverage_i$ , 即大气热点网格覆盖率增加值(阶段推进期内不变值)。为保证时间序列数据平稳性, 由大气热点网格覆盖率进行一阶差分得到。将实施网格化治理的区县行政区划面积总和与西安市行政区划总面积相除得到网格覆盖率, 如式(2)。

$$COVERAGE = \frac{\sum area}{XAAREA} \times 100\% \quad (2)$$

其中,  $COVERAGE$  表示总覆盖率,  $XAAREA$  表示西安市行政区划总面积,  $\sum area$  表示执行网格化治理的区县面积总和。如西安市第一个进行网格化治理区县是长安区, 此时  $\sum area$  表示长安区面积,  $COVERAGE$  表示西安市当期网格总覆盖率, 即 15.73%。第二个进行网格化治理的区县是莲湖区, 此时  $\sum area$  表示长安区与莲湖区的面积总和,  $COVERAGE$  为 16.11%。依此类推, 当西安市 13 个区县全部实施网格化治理时,  $\sum area = XAAREA$ ,  $COVERAGE = 100\%$ 。

$coverage_i$  计算公式如下:

$$coverage_i = COVERAGE_i - COVERAGE_{i-1} = \Delta COVERAGE_i \quad (3)$$

$\Delta$  为一阶差分符号。当  $COVERAGE_i$  为 16.11% 时,  $coverage_i = 16.11\% - 15.73\% = 0.38\%$  (阶段推进期内不变值)。各个区县实施网格化治理的时间整理自西安市生态环境局官方网站<sup>4</sup>。

基准模型(1)中主要变量详细操作说明及原始数据来源见表 1。

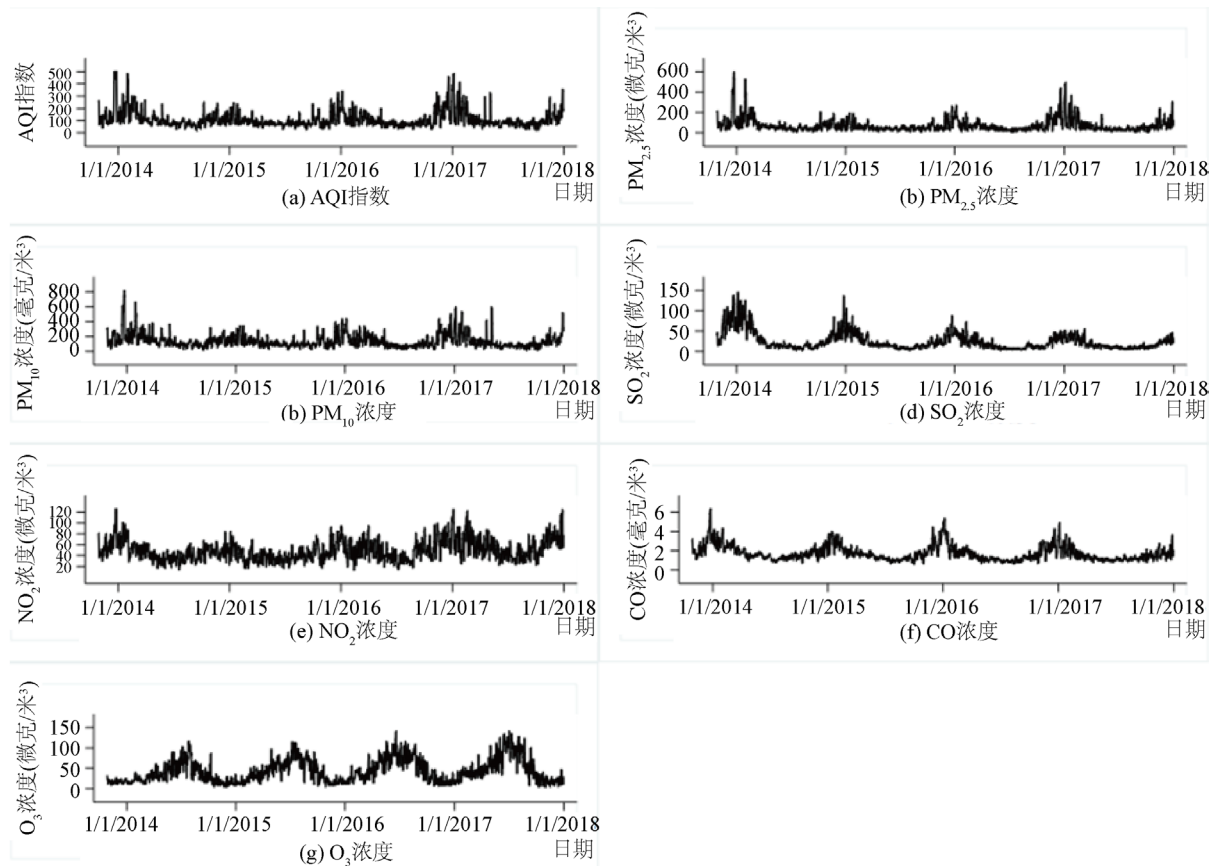
**Table 1.** The data declaration and the descriptive statistics of main variables  
**表 1.** 数据说明与主要变量描述统计

变量符号	变量名称	单位	原始数据来源	样本数	均值	标准差	最小值	最大值
$aqi_i$	AQI	指数		1526	110.10	68.75	19	500
$so_i$	SO <sub>2</sub> 浓度	μg/m <sup>3</sup>	天气后报网、 真气网	1526	24.29	21.17	2	145
$no_i$	NO <sub>2</sub> 浓度	μg/m <sup>3</sup>		1526	49.06	18.73	13	126
$o_i$	O <sub>3</sub> 浓度	μg/m <sup>3</sup>		1526	42.92	28.50	5	141
$coverage_i$	大气热点网格覆盖率增加值	% (阶段推进期内不变值)	西安市生态环境局	1526	12.71	13.25	0	29.18
$industry_i$	规模以上工业增加值	亿元 (月不变价)	西安市统计局	1526	113.45	22.90	82.79	178.11
$coal_i$	“减煤” 其余任务量			1526	4.78	2.09	1	8
$vehicle_i$	“控车” 任务量			1526	12.04	1.51	10	15
$dust_i$	“抑尘” 任务量	个(执行期内不变值)	“保卫蓝天” 工作方案	1526	7.66	2.08	3	11
$VOCs_i$	“治源” 任务量			1526	6.21	2.22	3	11
$burn_i$	“禁燃” 任务量			1526	3.74	0.74	3	5
$green_i$	年末绿化覆盖面积增加值	km <sup>2</sup> (年不变值)	西安市统计年鉴	1526	36.32	27.92	13.51	81.39
$hightemp_i$	最高温	°C		1526	20.08	10.30	-2	42
$lowtemp_i$	最低温	°C		1526	10.69	9.49	-12	29
$windspeed_i$	风速	km/h	天气后报网	1526	15.47	1.99	3	29
$rain_i$	是否有雨	虚拟变量		1526	0.24	0.43	0	1
$snow_i$	是否有雪	虚拟变量		1526	0.02	0.14	0	1
$holiday_i$	节假日虚拟变量	虚拟变量	国务院办公厅	1526	0.08	0.27	0	1
$weekend_i$	双休日虚拟变量	虚拟变量		1526	0.27	0.45	0	1
$month_i$	月份虚拟变量	虚拟变量						

注: 由于 11 个月份虚拟变量过多, 限于篇幅, 省略月份虚拟变量描述统计。

<sup>4</sup> 西安市生态环境局, <http://xaepb.xa.gov.cn/>。

图1 绘制空气质量指数(AQI)以及各类空气污染物浓度时间序列图, 直观看出, 自西安市开始实施大气网格化治理至 2015 年 6 月, AQI、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 等 3 个指标浓度整体显著下降且峰值减少十分明显, 但 2015 年 6 月后峰值显著增加。SO<sub>2</sub> 峰值与谷值呈现逐年下降趋势, 而 NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 则在观测期内呈现上升态势。



数据来源: 天气后报网, 真气网中国空气质量在线监测分析平台。

Figure 1. The time-tendency graph of air quality index and kinds of air pollutions in Xi'an (2013-2017)

图 1. 西安市空气质量指数及各类污染物浓度时间趋势图(2013~2017)

### 3.2. 内生性问题分析及工具变量选取

前文设定基准模型(1)没有充分考虑其可能存在的内生性问题。当西安市处于非冬季供暖期时, 如图 1(a), 空气质量基本全部为优良。但当空气污染严重时, 一方面空气污染影响社会经济活动, 如企业生产活动, 而企业生产活动一旦暂停或放缓, 空气质量又会得到改善; 另一方面, 西安市于冬季供暖期内对企业生产强制实行限产停产政策, 由执行部门对企业强制实施, 进而降低工业增加值, 改善空气质量。因此, 模型(1)存在空气质量与规模以上工业增加值之间双向因果关系(内生性问题), 从而对其余变量(主要为网格化治理变量)参数估计造成影响。

为解决该内生性问题, 需要寻找合适的工具变量(Instrument Variable, IV), 而且该工具变量需要与工业增加值高度相关, 同时与空气质量无关。目前研究空气质量且同时涉及工具变量选取的文献中, 较多的研究视角为空气质量如何对经济发展产生影响, 即寻找空气质量的工具变量来消除空气质量与经济发展之间的内生性问题, 如 Broner *et al.*在研究环境规制对污染产业布局的影响时, 采用通风系数(ventilation

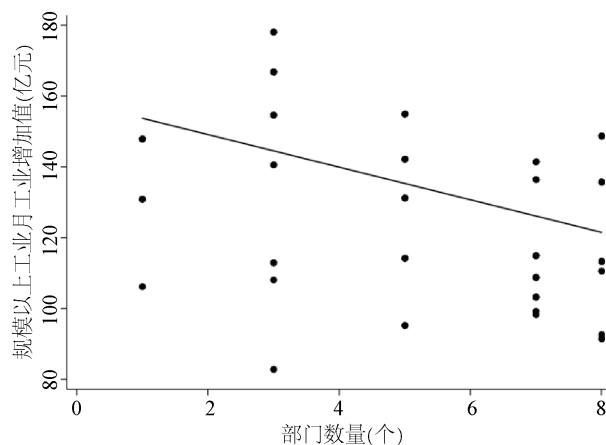
coefficient)作为环境规制的工具变量[16], 因为风速与空气污染物相关得到越来越多的学者证实[17] [18] [19], Broner *et al.*则将风速与大气边界层高度相乘得到通风系数[16]。该工具变量来源于气象条件, 与经济活动没有相关性, 该思路被后来被广泛应用于环境规制对于经济增长影响研究中[20] [21] [22] [23] [24], 还有学者直接使用某一气象条件作为空气污染工具变量, 如逆温层强度[25] [26]。

陈诗一与陈登科在研究政府治理与经济高质量发展时选取工具变量思路同样来源于 Broner *et al.* 设定的通风系数[16] [27]。本文拟研究环境规制对于空气质量影响, 只是在基准回归模型中, 内生变量并非网格化治理, 而是控制变量(规模以上工业增加值), 为解决潜在的内生性问题, 本文需要寻找规模以上工业增加值的工具变量。

陈诗一与陈登科关于内生性问题分析给本文提供选取工具变量思路。他们首先对政府公文进行分词处理, 其次统计与环境相关词汇总字数, 并计算其占政府报告全文比例, 以此作为工具变量, 并且在 Chen *et al.*基础上使用更加丰富的词汇以全面捕捉政府环境治理力度[27] [28]。地方政府工作报告一般发生在年初, 而经济活动则贯穿于一年的始终, 从而可以有效规避“反向因果”所引起的内生性问题[27]。

基于该思路, 本文以执行限产停产部门数量作为工业增加值的工具变量, 因为执部门数量越多, 限产停产措施执行力越强, 规模以上工业增加值降低引致的空气质量改善效果越符合预期。另外, 西安市“治污减霾”方案于年初发布, 意味着执行部门数量在年初已经确定, 而全年空气质量在年初并不能预知, 从而有效避免“反向因果”引起的内生性问题, 缓解模型内生性问题, 增强参数估计效果。

图 2 绘制执行限产停产部门数量与工业增加值散点图以及两者之间拟合直线。可见, 在冬季供暖期与重污染天气情况下, 部门数量与每月规模以上工业增加值显著负相关, 随着部门数量增多, 工业增加值在限产停产期内减少更多。此外, 将部门数量作为工具变量还具有时间异质性优势, 即执行部门仅于冬季供暖期及重污染天气期间内对企业进行规制, 且每年规定执行该规制政策部门数量不同。而非该时期内, 空气质量绝大部分为优良, 政府不会执行限产停产政策, 能够有效避免与其余变量可能产生的多重共线性问题。



数据来源: 西安市统计局(2014年~2018年), 《西安市“治污减霾”工作实施方案》(2013年~2017年)。

**Figure 2.** The number of departments and the industrial added value

**图 2.** 执行限产停产部门数量与工业增加值

结合上述分析, 为定量考察大气网格化治理对空气质量的影响, 同时避免内生性问题, 本文最终在基准回归模型(1)基础上设定如下两阶段最小二乘回归模型(2SLS):

$$industry_t = \epsilon_0 + \epsilon_1 DEP_t + \sum_{i=1}^6 \pi_i X_{it} + \sum_{i=1}^5 \varpi_i Z_{it} + \eta_t + \xi_t + \sum_{i=1}^{11} \varphi_{it} + \sigma_t \quad (4)$$

$$aqi_t = \theta_0 + \theta_1 coverage_t + \theta_2 industry_t + \sum_{i=1}^6 \lambda_i X_{it} + \sum_{i=1}^5 \mu_i Z_{it} + \eta_t + \xi_t + \sum_{i=1}^{11} \varphi_{it} + \phi_t \quad (5)$$

其中,  $DEP_t$  代表执行限产停产部门数量。

## 4. 回归结果分析

### 4.1. 基准回归

表 2 报告基准回归模型(1)参数估计结果。从第 1 列回归结果看来, 在不排除其他环境规制政策影响以及天气、时间效应时, 网格化治理对于空气质量改善效果并不显著。第 3 列回归结果则加入其余环境规制政策作为控制变量, 网格化治理对于空气质量改善效果依旧不显著。第 2 列仅在核心解释变量基础上加入天气效应和时间效应, 参数估计却成为显著正相关, 但该结果同样未排除其余环境规制政策对于空气质量的影响。第 4 列则重新加入其余环境规制政策, 网格化治理系数显著性下降, 但系数绝对值增大。

**Table 2.** The grid management and the air quality: the standard regression

**表 2.** 网格化治理对空气质量影响: 基准回归结果

	被解释变量: AQI				
	全样本			无内生性样本	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
网格化治理	-0.07 (0.14)	0.31*** (0.12)	-0.21 0.21	0.63** (0.25)	0.006 (0.22)
规模以上工业			1.25*** (0.10)	0.34 (0.26)	0.42*** (0.14)
“减煤”			-2.12* (1.20)	-0.39 (1.26)	-2.07* (1.09)
“控车”			-4.54*** (1.97)	0.68 (2.66)	1.53 (1.54)
“抑尘”			3.29 (2.45)	3.68* (0.09)	2.45 (1.60)
“治源”			-3.48 (2.48)	-8.34*** (2.45)	-2.46 (1.87)
“禁燃”			19.44*** (4.86)	14.62** (5.71)	0.54 (0.87)
“增绿”			-0.33*** (0.10)	-0.09 (0.13)	-0.03 (0.09)
时间效应	无	有	无	有	有
天气效应	无	有	无	有	有
样本数	1526	1526	1526	1526	975

注: 回归报告中的小括号内为经异方差与序列相关(newey)调整后的稳健标准误; \*\*、\*和\*分别表示 1%、5%与 10%的显著性水平。资料来源: 作者基于 Stata 软件估计。

基准回归模型显示, 网格化治理并未改善西安市空气质量, 甚至与西安市空气质量指数呈现显著正相关关系, 而该回归结果并未排除潜在的内生性问题。

最后, 第 5 列回归结果剔除限产停产时期内存在内生性问题的样本, 使用 OLS 估计得出, 各项举措



(包括网格化治理)与空气质量指数之间关系均大致表现为不显著。因为该样本内空气质量为中度污染以下,不处于冬季,不存在集中供暖现象,不显著的关系可能来自于天气因素,凭借气象条件能够快速改善空气质量,如雨天、起风等。

### 4.2. 工具变量估计

前文运用普通最小二乘法(OLS)考察大气网格化治理对西安市空气质量影响,并进一步分离无内生性问题样本进行单独回归分析。该小节则采用内生性问题样本(重污染天气及冬季供暖期内样本)数据进行分析,将执行限产停产部门数量作为工具变量,在 2SLS 模型中进一步探究网格化治理与空气质量的关系。

表 3 报告 2SLS 回归结果。

整体而言,表 3 第 3 至 4 列第一阶段回归 F 值大于 10,说明不存在弱工具变量问题,2SLS 估计结果可信。第二阶段回归结果显示,网格化治理并没有显著改善西安市空气质量。

Table 3. The grid management and the air quality: two-stage least square regression

表 3. 网格化治理对空气质量影响: 工具变量估计

	(1)	(2)	(3)	(4)
第一阶段回归	月工业增加值			
执行部门数量	-1.51* (0.91)	-2.13*** (0.65)	-2.76*** (0.31)	-2.67*** (0.32)
第一阶段 F 值	2.40	5.85	73.05	65.96
第二阶段回归	空气质量指数(AQI)			
网格化治理	-1.05 (1.04)	-1.12 (1.23)	1.26 (1.01)	0.12 (1.72)
工业增加值	-2.65 (3.11)	-1.99 (2.06)	-0.69 (1.66)	0.61 (1.09)
“减煤”	-9.44 (9.27)	-7.69 (5.76)	-12.59*** (4.47)	-13.85*** (4.74)
“控车”	-24.70*** (7.21)	-24.39*** (8.44)	-33.66*** (8.43)	-21.07** (9.45)
“抑尘”	32.52*** (10.82)	34.60*** (10.82)	19.11** (8.80)	27.96*** (10.36)
“治源”	-27.71* (16.16)	-31.58** (12.74)	-23.25* (12.57)	-38.48*** (14.41)
“禁燃”	161.74*** (27.42)	162.92*** (28.40)	167.27*** (25.14)	154.91*** (26.12)
“增绿”	0.74 (0.92)	0.66 (0.85)	-0.95 (0.94)	-0.03 (0.83)
时间效应	无	无	有	有
天气效应	无	有	无	有
样本数	551	551	551	551

注: 小括号内为经异方差调整后的稳健标准误; \*\*\*, \*\*和\*分别表示 1%、5%与 10%的显著性水平。资料来源: 作者基于 Stata 软件估计。

### 4.3. 异质性分析

以环保部批评日期(2015 年 12 月 30 日)为时间断点,分别考察时间点前后网格化治理对于空气质量的影响,即时间异质性。更重要的是, AQI 计算方式较为复杂,选择当天浓度最高的空气污染物代表当

天 AQI, 因此 AQI 在不同时期内难免具有结构性差异, 未考虑该差异, 本文进一步进行污染物异质性分析。

为甄别网格化治理对于不同空气污染物产生的影响, 需要进一步对社会各项经济活动产生的空气污染物进行识别。常见各种社会活动产生的大气污染物以及引发的二次污染物整理制成表 4。

空气质量检测部门每日发布 6 类空气污染物浓度, 包括 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、CO、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>, 而网格员能够通过五官感知的空气污染物仅为 NO<sub>2</sub> (红棕色, 工业生产排放时通过视觉可见)、SO<sub>2</sub> (具有刺激性气味, 使用劣质煤碳或者工厂偷排时通过嗅觉可闻)、O<sub>3</sub> (其前体物为挥发性有机物(VOCs)具有刺激性气味, 网格员可通过嗅觉察觉, 因此网格员可通过抑制挥发性有机物污染进一步遏制 O<sub>3</sub> 二次污染)。

污染物异质性分析估计结果为表 5, 分析网格化治理对不同空气污染物治理效果, 表 5 为仅含有内生性问题样本回归报告(冬季供暖时期以及重污染天气样本), 否则不能使用 2SLS 模型进行估计, 表 6 为不含内生性问题样本回归报告(非冬季供暖期与非重污染天气样本)。无论表 5 还是表 6, 第 2 列与第 3 列回归结果表明网格化治理与 SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 显著负相关, 说明网格化治理自实施以来, 通过网格员五官感知精确定位污染源并采取相应治理措施的机制十分有效, 且在 1%显著性水平上显著。

**Table 4.** The ordinary air pollution and secondary pollution  
**表 4.** 常见社会活动产生的大气污染及二次大气污染物

活动类别	大气污染物	二次大气污染物	文献来源
使用普通机动车	CO、NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub> 、PM <sub>2.5</sub>	Clark <i>et al.</i> [29]; Wang <i>et al.</i> [30]; Shen <i>et al.</i> [31]; Chen <i>et al.</i> [32]
使用黄标车	CO、NO <sub>2</sub> 、SO <sub>2</sub> 、PM <sub>10</sub>	O <sub>3</sub> 、PM <sub>2.5</sub>	
工业生产	CO、NO <sub>2</sub> 、SO <sub>2</sub> 、PM <sub>10</sub>	O <sub>3</sub> 、PM <sub>2.5</sub>	Wang <i>et al.</i> [30]; Shen <i>et al.</i> [31]; Chen <i>et al.</i> [32]; 陈国伟等[33]
使用燃煤锅炉	CO、NO <sub>2</sub> 、SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub> 、PM <sub>2.5</sub>	
企业生产产生挥发性有机物	PM <sub>2.5</sub>	O <sub>3</sub>	Peleg <i>et al.</i> [34]
施工扬尘	PM <sub>2.5</sub> 、PM <sub>10</sub>	-	-
生物质燃烧	CO、NO <sub>2</sub> 、SO <sub>2</sub> 、PM <sub>10</sub>	O <sub>3</sub> 、PM <sub>2.5</sub>	陈国伟等[33]; 田贺忠等[35]; Zhou <i>et al.</i> [36]

**Table 5.** The grid management and the air quality: pollution heterogeneity analysis (IV-2SLS)  
**表 5.** 网格化治理对空气质量影响: 污染物异质性分析(内生性样本数据)

	污染物异质性					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
第一阶段回归	工业增加值	工业增加值	工业增加值	工业增加值	工业增加值	工业增加值
执行部门数量	-2.02*** (0.29)	-2.02*** (0.29)	-1.62*** (0.19)	-2.67*** (0.32)	-0.85*** (0.26)	-2.02*** (0.29)
第一阶段 F 值	43.67	48.26	33.05	65.96	10.21	43.67
第二阶段回归	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	CO
网格化治理	0.72*** (0.09)	-0.88*** (0.12)	-0.17** (0.07)	0.11 (0.97)	8.50 (4.85)	-0.007 (0.004)
工业增加值	-0.03 (0.38)	1.09** (0.52)	-0.04 (0.20)	0.09 (1.65)	18.87** (8.84)	0.002 (0.02)
“减煤”	-4.53*** (0.99)	0.33 (1.61)	0.65* (0.39)	-11.37*** (4.40)		-0.08 (0.05)
“控车”	-9.51*** (2.33)	-19.26*** (3.14)	-3.06*** (0.75)	-24.03*** (8.57)	-97.03*** (29.65)	-0.44*** (0.11)

Continued

“抑尘”				28.00*** (9.34)	-48.00* (28.87)	
“治源”			2.91*** (0.78)	-36.67*** (13.55)		
“禁燃”	34.56*** (5.65)	63.31*** (8.02)	4.31** (2.18)	159.98*** (25.69)	189.82*** (54.79)	1.13*** (0.27)
“增绿”	-0.42* (0.24)	-1.39*** (0.32)	-0.09 (0.08)	-0.10 (0.72)	-12.97** (5.38)	-0.02* (0.01)
时间效应	有	有	有	有	有	有
天气效应	有	有	有	有	有	有
样本数	551	551	551	551	551	551

注: 小括号内为经异方差调整后的稳健标准误; \*\*\*, \*\*和\*分别表示 1%、5%与 10%的显著性水平。资料来源: 作者基于 Stata 软件估计。

时间异质性分析, 从表 6 第 7 列回归结果看来, 2015 年 12 月 30 日前网格化治理表现为 1%显著性水平上恶化空气质量, 而环保部批评后(表 6 第 8 列)样本回归结果显示, 网格化治理则在 1%显著性水平上显著改善空气质量。说明受到环保部批评后, 网格化治理在西安市各级政府共同努力下, 发挥了预期效果。

**Table 6.** The grid management and the air quality: heterogeneity analysis (OLS)

**表 6.** 网格化治理对空气质量影响: 异质性分析(无内生性样本数据)

	污染物异质性						时间异质性	
	(1) NO <sub>2</sub>	(2) SO <sub>2</sub>	(3) O <sub>3</sub>	(4) PM <sub>2.5</sub>	(5) PM <sub>10</sub>	(6) CO	(7) AQI (环保部批评前)	(8) AQI (环保部批评后)
网格化治理	0.22*** (0.04)	-0.16*** (0.02)	-0.36*** (0.10)	-0.04 (0.15)	-0.28 (0.34)	-0.006*** (0.001)	1.21*** (0.36)	-1.22*** (0.43)
工业增加值	-0.16** (0.06)	0.12*** (0.02)	-0.12 (0.10)	0.40*** (0.11)	0.93*** (0.26)	0.01*** (0.001)	0.15 (0.46)	-0.13 (0.45)
“减煤”	-0.76** (0.38)	0.12 (0.22)	-0.18 (0.47)	-0.89 (0.93)		0.003 (0.01)	3.14** (1.54)	0.82 (2.76)
“控车”	1.51*** (0.49)	-0.16 (0.24)	-4.44*** (0.67)	2.33* (1.29)	9.84** (1.90)	-0.01 (0.01)	-11.66 (7.26)	2.93 (5.51)
“抑尘”				0.45 (1.35)	-0.11 (1.95)		29.36* (16.82)	4.12 (19.99)
“治源”			3.98*** (0.61)	-0.36 (1.63)			-18.63 (22.48)	1.73 (3.56)
“禁燃”	-3.84*** (1.37)	1.64*** (0.55)	5.13*** (1.69)	-2.18 (2.93)	-3.48 (5.35)	0.09** (0.04)	71.29** (33.94)	3.76 (5.22)
“增绿”	0.19*** (0.03)	-0.05*** (0.01)	0.05 (0.04)	-0.05 (0.77)	-0.33*** (0.11)	-0.003*** (0.001)	-	-
时间效应	有	有	有	有	有	有	有	有
天气效应	有	有	有	有	有	有	有	有
样本数	975	975	975	975	975	975	498	477

注: 小括号内为经异方差与序列相关(newey)调整后的稳健标准误; \*\*\*, \*\*和\*分别表示 1%、5%与 10%的显著性水平。资料来源: 作者基于 Stata 软件估计。

最后本文还更换被解释变量进行反事实检验, 观测网格化治理对于 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 以及 CO 的影响(理论上网格化治理对于此三类污染物应该不具有治理效果)。同样, 无论样本数据是否内生(表 5 以及表 6 的第 4 与第 5 列), 网格化治理对于 PM<sub>2.5</sub> 以及 PM<sub>10</sub> 的治理效果完全不显著, 符合理论预期, 说明网格化治理规制效果并非偶然, 具有预期的规制效果, 能够成为西安市治污减霾的长效机制。而对于 CO, 表 5 第 6 列回归结果并不显著, 而表 6 第 6 列回归结果为显著负相关, 且在量纲上显著影响 CO 排放, 主要原因为冬季供暖期强制使用天然气供暖, 而天然气不完全燃烧会产生 CO, 削弱网格化治理对 CO 的规制效果, 因此表现为非冬季供暖期显著为负, 而冬季供暖期不显著, 另一方面, 非冬季供暖期显著为负的原因为, CO 作为工业生产的副产物, 随着 SO<sub>2</sub> 一起排放, 而网格化治理通过治理 SO<sub>2</sub>, 进而附带治理 CO, 因此表现为显著为负。

#### 4.4. 内生性及工具变量检验

理论上 AQI 与工业增加值存在内生性, 从而导致网格化治理参数估计存在一定偏误。由表 4 可知, 工业生产能够产生 6 类空气污染物, 进而说明西安市处于冬季供暖以及重污染天气期间进行限产停产规制时, 该 6 类空气污染物与工业增加值同样可能存在内生性问题。因此, 对该假设进行弱工具变量检验以及内生性假设检验(豪斯曼检验以及进一步在异方差情况下的杜宾吴-豪斯曼检验, DWH-test)十分必要, 能够进一步增强本文实证结果可信度。两种检验结果如表 7 所示。

Table 7. The weak instrumental variable test and the endogenous hypothesis test

表 7. 弱工具变量检验与内生性假设检验

被解释变量	弱工具变量检验		内生性假设检验	
	第一阶段 F 值	豪斯曼检验 p 值 (Hausman-test, P value)	杜宾 - 吴 - 豪斯曼检验(DWH-test) $\chi^2/F$ 统计量(p 值)	
AQI	65.96	0.89	0.0193/0.0184 (0.8895/0.8920)	
NO <sub>2</sub>	43.67	0.46	0.5776/0.5540 (0.4473/0.4570)	
SO <sub>2</sub>	48.26	0.00	25.7004/25.8325 (0.0000/0.0000)	
O <sub>3</sub>	33.05	0.84	0.0398/0.0380 (0.8419/0.8454)	
PM <sub>2.5</sub>	65.96	0.99	0.000017/0.000016 (0.9967/0.9968)	
PM <sub>10</sub>	10.21	-0.00		
CO	43.67	0.75	0.1045/0.1001 (0.7465/0.7518)	

注: -0.00 表明进行豪斯曼检验的两个被比较的回归结果系数无显著差异的原假设不能被拒绝, 即对于 PM<sub>10</sub> 来说, 工业增加值为外生变量。  
资料来源: 作者基于 Stata 软件估计。

由表 7 检验结果, 处于冬季供暖期与重污染天气样本, 仅被解释变量为 SO<sub>2</sub> 时拒绝“所有变量均为外生”的原假设, 即对于 SO<sub>2</sub> 来说工业增加值为内生变量。此外, “部门数量”均通过弱工具变量检验(F 值均大于 10)。虽然仅有 SO<sub>2</sub> 与工业增加值存在双向因果关系, 但对于其余 6 个被解释变量中的工业增加值使用两阶段最小二乘法进行回归分析, 均不会影响其参数估计一致性, 结果仍与 OLS 回归结果一致。

表 3 第 4 列以及表 6 第 8 列回归结果进一步说明, 处于冬季与非冬季不同时间段内, 西安市空气污

染存在结构性变化, 即假定该政策作用机制不变, 非冬季供暖期内, 网格化治理能够显著降低 AQI, 而处于冬季供暖期内, 网格化治理虽然能够改善 SO<sub>2</sub> 与 O<sub>3</sub> 污染, 但并未显著降低 AQI。原因为, 冬季供暖期内, AQI 主要影响因素并非来自于工业污染产生的 SO<sub>2</sub>, 否则 AQI 也将与工业增加值之间存在双向因果关系。进一步表明, 该时期内空气污染来源并非网格化治理可控, 可能更多来源于如冬季的集中供暖, 或是邻近省市污染物跨域传输。假设没有此类因素影响, 网格化治理处于冬季供暖期的治理机制应与处于非冬季供暖期相同, 均能够显著降低 AQI, 进而改善整体空气质量。综合考虑, 网格化治理发挥了预期的治理作用, 只是由于冬季西安市空气污染物的季节性、结构性变化, 导致网格化治理对 AQI 的影响减弱, 甚至变成不显著。

#### 4.5. 模型设定敏感性分析

对 AQI、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 与工业增加值取对数, 采用对数模型进行实证分析, 以考察回归结果对模型设定的敏感性, 如表 8 所示, 回归结果与表 6 相同, 依然显著。大气网格化治理对 SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 显著负相关, 进一步证实网格员通过五官感知, 发现污染源进行治理的机制有效。而 NO<sub>2</sub> 与网格化治理显著正相关是因为随着“煤改气”推进, 使得氮氧化物污染不可避免地增加。

**Table 8.** The grid management and the air quality: the sensibility analysis (OLS)

**表 8.** 网格化治理与空气质量: 敏感性分析(不含内生性样本)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	污染物异质性			时间异质性分析	
	Ln.NO <sub>2</sub>	Ln.SO <sub>2</sub>	Ln.O <sub>3</sub>	Ln.AQI (环保部批评前)	Ln.AQI (环保部批评后)
Ln.网格化治理	0.03*** (0.009)	-0.09*** (0.01)	-0.04** (0.02)	0.05*** (0.02)	-0.14*** (0.05)
Ln.工业增加值	-0.49*** (0.16)	1.04*** (0.18)	-0.24 (0.21)	0.60 (0.74)	0.10 (0.64)
Ln.“减煤”	-0.03 (0.03)	-0.03 (0.05)	-0.07 (0.05)	0.15** (0.07)	0.07 (0.09)
Ln.“控车”	0.67*** (0.19)	-0.34 (0.22)	-1.28*** (0.36)	-1.58 (2.66)	0.99 (0.76)
Ln.“抑尘”				-	1.53 (1.93)
Ln.“治源”			0.39*** (0.07)	2.81 (3.43)	0.10 (0.26)
Ln.“禁燃”	-0.26** (0.13)	0.21 (0.15)	0.33 (0.22)	-	0.14 (0.27)
Ln.“增绿”	0.16*** (0.03)	-0.06* (0.03)	0.04 (0.04)	-	-
时间效应	有	有	有	有	有
天气效应	有	有	有	有	有
样本数	923	923	923	446	477

注: 小括号内为经异方差与序列相关(newey)调整后的稳健标准误; \*\*\*, \*\*和\*分别表示 1%、5%与 10%的显著性水平。资料来源: 作者基于 Stata 软件估计。

## 5. 结论及政策建议

西安市为全国大气污染较为严重的城市, 其严重的大气污染将长期影响整个城市经济活动。2013 年,



西安市开始逐渐扩大环保财政支出, 攻打蓝天保卫战, 并于 2014 年正式实施大气网格化治理。作为全国首批提出并率先实施大气网格化治理的城市, 该政策能否改善空气质量, 现有文献尚缺乏足够的实证证据与结论。

从本文实证结果中得出结论, 网格化治理具有显著治理成效。进一步分析网格化治理的污染物异质性和时间异质性: 正如环保部所言, 西安市网格化治理于环保部点名前期确实存在一定问题, 其原因可能为网格化治理作为创新性的大气污染治理模式(无管理经验可循), 初步探索阶段可能存在网格员缺乏工作经验、管理不当甚至是郊区网格化管理落实困难等问题, 但经环保部批评后, 西安市政府加强对网格化治理监督管理力度与对网格员的培训力度, 全方位提升网格化管理水平, 进而使得网格化治理在非冬季供暖期与非重污染天气时期内显著改善西安市整体空气质量。与之相反, 虽然冬季供暖期内网格化治理不能显著改善西安市整体空气质量, 但却依然能够显著治理  $\text{SO}_2$  与  $\text{O}_3$  污染, 只是由于“煤改气”的实施,  $\text{NO}_2$  污染不可避免地增加。本文进一步发现, 西安市不同时期的空气污染物存在季节性、结构性变化, 相比于非冬季而言, 冬季氮氧化物(包括  $\text{NO}_2$  在内)污染显著增加。

虽然网格化治理发挥显著治理作用, 但西安市近几年空气优良天数相比于治理初期(2013 至 2015 年)却有所减少, 冬季极端天气现象依然存在。大气污染是一个相对复杂的问题, 具有跨域传输特性。因此, 西安市仍然存在的极端天气现象的原因可能来自人为不可控的外部因素, 如地理因素, 相邻省市的空气污染物跨域传输至西安市境内, 或是来自于不可避免的社会活动, 如西安市人口逐渐增长, 冬季供暖能源消耗增大。

对于本文实证研究结果, 为西安市治污减霾提出相应政策建议:

- ① 进一步加强非冬季煤炭市场以及企业能源使用情况监管, 以进一步减少非冬季供暖期内 CO 污染;
- ② 进一步采取针对性防治措施。对西安市空气污染存在的结构性变化以及冬季极端天气现象问题采取更具有针对性的治理措施, 如提升集中供暖能源使用效率, 或与邻近省市之间制定生态补偿机制;
- ③ 进一步推动关中平原城市群乃至汾渭平原形成协同治理格局。2018 年汾渭平原被列为我国雾霾污染防治主战场, 而西安市作为汾渭平原雾霾治理成效最显著的城市, 需要发挥其雾霾治理模范作用, 在汾渭平原内形成协同治理格局并发挥政策合力, 最大化减少大气污染外溢产生的负外部性。

## 基金项目

本文系国家自然科学基金研究项目“建立健全政府、企业、公众共治的环境治理体系研究”项目(批准号: 18BJY092)、陕西省科技厅重点项目“推进关中平原城市群治污减霾综合防控联动机制创新研究”(批准号: 2019KRZ011)的阶段性研究成果。

## 参考文献

- [1] 王书斌, 徐盈之. 环境规制与雾霾脱钩效应——基于企业投资偏好的视角[J]. 中国工业经济, 2015(4): 18-30.
- [2] 祁毓, 卢洪友, 张宁川. 环境规制能实现“降污”和“增效”的双赢吗——来自环保重点城市“达标”与“非达标”准实验的证据[J]. 财贸经济, 2016(9): 126-143.
- [3] 张同斌. 提高环境规制强度能否“利当前”并“惠长远”[J]. 财贸经济, 2017, 38(3): 116-130.
- [4] 孙坤鑫, 钟茂初. 环境规制、产业结构优化与城市空气质量[J]. 中南财经政法大学学报, 2017(6): 63-72 + 159.
- [5] 朱向东, 贺灿飞, 李茜, 毛熙彦. 地方政府竞争、环境规制与中国城市空气污染[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(6): 103-110.
- [6] Davis, L. W. (2008) The Effect of Driving Restrictions on Air Quality in Mexico City. *Journal of Political Economy*, 116, 38-81. <https://doi.org/10.1086/529398>
- [7] 曹静, 王鑫, 钟笑寒. 限行政策是否改善了北京市的空气质量[J]. 经济学(季刊), 2014, 13(3): 1091-1126.

- [8] Viard, V.B. and Fu, S. (2015) The Effect of Beijing's Driving Restrictions on Pollution and Economic Activity. *Journal of Public Economics*, **125**, 98-115. <https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2015.02.003>
- [9] 梁若冰, 席鹏辉. 轨道交通对空气污染的异质性影响——基于 RDID 方法的经验研究[J]. 中国工业经济, 2016(3): 83-98.
- [10] Gendron-Carrier, N., Gonzalez-Navarro, M., Polloni, S. and Turner, M.A. (2017) Subways and Urban Air Pollution. NBER Working Paper, No. C-89337-CCP-1. <https://doi.org/10.3386/w24183>
- [11] 汤韵, 梁若冰. 能源替代政策能否改善空气质量——兼论能源定价机制的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(6): 80-92.
- [12] 郭俊杰, 方颖, 杨阳. 排污费征收标准改革是否促进了中国工业二氧化硫减排[J]. 世界经济, 2019, 42(1): 121-144.
- [13] 刘张立, 吴建南. 中央环保督察改善空气质量了吗?——基于双重差分模型的实证研究[J]. 公共行政评论, 2019, 12(2): 23-42 + 193-194.
- [14] Yang, D.M. and Wu, W.Z. (2020) Grid Management and Air Quality of Xi'an City. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **432**, Article ID: 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/432/1/012012>
- [15] 董会忠, 綦振法, 史成东. 山东省工业总产值与能源消耗量的协整关系[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(11): 56-60.
- [16] Broner, F., Bustos, P. and Carvalho, V.M. (2012) Sources of Comparative Advantage in Polluting Industries (with Appendix). NBER Working Paper, No. 18337. <https://doi.org/10.3386/w18337>
- [17] Cogliani, E. (2001) Air Pollution Forecast in Cities by an Air Pollution Index Highly Correlated with Meteorological Variables. *Atmospheric Environment*, **35**, 2871-2877. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00071-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00071-1)
- [18] Zhao, L., Chen, C., Wang, P., et al. (2015) Influence of Atmospheric Fine Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>) Pollution on Indoor Environment during Winter in Beijing. *Building and Environment*, **87**, 283-291. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.008>
- [19] Zhang, B., Jiao, L.M., Xu, G., et al. (2018) Influences of Wind and Precipitation on Different-Sized Particulate Matter Concentrations (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5-10</sub>). *Meteorology and Atmospheric Physics*, **130**, 383-392. <https://doi.org/10.1007/s00703-017-0526-9>
- [20] Hering, L. and Poncet, S. (2014) Environmental Policy and Exports: Evidence from Chinese Cities. *Journal of Environmental Economics and Management*, **68**, 296-318. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2014.06.005>
- [21] Yi, L., Wu, M.Q. and Yu, L.H. (2016) Does Environmental Regulation Drive Away Inbound Foreign Direct Investment? Evidence from a Quasi-Natural Experiment in China. *Journal of Development Economics*, **123**, 73-85. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2016.08.003>
- [22] 李超, 李涵. 空气污染对企业库存的影响——基于我国制造业企业数据的实证研究[J]. 管理世界, 2017(8): 95-105.
- [23] Shi, X.Z. and Xu, Z.F. (2018) Environmental Regulation and Firm Exports: Evidence from the Eleventh Five-Year Plan in China. *Journal of Environmental Economics and Management*, **89**, 187-200. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2018.03.003>
- [24] 李明, 张亦然. 空气污染的移民效应——基于来华留学生高校-城市选择的研究[J]. 经济研究, 2019, 54(6): 168-182.
- [25] Arceo-Gomez, E.O., Hanna, R. and Oliva, P. (2012) Does the Effect of Pollution on Infant Mortality Differ between Developing and Developed Countries? Evidence from Mexico City. NBER Working Paper, No. 18349. <https://doi.org/10.3386/w18349>
- [26] Chen, S., Oliva, P. and Zhang, P. (2017) The Effect of Air Pollution on Migration: Evidence from China. NBER Working Paper, No. 24036. <https://doi.org/10.3386/w24036>
- [27] 陈诗一, 陈登科. 雾霾污染、政府治理与经济高质量发展[J]. 经济研究, 2018, 53(2): 20-34.
- [28] Chen, Z., Kahn, M.E., Liu, Y. and Wang, Z. (2018) The Consequences of Spatially Differentiated Water Pollution Regulation in China. *Journal of Environmental Economics and Management*, **88**, 468-485. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2018.01.010>
- [29] Clark, N.N., Jarrett, R.P. and Atkinson, C.M. (1999) Field Measurements of Particulate Matter Emissions, Carbon Monoxide, and Exhaust Opacity from Heavy-Duty Diesel Vehicles. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **49**, 76-84. <https://doi.org/10.1080/10473289.1999.10463880>
- [30] Wang, J.L., Wang, C., Lai, C., et al. (2008) Characterization of Ozone Precursors in the Pearl River Delta by Time Series Observation of Non-Methane Hydrocarbons. *Atmospheric Environment*, **42**, 6233-6246. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.01.050>

- [31] Shen, X.B., Yao, Z.L., Zhang, Q., *et al.* (2015) Development of Database of Real-World Diesel Vehicle Emission Factors for China. *Journal of Environmental Sciences*, **31**, 209-220. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.10.021>
- [32] Chen, T.F., Chang, K.H. and Tsai, C.Y. (2017) Modeling Approach for Emissions Reduction of Primary PM<sub>2.5</sub>, and Secondary PM<sub>2.5</sub>, Precursors to Achieve the Air Quality Target. *Atmospheric Research*, **192**, 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.03.018>
- [33] 陈国伟, 单明, 李佳蓉, 蒋建云, 叶建东, 杨旭东. 北京农村地区燃煤污染物的排放测试[J]. 环境工程学报, 2018, 12(2): 597-603.
- [34] Peleg, M., Luria, M., Sharf, G. and Vanger, A. (1997) Observational Evidence of an Ozone Episode over the Greater Athens Area. *Atmospheric Environment*, **31**, 3969-3983. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00251-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00251-3)
- [35] 田贺忠, 赵丹, 王艳. 中国生物质燃烧大气污染物排放清单[J]. 环境科学学报, 2011, 31(2): 349-357.
- [36] Zhou, Y., Xing, X.F., Lang, J.L., *et al.* (2017) A Comprehensive Biomass Burning Emission Inventory with High Spatial and Temporal Resolution in China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **17**, 2839-2864. <https://doi.org/10.5194/acp-17-2839-2017>