

# 多种环境规制工具对空气污染的异质性影响

——基于地理探测器分析

王婷伟, 吕 晨

(中国科学院大学公共政策与管理学院, 北京 100190)

**摘要:** 基于 2008—2018 年中国 105 个环保重点城市数据, 采用固定效应模型和地理探测器, 探讨环境规制对城市空气质量的影响。研究发现, 命令控制型环境规制在特定情境下有效, 经济激励型规制持续有效且能显著减少空气污染, 自愿型规制在 2018 年显著影响空气质量。此外, 经济激励型与自愿型规制的交互作用对改善空气质量越来越重要。建议加强经济激励措施, 提升公众环保意识, 并制定适应地区特性的环境政策, 以促进环境质量提升和可持续发展。

**关键词:** 环境规制; 空气污染; 地理探测器

**中图分类号:** F062.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)17-0001-06

城市化与工业化的快速发展带来了 PM<sub>2.5</sub> 污染问题的加剧。2023 年数据显示, 全国 339 个地级及以上城市的 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 浓度均值分别为 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  和 53  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ <sup>[1]</sup>。这一现象对居民健康和生态平衡构成了严重威胁。为应对挑战, 生态文明建设被提升至国家战略层面, 一系列环境规制措施被实施以寻求经济转型与环境可持续性之间的平衡。环境规制的实施效果在不同地区表现出显著的空间异质性, 这种差异性与地区间的经济水平、地理位置、产业结构等因素有关, 同时也受到环境资源的外部性和非排他性的影响。地方政府在空气污染治理上的态度和行动力度的差异导致了政策执行的不一致性。在此背景下, 探讨不同环境规制工具对城市空气污染治理效果的空间异质性及其内在机制, 对于提供政策制定的科学依据具有重要意义。

## 1 文献综述

根据强制性和激励机制的不同, 环境规制政策通常分为命令控制型、经济激励型与自愿参与型。命令控制型环境规制通过法律或行政手段设定强制性的污染减排目标, 如排放标准和治污设施的规定<sup>[2]</sup>。尽管社会对此类环境规制的需求不

可或缺, 但其执行过程伴随着高昂的成本。汤韵和梁若冰<sup>[3]</sup>对“两控区”的研究发现酸雨控制区的减排效果不佳且成本较高。经济激励型环境规制则通过税收优惠、排污权交易等市场机制来激励企业减少污染<sup>[4]</sup>。同时基于市场手段的环境规制往往被认为优于老一代的命令控制型的环境规制, 如彭星和李斌<sup>[5]</sup>探究命令控制型和经济激励型环境规制对工业绿色转型的影响, 结果发现市场激励型环境规制对绿色技术创新的促进作用更为明显。

不同于命令控制型和经济激励型的执行主体为政府, 自愿参与型环境规制依赖于企业的自主行动和公众参与, 如生态标签和行业自主减排协议<sup>[6-7]</sup>。其中, 环境信息公开是中国政府推进环境治理的又一重要举措, 也是一种具有代表性的自愿型环境监管的手段<sup>[8-9]</sup>。由于环境信息公开在削弱信息不对称、保障公众知情权、参与权和监督环境保护方面的优势, 近年来逐渐被普及<sup>[10]</sup>。尽管环境规制在理论上被认为能够有效减少污染物排放, 改善空气质量, 但实证研究揭示了其效果的复杂性和区域差异性。例如, 石光等<sup>[11]</sup>发现环境规制的效果受到地区经济发展水平的影响; 包群等<sup>[12]</sup>认为一定程

**收稿日期:** 2024-03-18

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(41671124); 北京市社会科学基金一般项目(22SRB005); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(E2E42110X2)

**作者简介:** 王婷伟(1999—), 女, 河北张家口人, 硕士研究生, 研究方向为区域发展与环境治理; 吕晨(1982—), 女, 黑龙江勃利人, 博士, 副教授, 研究方向为区域发展与区域规划。

度的执行力度是该地区环境规制减排效果增强的关键因素。此外,环境信息公开作为一种新兴的自愿型环境监管手段,其对污染减轻的效果也存在争议<sup>[6]</sup>。

针对空气污染治理,目前大多数研究集中在空气污染,尤其是PM<sub>2.5</sub>的形成根源与治理机制<sup>[13]</sup>。其中,Dong等<sup>[14]</sup>针对雾霾污染的时空异质性特征,采用时空加权回归模型对中国雾霾污染变化的局部时空特征进行了研究,发现11个影响因素对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响存在区域差异,环境调控仅在东部和中部地区有效。空气污染另一被关注的重点是其空间特征,主要研究集中在空间溢出效应,即空气污染物可以从污染源运动扩散到其他空间单元并产生影响,表现为本地空气质量也会受到其他城市空气污染的溢出效应影响。许多学者就此视角切入,通过构建空间计量模型,来分析环境规制对空气污染的治理效果<sup>[15-16]</sup>。然而,目前环境规制的空间异质性研究较少。最近,地理探测器方法的引入为分析环境规制与空气污染间关系提供了一种新的视角。田娟娟和张金锁<sup>[17]</sup>利用地理探测器方法探究了中国碳排放的时空分布特征及其驱动因素,研究发现,经济发展、环境规制和固定资产投资是影响碳排放空间分异的主要因素。此外,研究还揭示了在碳排放的空间分布中,不同因素之间存在交互作用,并且这些交互作用往往导致非线性增强效果。这表明地理探测器在揭示环境规制效果的空间差异性和多因素交互作用方面具有独特的优势。

综上,现有研究在环境规制的类别、效果、测度方法等方面取得了一定的成果,但仍存在不足。例如,如何准确反映环境规制的整体效果,以及如何考虑环境规制的空间异质性,仍然是未来研究需要解决的问题。本文在现有研究的基础上,以中国2008—2018年105个环保重点城市为研究对象,从空间异质性视角切入,通过固定效应模型分析3种类型环境规制政策对空气污染的全局影响,并且运用地理探测器分析环境规制政策对政策作用地区空气污染的单一与交互异质性影响。

## 2 研究设计

### 2.1 变量选择

#### 2.1.1 被解释变量

被解释变量为空气污染(PM<sub>2.5</sub>)。由于PM<sub>2.5</sub>是空气中雾霾污染的主要成分,选择PM<sub>2.5</sub>浓度作为雾霾污染的替代指标<sup>[13]</sup>。

#### 2.1.2 解释变量

(1)命令控制型环境规制(ER)。命令控制型环境规制是中国最早、应用最广泛的环境监管工具。其优点在于其强制性和及时性,可以直接控制环境污染并取得立竿见影的效果;其缺点在于缺乏灵活性,如技术先进企业在制定环境技术标准时缺乏激励作用,加剧了技术落后企业的处境。参考李树和翁卫国<sup>[18]</sup>的做法,使用地方当局发布的环保规章数量来衡量命令控制的环境法规工具的强度。由于环保规章只有省级数据,并且理论上第二产业占比越高的城市,污染情况更加严重,会增加环保规章进行治理,本文将环保规章数量与地级市产业结构的乘积作为命令控制型环境规制的代理变量。

(2)经济激励型环境规制(EI)。基于市场激励的环境调控工具,在促进行政干预的同时,能够有效平衡市场监管的积极因素,充分发挥其对环境的正向促进和抑制作用,更好地协调经济发展和环境保护问题。在构建基于经济激励的环境监管工具的代理变量方面,现有研究主要采用排污费、各类环境费、污染治理投入等综合指标法<sup>[5]</sup>。本文借鉴张平等<sup>[19]</sup>的研究,选择节能环保支出作为经济激励环境监管工具的代理变量。

(3)环境信息公开(PITI)。使用污染源监管信息公开指数(PITI)作为自愿型环境规制的解释变量<sup>[20]</sup>。自2008年起,PITI由公共环境研究中心(IPE)与自然资源保护协会(NRDC)联合发布,对中国113个城市污染源信息公开水平进行评价,并获取污染源信息披露指标。

#### 2.1.3 控制变量

考虑到可拓展的随机性的环境影响评估(stochastic impacts by regression on population, affluence, and technology, STIRPAT)模型<sup>[21]</sup>和环境库兹涅茨曲线(environmental Kuznets curve, EKC)假说是研究环境污染影响因素的基本理论框架<sup>[13]</sup>,将两者结合起来选择空气污染控制因子。

STIRPAT模型如下:

$$I_{it} = \beta_0 + \beta_1 P_{it} + \beta_2 A_{it} + \beta_3 T_{it} + e_{it} \quad (1)$$

式中: $I$ 为PM<sub>2.5</sub>浓度;参考已有研究<sup>[21-23]</sup>, $P$ 、 $A$ 、 $T$ 分别表示人口规模、人均财富、技术水平; $e$ 为误差项; $\beta_0$ 为常数项; $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 为回归系数。影响因素为总人口(TP)、城镇化率(UR)、人均GDP(PGDP)、产业结构(IS)以及外商直接投资(FDI)。

### 2.2 数据来源与变量描述性统计

选用2008—2018年中国生态环境部遴选的

105 个重点环保城市<sup>①</sup>数据所构成的面板数据,分析环境规制对城市空气污染的影响效应。其中,PM<sub>2.5</sub>数据来自达尔豪斯大学大气成分分析小组。有关 105 个环保重点城市的环保规章数量和节能环保支出数据,均收集自《中国环境统计年鉴》。PITI 数据直接来源于公共环境研究中心(IPE)与自然资源保护协会(NRDC)共同发布的 2018—2019 年度污染源监管信息公开指数报告,此报告从 NRDC 的官方网站获得。控制变量数据来源于《中国城市统计年鉴》和各省市区统计年鉴。每个变量的统计描述见表 1,所有数据结果均通过 StataMP 17 计量软件分析得到。

### 2.3 研究方法

#### 2.3.1 固定效应模型

结合固定效应模型和地理探测器分析环境规制对空气污染的影响及其空间异质性。固定效应模型如下:

$$PM_{2.5\ it} = \alpha_0 + \alpha_1 ER_{it} + \alpha_2 EI_{it} + \alpha_3 PITI_{it} + \beta control_{it} + \lambda_i + \gamma_t + \mu_{it} \quad (2)$$

式中:  $\alpha_0$  为常数项;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  分别为命令控制型、经济激励型和自愿型环境规制的回归系数;  $\beta$  为控制变量的回归系数;  $\lambda_i$  为个体固定效应;  $\gamma_t$  为时间固定效应;  $\mu_{it}$  为随机扰动项。

#### 2.3.2 地理探测器

地理探测器是基于地理空间数据的统计分析工具,能有效揭示变量间的空间分布模式及其相互作用,特别适用于探究复杂的环境规制与空气污染之间的关系及其在不同地理位置的差异<sup>[24-25]</sup>。其基本原理如下。

(1)因子探测器(factor detector)。此探测器用于评估单个因素如何影响目标变量的空间分异,计

算公式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N^2 \sigma^2} L N_h \sigma^2 \quad (3)$$

式中:  $L$  为层级数目;  $N_h$  和  $N$  分别为第  $h$  层的样本数和总样本数;  $\sigma_h^2$  为第  $h$  层的方差;  $\sigma^2$  为总方差。 $q$  值范围为 0~1,值越大表示因素对空间分异的解释能力越强。

(2)交互作用探测器(interaction detector)。用于探测两个因子对目标变量空间分异的交互影响。如果两个因子的交互作用使得目标变量的空间分异更加显著,则表明它们之间存在协同效应。

以中国 105 个环保重点城市为样本,综合运用上述地理探测器方法,分析环境规制对 PM<sub>2.5</sub> 空气污染物的治理效果。通过因子探测器,可以识别对空气质量影响最大的环境规制因素;通过交互作用探测器,可以探究不同环境规制工具之间的相互作用及其对空气污染的综合影响;最终通过地理探测器分析,旨在提出更为精准有效的空气污染治理策略。

### 3 实证分析

#### 3.1 固定效应与因子探测结果

通过 Stata 进行固定效应回归,并进一步通过 R 语言实现最优参数地理探测器,结果见表 2。通过地理探测器的分析发现,命令控制型环境规制(ER)在 2013 年对空气质量有显著影响。这一发现表明,在某些时期或地区,命令控制型环境规制可能通过严格的污染排放标准和监管措施有效地促进了空气质量的改进。对比固定效应模型中不显著的结果,表明命令控制型环境规制工具执行效果存在的时间和地区异质性。对于经济激励型环境规

表 1 变量描述性统计

| 变量                | 定义                    | 单位                | 样本数   | 均值      | 标准差     | 最小值    | 最大值       |
|-------------------|-----------------------|-------------------|-------|---------|---------|--------|-----------|
| PM <sub>2.5</sub> | PM <sub>2.5</sub> 浓度  | μg/m <sup>3</sup> | 1 155 | 46.049  | 17.921  | 9.016  | 102.159   |
| ER                | 地方颁布环保规章数_各省×第二产业贡献份额 | 份                 | 1 155 | 0.426   | 0.929   | 0.000  | 7.824     |
| EI                | 地方节能环保支出/GDP          | %                 | 1 155 | 0.493   | 0.527   | 0.034  | 5.896     |
| PITI              | 城市污染源监管信息公开指数         | 分                 | 1 155 | 44.053  | 16.997  | 8.300  | 85.300    |
| TP                | 总人口数                  | 万人                | 1 155 | 552.802 | 392.967 | 74.000 | 3 404.000 |
| UR                | 城镇化率                  | %                 | 1 155 | 61.500  | 14.483  | 31.000 | 100.000   |
| PGDP              | 人均 GDP                | 万元                | 1 155 | 6.420   | 3.884   | 0.955  | 46.775    |
| IS                | 第二产业对 GDP 占比          | %                 | 1 155 | 49.560  | 9.584   | 15.710 | 85.080    |
| FDI               | 外商直接投资额               | 万美元               | 1 155 | 184 000 | 302 000 | 34     | 3 100 000 |

① 事实上,全国已有超过 113 个城市入选重点环保城市。然而,在过去 20 年中,这些城市的名单曾多次调整。在《中国城市统计年鉴》与《中国环境统计年鉴》中,部分城市的相关变量数据没有公开,因此本文选取数据公开且连续的 105 个环保重点城市作为样本。

制(EI),虽然在整个时间段内其对空气质量的影响不是最为显著,但在 2008 年具有一定的影响。这可能表明由于其直接针对企业的经济利益,因而在短期内即显示出对空气质量的显著改善;但随着时间推移,这种影响可能由于激励不足、执行力度不够等因素而减弱。自愿型环境规制(PITI)的影响力在 2008—2018 年内逐渐增强,说明随着社会整体环保意识提高和技术的发展,其长期效果逐渐显

现,成为改善空气质量的有效手段之一。

3.2 交互作用探测

表 3 展示了地理探测器中交互作用探测的结果。在整个研究期间,经济激励型环境规制(EI)与自愿型环境规制(PITI)之间的交互作用显示出增强的趋势,表明当同时采取经济激励措施和鼓励自愿行为时,两者的组合对减少 PM<sub>2.5</sub> 浓度具有协同效果。这可能是因为经济激励能够提供财务支持和

表 2 2008—2018 年环保重点城市空气污染驱动因子探测结果

| 因子   | (1)         | (2)         |    | (3)      |    | (4)      |    | (5)      |    |
|------|-------------|-------------|----|----------|----|----------|----|----------|----|
|      | 2008—2018 年 | 2008—2018 年 |    | 2008 年   |    | 2013 年   |    | 2018 年   |    |
|      | FE          | <i>q</i>    | 排序 | <i>q</i> | 排序 | <i>q</i> | 排序 | <i>q</i> | 排序 |
| ER   | -0.056      | 0.024       | 8  | 0.095    | 7  | 0.359*** | 1  | 0.173    | 3  |
| EI   | -0.446      | 0.054***    | 5  | 0.107*   | 3  | 0.116    | 7  | 0.088    | 6  |
| PITI | -0.090***   | 0.038***    | 6  | 0.130    | 5  | 0.145    | 3  | 0.172**  | 4  |
| TP   | -0.018***   | 0.193***    | 1  | 0.197**  | 1  | 0.270*** | 2  | 0.209    | 1  |
| UR   | -0.312***   | 0.110***    | 2  | 0.195**  | 2  | 0.132    | 4  | 0.079    | 8  |
| PGDP | -0.551***   | 0.068***    | 4  | 0.110    | 6  | 0.125    | 5  | 0.087    | 7  |
| IS   | 0.464***    | 0.095***    | 3  | 0.170    | 4  | 0.124    | 6  | 0.175*   | 2  |
| FDI  | 0.000       | 0.033***    | 7  | 0.083    | 8  | 0.089    | 8  | 0.143*   | 5  |

注：\*、\*\*、\*\*\*分别表示  $P<0.1$ 、 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 。

表 3 2008—2018 年环保重点城市空气污染驱动因子交互作用探测结果

| 因子交互        | 2008—2018 年 |    | 2008 年   |    | 2013 年   |    | 2018 年   |    |
|-------------|-------------|----|----------|----|----------|----|----------|----|
|             | <i>q</i>    | 类型 | <i>q</i> | 类型 | <i>q</i> | 类型 | <i>q</i> | 类型 |
| ER ∩ EI     | 0.100       | NE | 0.298    | NE | 0.513    | NE | 0.151    | UW |
| ER ∩ PITI   | 0.108       | NE | 0.408    | NE | 0.496    | BE | 0.191    | BE |
| ER ∩ TP     | 0.275       | NE | 0.380    | NE | 0.587    | BE | 0.208    | UW |
| ER ∩ UR     | 0.186       | NE | 0.453    | NE | 0.518    | NE | 0.218    | BE |
| ER ∩ PGDP   | 0.121       | NE | 0.312    | NE | 0.495    | NE | 0.138    | UW |
| ER ∩ IS     | 0.122       | NE | 0.225    | BE | 0.512    | NE | 0.214    | BE |
| ER ∩ FDI    | 0.095       | NE | 0.261    | NE | 0.455    | NE | 0.137    | NW |
| EI ∩ PITI   | 0.132       | NE | 0.342    | NE | 0.385    | NE | 0.490    | NE |
| EI ∩ TP     | 0.277       | NE | 0.430    | NE | 0.543    | NE | 0.370    | NE |
| EI ∩ UR     | 0.206       | NE | 0.456    | NE | 0.420    | NE | 0.294    | NE |
| EI ∩ PGDP   | 0.179       | NE | 0.315    | NE | 0.396    | NE | 0.254    | NE |
| EI ∩ IS     | 0.178       | NE | 0.250    | BE | 0.337    | NE | 0.380    | NE |
| EI ∩ FDI    | 0.124       | NE | 0.398    | NE | 0.193    | BE | 0.608    | NE |
| PITI ∩ TP   | 0.313       | —  | 0.527    | —  | 0.700    | NE | 0.319    | —  |
| PITI ∩ UR   | 0.205       | NE | 0.499    | NE | 0.503    | NE | 0.510    | —  |
| PITI ∩ PGDP | 0.146       | NE | 0.505    | NE | 0.502    | NE | 0.405    | NE |
| PITI ∩ IS   | 0.170       | NE | 0.390    | NE | 0.397    | NE | 0.636    | NE |
| PITI ∩ FDI  | 0.139       | NE | 0.396    | NE | 0.246    | NE | 0.432    | NE |
| TP ∩ UR     | 0.319       | NE | 0.504    | NE | 0.533    | NE | 0.374    | —  |
| TP ∩ PGDP   | 0.281       | NE | 0.512    | NE | 0.570    | NE | 0.345    | NE |
| TP ∩ IS     | 0.398       | NE | 0.426    | BE | 0.517    | NE | 0.518    | NE |
| TP ∩ FDI    | 0.279       | NE | 0.449    | NE | 0.449    | NE | 0.329    | BE |
| UR ∩ PGDP   | 0.169       | BE | 0.381    | NE | 0.348    | NE | 0.443    | NE |
| UR ∩ IS     | 0.241       | NE | 0.339    | NE | 0.390    | NE | 0.347    | NE |
| UR ∩ FDI    | 0.272       | NE | 0.518    | NE | 0.393    | NE | 0.508    | NE |
| PGDP ∩ IS   | 0.191       | NE | 0.368    | NE | 0.353    | NE | 0.453    | NE |
| PGDP ∩ FDI  | 0.216       | NE | 0.331    | NE | 0.365    | NE | 0.500    | NE |
| IS ∩ FDI    | 0.188       | NE | 0.283    | NE | 0.208    | BE | 0.439    | NE |

注：NE 表示非线性增强；BE 表示双因子增强；UW 表示单因子非线性减弱；NW 表示非线性减弱；— 表示不显著。



奖励,而自愿措施能够增强社会责任感和公众参与,两者共同作用加强了环境治理的效果。例如,在碳交易市场中,企业受经济激励影响,通过购买碳排放权来达到法定排放标准,也可能自愿参与碳抵消项目,如植树造林,进一步减少碳足迹。这种结合了经济激励与自愿参与的策略,不仅直接促进了温室气体减排,也提高了企业和公众对气候变化问题的认识。而命令控制型环境规制(ER)与自愿型环境规制(PITI)在2013年的交互作用显示出最强的正向影响,这反映了在该时期,政策强制力度与公众参与度的共同提升有效地促进了环境质量的改善。

对于控制变量,由表3可知,总人口(TP)与所有3种环境规制工具的交互作用均显示出增强效果,尤其是在2013年,这表明人口增长可能加大了环境治理的挑战,但同时也增加了规制措施发挥作用的空间。城镇化率(UR)与环境规制工具之间的交互作用表明,随着城镇化的加深,环境规制在改善空气质量方面的作用得到了增强。人均GDP(PGDP)的提高增强了经济激励型和自愿型环境规制工具的效果,这可能反映了经济发展水平高的城市有更多资源和能力投入到环境保护中,同时公众对于高质量生活环境的需求更强烈。

#### 4 研究结论与建议

通过对2008—2018年105个环保重点城市的数据分析,深入探讨了命令控制型环境规制,经济激励型环境规制、以及自愿型环境规制对城市空气质量的影响。固定效应模型的结果揭示了这3种环境规制工具对PM<sub>2.5</sub>浓度的异质性影响,同时地理探测器进一步分析了交互影响的时空异质性。

研究发现,这3种环境规制工具在不同的社会经济背景和时间节点上,与城市空气质量之间存在复杂的相互作用关系。命令控制型环境规制在固定效应模型中不显著,但在地理探测器分析中,在2013年显示出强烈的正向效果。这可能表明命令控制型环境规制的效果受到时间和地区的影响。经济激励型规制在各个时间节点上对空气污染的影响持续显著且负向,表明经济激励措施是改善空气质量的有效手段。自愿型规制的影响在2018年变得尤为显著,这反映了随着时间的推移,公众环保意识的提高以及自愿环保措施的逐步深化。在整个研究期间,经济激励型环境规制与自愿型环境规制之间的交互作用显示出增强的趋势;而命令控制型环境规制与自愿型环境规制在2013年的交互

作用显示出最强的正向影响。控制变量中,人口总数和城镇化率的交互作用强化了环境规制的效果,暗示着在人口密集和城市化程度较高的地区,环境规制政策需要更加精细化和具有针对性。

基于研究结论,提出以下建议:①强化经济激励措施。考虑到经济激励型环境规制的显著性和有效性,建议政策制定者继续发展和完善相关的经济激励机制,如税收优惠、绿色信贷、污染排放权交易等,来进一步激发企业和公众的环保行为。②提升公众环保意识。鉴于自愿型环境规制的效果随公众环保意识的提高而增强,建议政府和社会组织加大对环保教育的投入,提升公众的环保知识和参与意愿,借助社会力量促进环境保护行动的广泛参与。③地区特定的环境政策。由于不同城市在人口、经济、工业化等方面存在差异,环境规制的效果也表现出异质性,因此政策制定应充分考虑地区特性,制定符合当地实际情况的环境政策。④协同发展策略。应通过跨部门协作,将环境规制与城市发展规划、产业结构调整、技术创新等政策结合起来,形成协同效应,共同推动环境质量的提升和经济社会的可持续发展。

#### 参考文献

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 生态环境部公布2023年12月和1—12月全国环境空气质量状况[EB/OL]. (2024-01-25)[2424-03-01]. [https://wzql.mee.gov.cn/ywdt/xwfb/202401/t20240125\\_1064784.shtml](https://wzql.mee.gov.cn/ywdt/xwfb/202401/t20240125_1064784.shtml).
- [2] 王娟茹,张渝. 环境规制、绿色技术创新意愿与绿色技术创新行为[J]. 科学学研究, 2018, 36(2): 352-360.
- [3] 汤韵,梁若冰. 两控区政策与二氧化硫减排:基于倍差法的经验研究[J]. 山西财经大学学报, 2012, 34(6): 9-16.
- [4] 范丹,孙晓婷. 环境规制、绿色技术创新与绿色经济增长[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(6): 105-115.
- [5] 彭星,李斌. 不同类型环境规制下中国工业绿色转型问题研究[J]. 财经研究, 2016, 42(7): 134-144.
- [6] 李小平,余东升,余娟娟. 异质性环境规制对碳生产率的空间溢出效应:基于空间杜宾模型[J]. 中国软科学, 2020(4): 82-96.
- [7] 贺灵. 不同类型环境规制工具协同对工业绿色创新的倒逼效应研究[J]. 科技和产业, 2023, 23(14): 182-189.
- [8] 胡元林,李雪. 自愿型环境规制影响企业绩效的路径研究[J]. 生态经济, 2018, 34(4): 100-103.
- [9] 任胜钢,蒋婷婷,李晓磊,等. 中国环境规制类型对区域生态效率影响的差异化机制研究[J]. 经济管理, 2016, 38(1): 157-165.
- [10] YU Y T, HUANG J H, LUO N S. Can more environmental information disclosure lead to higher eco-efficiency? evidence from China[J]. Sustainability, 2018, 10(2): 1-20.

- [11] 石光, 周黎安, 郑世林, 等. 环境补贴与污染治理: 基于电力行业的实证研究[J]. 经济学(季刊), 2016, 15(4): 1439-1462.
- [12] 包群, 邵敏, 杨大利. 环境管制抑制了污染排放吗? [J]. 经济研究, 2013, 48(12): 42-54.
- [13] 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.
- [14] DONG F, ZHANG S, LONG R, et al. Determinants of haze pollution: an analysis from the perspective of spatiotemporal heterogeneity[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 222: 768-783.
- [15] 朱向东, 贺灿飞, 李茜, 等. 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.
- [16] DU Y, SUN T, PENG J, et al. Direct and spillover effects of urbanization on PM<sub>2.5</sub> concentrations in China's top three urban agglomerations[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 190: 72-83.
- [17] 田娟娟, 张金锁. 基于地理探测器的中国碳排放时空分布特征及驱动因素研究[J]. 生态经济, 2022, 38(7): 13-20, 27.
- [18] 李树, 翁卫国. 我国地方环境管制与全要素生产率增长: 基于地方立法和行政规章实际效率的实证分析[J]. 财经研究, 2014, 40(2): 19-29.
- [19] 张平, 张鹏鹏, 蔡国庆. 不同类型环境规制对企业技术创新影响比较研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(4): 8-13.
- [20] ZHONG S, LI J, ZHAO R. Does environmental information disclosure promote sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) remove? new evidence from 113 cities in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 299: 126906.
- [21] 张博文. 基于STIRPAT模型的山东省空气污染驱动因素研究[J]. 当代经济, 2016(4): 67-71.
- [22] 李从欣, 李国柱, 崔文静. 京津冀环境污染时空演进研究: 基于影响因素时空异质性[J]. 当代经济管理, 2020, 42(8): 61-65.
- [23] 刘满凤, 谢晗进. 基于空气质量指数AQI的污染集聚空间异质性分析[J]. 经济地理, 2016, 36(8): 166-175.
- [24] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [25] 王长梅, 王大娟, 王开心, 等. 长沙市PM<sub>2.5</sub>浓度时空分布特征及影响因子分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(12): 5157-5165.

## Heterogeneous Effects of Various Environmental Regulation Instruments on Air Pollution: Based on Geodetector Analysis

WANG Tingwei, LÜ Chen

(School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Based on the data from 105 key environmental cities in China from 2008 to 2018, the fixed-effect model and geodetector is used to explore the impact of environmental regulations on urban air quality. It is found that command-and-control environmental regulations are effective in specific contexts, while economic-incentive regulations are consistently effective and significantly reduce air pollution. Voluntary regulations significantly impacted air quality in 2018. Moreover, the interaction between economic-incentive and voluntary regulations is increasingly important for improving air quality. It is recommended to strengthen economic incentives, raise public environmental awareness, and develop environmental policies adapted to regional characteristics to promote environmental quality improvement and sustainable development.

**Keywords:** environmental regulation; air pollution; geodetector