



北京大學

碩士研究生學位論文

題目：雄安新区和保定市区 PM2.5 污染
的互动关系研究

姓名：刘一璇

学号：1601214602

院系：国家发展研究院

专业：金融学

研究方向：国际金融

导师姓名：胡大源

二〇一九年五月

版权声明

任何收存和保管本论文各种版本的单位和个人，未经本论文作者同意，不得将本论文转借他人，亦不得随意复制、抄录、拍照或以其他方式传播。否则，引起有碍作者著作权之问题，将可能承担法律责任。

中文摘要

2017年4月1日,中共中央、国务院决定在原雄县、安新、容城三县的基础上设立国家级新区——雄安新区,并将其与深圳特区和浦东新区相提并论。雄安新区要重点打造北京非首都功能疏解集中承载地,未来更将建设成为蓝绿交织、清新明亮的生态城市,吸引来自国际、国内的优秀人才以发展高端高新产业。新区目标引进的产业和人才对于高质量的空气和环境要求很高,因此保护和修复生态环境尤其是降低空气中的PM_{2.5}浓度对于新区的成功至关重要。

本文首先回答了“雄安新区是否存在PM_{2.5}污染、污染程度如何”这个问题。作者通过长期积累掌握了2014年7月至2017年5月雄县县域PM_{2.5}小时浓度和天气的全样本数据,分析发现每年冬季雄县的PM_{2.5}平均浓度都在150微克/立方米以上,月均值与经济发达、人口密集的保定市区不相上下,夏秋季月均值甚至高于保定市区,而保定市在全国各大城市的空气质量排名中一直非常落后。由此可见,雄安新区的空气污染非常严重。

经济相对落后、人口相对稀疏的小城市的污染水平与经济相对发达、人口相对密集的大城市不相上下。这是因为小城市存在众多技术低下、难以监管的“散乱污”排放源,能量消耗少但单位GDP的PM_{2.5}废弃物排放多。

其次,本文研究了“雄安新区的PM_{2.5}污染主要源自域内排放还是源自域外传输扩散”这一问题。作者使用含当期项的自回归分布滞后模型进行OLS和2SLS估计,并使用不含当期项的自回归分布滞后模型进行稳健性检验。通过模型比较的结果发现,简单的OLS回归确实存在内生性,而2SLS估计和不含当期项的分布滞后模型具体结果表明,雄县和保定市区的PM_{2.5}污染均以本地污染为主,但保定市区对雄县的影响更大,雄县对保定市区的影响更小。随着雄安新区污染治理的不断推进,近期保定市区相对雄县的空气污染更加严重,保定空气污染对雄县的影响增大。

因此,雄安新区PM_{2.5}的治理既要继续清理本地最主要的污染源,又要加强区域联防联控,规范保定市区的企业生产和人民生活行为。

关键词: 雄安新区 保定市区 PM_{2.5} 区域联防联控

The Interaction of PM2.5 Level between Baoding City and Xiongan New Area

Liu Yixuan (Finance)

Directed by *Hu Dayuan*

On April 1st, the Central Committee of the Communist Party of China and the State Council of the People's Republic of China announced establishment of Xiongan New Area based upon Xiongxian, Anxin and Rongcheng, which is of equal significance to Shenzhen Special Economic Zone and Shanghai Pudong New Area. In order to undertake non-capital functions from Beijing, Xiongan New Area has to keep its air clean to attract high-level industries and talents both from home and abroad, which makes it important to reduce PM2.5 there.

Firstly, this paper describes the air quality of Xiongan New Area. By collecting and analyzing data of Xiongxian, which is a representative of Xiongan New Area, we find that the average PM2.5 level is above 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ every winter and its average level is approximately equal to Baoding, a metropolis around Xiongxian who ranks behind in terms of air quality among big cities in China. This clearly reveals heavy air pollution of Xiongan New Area.

This conclusion shows that the air quality of small cities with relatively backward economy and sparse population may be equal to that of large cities with relatively developed economy and relatively dense population. Through field investigation, the author finds that there are many "scattered pollution" emission sources in small cities, which are low in technology and difficult to regulate. They consume less energy but emit more PM2.5 pollution per unit of GDP.

Secondly, this paper studies whether PM2.5 is emitted within Xiongan New Area itself or beyond. The author make speculation based on autoregressive distributed lag model with current term and conduct single OLS and also 2SLS estimation. Plus, this paper also set up an autoregressive distributed lag model without current term so as to check robustness. Through the comparison of model, the author finds out that the regression of pure OLS in fact suffers the problem of endogeneity, but the 2SLS estimation and ADL model has similar conclusions: both Xiongxian and Baoding City are dominated by local PM2.5 emission while air pollution in Baoding is likely to exert greater influence on Xiongxian. Plus, Baoding becomes more polluted than

Xiongxian with progress of environment protection measures and Baoding's influence on Xiongxian is more and more heavier.

Therefore, this paper leads to a conclusion that measures have to be taken continuously to prevent local emission sources, but at the same time, regional joint defense and control becomes more important. The behavior of enterprises and individuals is supposed to be controlled properly in the future.

Keywords: *Xiongan New Area Baoding City PM2.5 Regional Joint Defense and Control*

雄安新区和保定市区 PM2.5 污染的互动关系研究

北京大学国家发展研究院 1601214602 刘一璇

目 录

第一章 研究介绍和文献综述	1
1.1 选题背景与现实意义.....	1
1.1.1 选题背景：雄安新区的由来.....	1
1.1.2 现实意义：空气污染研究的重要性.....	4
1.2 空气污染来源地研究的必要性.....	5
1.3 研究对象与研究方法.....	5
1.3.1 研究对象：PM2.5 浓度水平.....	5
1.3.2 研究方法：时间序列分析.....	6
1.4 文献综述和本文贡献.....	6
1.4.1 文献综述.....	6
1.4.2 当前文献不足和本文学术贡献.....	9
1.5 研究框架.....	11
第二章 数据来源、变量设定和样本划分	11
2.1 数据来源和缺失情况.....	11
2.2 变量描述.....	12
2.2.1 两地 PM2.5 污染水平描述及分析.....	12
2.2.2 两地气象条件描述及分析.....	13
2.3 变量设定.....	15
2.3.1 关键变量设定 1：选择雄县作为雄安新区的代表.....	15
2.3.2 关键变量设定 2：将保定市区作为雄县外域污染物的主要可能来源地.....	19
2.3.3 控制变量设定.....	21

第三章 时间序列模型设定和结果比较	21
3.1 模型设定.....	21
3.1.1 自回归分布滞后模型（含当期项）单方程设定.....	21
3.1.2 自回归分布滞后模型（含当期项）的联立方程设定.....	23
3.2 模型估计结果.....	23
3.2.1 滞后阶数选择和平稳性检验.....	23
3.2.2 自回归分布滞后模型（含当期项）估计结果.....	25
3.2.3 自回归分布滞后模型（含当期项）联立方程估计结果.....	27
3.2.4 自回归分布滞后模型（不含当期项）估计结果.....	29
3.3 2016 年两地污染的互动关系变化.....	30
第四章 从 PM2.5 快速积聚过程再看两地污染的互动关系	34
4.1 积聚过程的定义和分析方法.....	34
4.1.1 积聚过程定义.....	34
4.1.2 积聚过程分析方法.....	36
4.2 积聚过程分布.....	36
4.3 同步积聚过程统计.....	39
4.4 快速积聚过程特征统计.....	40
第五章 为什么经济落后的雄安新区空气污染如此严重？	41
第六章 结论	43
参考文献	45
致谢	47

第一章 研究介绍和文献综述

1.1 选题背景与现实意义

1.1.1 选题背景：雄安新区的由来

2017年4月1日晚，新华社发布消息称中共中央、国务院决定设立河北雄安新区，消息将雄安新区抬升到前所未有的地位，将其定位为“以习近平同志为核心的党中央作出的一项重大的历史性战略选择，是继深圳经济特区和上海浦东新区之后又一具有全国意义的新区，是千年大计、国家大事”¹。

雄安新区设立是人们对于城市和京津冀区域发展的认知逐渐深化的结果：

在20世纪与21世纪相交的时期，随着中国成功加入WTO和申奥成功，北京城市建设进入新的阶段，北京发展成为世界城市有了新的机遇，1993年10月6日国务院在《关于北京城市总体规划的批复》中明确指出，要将北京市建设成为“世界第一流水平的历史文化名城和现代化国际城市”，自此，人们开始意识到北京作为中国的首都必须发展成为世界城市体系的一部分。但是，通过对全球城市、经济全球化、网络城市、信息城市、柔性城市、学习性城市/区域等当时较为流行的理论的把握，对比发达和较发达国家的城市地区，如巴黎、伦敦、柏林、莫斯科、东京等，以及国内长江三角洲和珠江三角洲城市发展进行对比研究，提出了“城市地区”概念，认为城市地区是一个“城市-腹地”地域系统，内部具有行政、产业、通勤、流域等联系，可以成为一个有效的功能区。基于这一概念，当时的研究提出了“京津冀北（大北京地区）”的区域概念。

但是，京津冀北区域发展存在诸多问题：

第一、经济发展方面，北京市GDP链条短，河北北部及冀中地区与京津等中心城市内在经济联系不强，环京津贫困带现象非常突出，这进一步加剧了发展的不平衡，使落后地区的经济发展陷入恶性循环。

第二、区域生态方面，随着经济的快速增长，京津冀北的生态环境质量总体上仍在下降——以城市为中心的环境污染呈恶化趋势，空气污染依然严重、地表

¹ 朱英：《中共中央、国务院决定设立河北雄安新区》，新华社，2017年4月1日。

水污染普遍、湖泊富营养化问题突出，沙尘暴天气频繁发生，水土流失和土地荒漠化日益加重。

第三、交通网络方面，京津冀北区域交通网总体布局存在缺陷，交通体系聚焦核心城市，区域内城际交通缺乏足够重视。铁路与公路网络都以核心城市北京和天津为中心向外放射，关内外的交流必须通过北京或天津枢纽，为二市带来了大量的过境运输，干扰核心城市交通，而区域内的许多重要城市之间交通联系仍然非常不便；在区域城镇化方面，大北京地区在城乡人力资源开发、教育发展水平、城乡基础设施建设等方面差距很大，城乡之间存在的完全是两种工业体系和两种市场，双方各自为政，缺乏合理的协作与分工；在区域旅游资源开发方面，条块分割造成部门之间、地方之间对景区多头管理的矛盾十分突出。区域内旅游线路和游客客源的组织上缺乏协调机制，降低了区域旅游的整体效应。

为了有效解决上述问题，吴良镛等发表了京津冀地区一体化问题研究的第二期成果，将大北京地区的协调范围从“京津冀北”扩大到“京津冀”。

2013 年左右，吴良镛等就京津冀地区的发展规划发表了第三期研究成果，提及了诸多过去不曾遇到的新问题，这些新问题主要集中于两个方面：

第一，人口压力愈发显著。根据五普、六普的数据，2000-2010 年，京津冀地区常住人口由 9010 万增加到 1.044 亿人，年增长率为 1.48%，几乎是同期全国年人口增长率（0.57%）的 3 倍。根据《全国城镇体系规划》预计，未来 10 年京津冀地区仍将保持人口快速增长的态势。2010 年，清华大学预计到 2030 年京津冀地区总人口可能达到 1.33 亿左右，占全国人口总数的比重将达到 9.14%。而京津冀人口迅速增长的大背景下，京津两大核心城市人口极化显著。以北京市为例，2000 年北京市常住人口为 1364 万人，2012 年常住人口增加了 705 万人达到 2069 万人，2016 年末常住人口再增加 104 万人达到 2173 万人。京津冀地区迅速增加的人口中主要增加的是流动人口，且流动人口高度集中于京津两市。2010 年两市外来人口比 2000 年分别增加了 447.7 万和 211.87 万人，占全部净增人口的 73%，流动人口年均增速是常住人口增速的 3 倍。另外，从人口流动的源地看，京津常住外来人口中来自河北的分别占到 22.1%和 25.2%，京津冀地区人口向京津集中的趋势非常明显。这些流动人口的定居意愿逐步增强，2010 年 1/5 的外来人口已离开户口登记地 6 年及以上，家庭化迁移也非常明显，流动人口努力融入

当地的理想和现实中遭遇的不公平待遇、城市公共管理和服务设施严重不足矛盾非常突出。

第二，生态环境危机尤其是空气污染愈发严重。京津冀地区空气污染源主要位于北京、天津沿海、河北中南部和东北部等地区，受制于区域性南北主导风和燕山山脉等阻隔影响，北京成为区域性灰霾污染的重灾区。随着区域内外工业化进程、汽车保有量和能源消耗的剧增，区域大气悬浮颗粒物 PM10 和 PM2.5 的浓度有较明显的上升趋势，且近年来风力大于 5m/s 的天数显著减少，京津冀地区的灰霾天气明显增加，从 1961 年的 6.5 天/10 年上升到 38.7 天/10 年。2000-2013 年，北京共发生近 200 次重污染天气，其中霾污染几乎占了重污染天气的一半²，国务院主管部门到北京调研后锁定燃煤、机动车为主要污染源，而这两项都与人口集聚关系密切。人口快速向京津两大城市集聚和雾霾天气日益加重使得疏解非首都功能、促进京津冀区域协调发展迫在眉睫。

为此，吴良镛等在报告中明确提出了建设“畿辅新区”的设想，建议选择北京新机场周边的大兴南部、廊坊市区、固安、永清、涿州、武清等地区，成立跨省市边界的“畿辅新区”，将部分国家行政职能、企业总部、科研院所、高等院校、驻京机构等等迁至“畿辅新区”，结合临空产业和服务业合理布局。然而，“畿辅新区”的设想仍然不能够解决产业结构调整、区域经济增长、自然资源有限等问题：第一、产业结构方面，“畿辅新区”所处的北京市五环、六环及以外的产业非常低端，它占用了北京大量的土地、吸引了大量的流动人口、造成了大量的污染（包括燃煤、违法建设等），但它创造的国民生产总值却只占北京的百分之几；第二、区域增长方面，习近平同志 2010 年到唐山视察的时候就指出“环渤海地区快速崛起正在成为继珠三角、长三角之后中国经济的第三极”，然而“畿辅新区”面积较小且地处京津之间，不能带动河北省省域经济的发展，反而可能会扩大京津两市与河北省广大区域之间的贫富差距；第三、资源容量方面，环渤海湾的省市都在积极布局重化工业，港口建设也是互相恶性竞争，然而渤海水体的更新周期需要 15-40 年，一旦毁坏后果不堪设想。疏解北京非首都功能的新区需要丰富的水资源和良好的生态环境作为经济增长的支撑和人才落户的动力；第四、历史经验方面，首都机场每年的人流量超过 8000 万，但 30 多年来机场周围

² 吴良镛等：《京津冀地区城乡空间发展规划研究三期报告》，2013 年 10 月第 1 版。

的区域并未发展起来，距离城市核心区过近会使得资源涌向核心区而不会向新区疏解。

“畿辅新区”在以上方面不符合新区选址的要求，但新区建设又迫在眉睫。因此雄安新区作为符合条件的区域最终中选。**从地理位置上看**，雄安新区的规划范围涉及河北省雄县、容城、安新3县及周边部分区域，其位置深入北京、天津、保定腹地，能够与北京、天津、石家庄、保定、唐山、秦皇岛等存量大城市呼应，同时能够带动河北省落后区域的经济**发展**；**从发展阶段上看**，新区所涉县市现有开发程度较低，发展空间充裕³，具备承接北京市五环、六环之外低端产业和低端产业所吸引的大量流动人口的**条件**；**从自然资源上看**，雄安新区以华北地区最大的湿地白洋淀为中心，能够为新区建设提供充足的淡水资源。

总之，雄安新区正如“一张白纸，没有负担，好写最新最美的文字，好画最新最美的图画”⁴，将承接非首都功能的新区设在与京津二市距离适中的雄安三县能够构建多中心的“城镇网络”，通过京津冀相互协调的综合交通网络将城市连成“葡萄串式”，并在此基础上创造安全健康的“生态网络”和“文化网络”，实现四网联通。

1.1.2 现实意义：空气污染研究的重要性

根据中央要求，雄安新区要“建设成为绿色生态宜居新城区、创新驱动发展引领区、协调发展示范区、开放发展先行区，努力打造贯彻落实新发展理念的创新示范区”⁵。只有在深入调查研究和数据分析验证的基础上，兼顾生产、生活与生态环境协调发展，方能把握各项政策措施的可行性，落实中央的战略部署，保证绿色生态宜居，吸引众多国内外优秀人才，实现疏解北京非首都功能的战略目标。由此，雄安新区空气污染的治理也就成为了一个重要议题，是雄安新区能否集聚人才、能否蓬勃发展的关键问题之一。

³ 朱英：《中共中央、国务院决定设立河北雄安新区》，新华社，2017年4月1日。

⁴ 毛泽东：《介绍一个合作社》，1958年4月15日。

⁵ 《国务院关于河北雄安新区总体规划（2018-2035年）的批复》，http://www.gov.cn/zhengce/content/2019-01/02/content_5354222.htm

1.2 空气污染来源地研究的必要性

要治理空气污染，首先要厘清空气污染物产生的源头。中科院曾在 2013 年 2 月发布了一项研究成果，他们组成了专门的空气污染项目组对污染物成分进行来源解析，结果发现燃煤和机动车尾气排放是京津冀地区 PM2.5 的主要来源（见表 1）。

表 1：京津冀地区 PM2.5 的来源⁶

机动车	16%
煤炭燃烧	34%
工业、外来输送扬尘、餐饮和其他	50%

为了打赢蓝天保卫战、切实加大京津冀及周边地区大气污染防治工作力度，2018 年初环保部就设定了“2+26”个城市⁷作为大气污染传输通道，对区域内的火电、钢铁、石化、化工、有色行业排放进行限制，雄安新区也位于通道区域之内。由此可见，空气污染的治理措施既包括改善本地能源结构，也包括限制周边地区污染企业生产，这些整治措施在中短期内要付出一定的经济代价，只有找到新区空气污染物的来源范围才能有针对性地整治和确定控制区范围，并把经济损失控制在最低限度。因此，厘清空气污染物产生源头的的一个最迫切和最重要的方面就是研究污染物的来源地。

1.3 研究对象与研究方法

1.3.1 研究对象：PM2.5 浓度水平

本文主要关注的空气质量指标是 PM2.5 浓度水平。PM2.5 指的是环境空气中空气动力学粒径小于或等于 2.5 微米的颗粒物，也称为细颗粒物，它的直径还

⁶ 新华网：《中科院：燃煤及机动车为京津冀强霾污染元凶》，2013 年 2 月 18 日。

⁷ 京津冀大气污染传输通道城市包括北京市，天津市，河北省石家庄、唐山、廊坊、保定、沧州、衡水、邢台、邯郸市，山西省太原、阳泉、长治、晋城市，山东省济南、淄博、济宁、德州、聊城、滨州、菏泽市，河南省郑州、开封、安阳、鹤壁、新乡、焦作、濮阳市（以下简称“2+26”城市，含河北雄安新区、辛集市、定州市，河南巩义市、兰考县、滑县、长垣县、郑州航空港区）。

不到人的头发丝直径的二十分之一。以 PM2.5 浓度为研究对象，既是由于它目前是大眾最为关注的污染物指标，也是因为在大多数的污染时段里 PM2.5 都是最主要的污染物，新《环境空气质量标准》（GB3095-2012）已经将 PM2.5 纳入了常规空气质量评价体系并首次制定了 PM2.5 污染标准。

1.3.2 研究方法：时间序列分析

本文通过时间序列模型定量分析判断和检验雄安新区和保定市区两地 PM2.5 污染的因果关系。

第三章分析了常见的“格兰杰因果”模型和的动态因果效应模型，首先对单方程设定模型进行估计，并使用联立方程模型和工具变量法解决研究中的内生性问题，最后对三个模型的估计结果进行比较。

1.4 文献综述和本文贡献

1.4.1 文献综述

目前有关雄安新区空气质量的研究还非常少，但以北京为对象研究空气污染跨区域传输的文献非常多，本部分主要对这类文献进行梳理以寻找探究 PM2.5 来源的可靠方法。

关于 PM2.5 污染的成因和来源地问题，已经有多个领域的学者从物理、化学、城市规划等角度进行了研究并得出结论、给出治理措施。这些研究方法各异、结论不同，总体上可以分为两类：（1）用静态的证据分析导致城市 PM2.5 积累至和维持在高水平的原因；（2）从动态的视角研究城市 PM2.5 的积聚过程并从中推断 PM2.5 的来源地。

A. 用静态证据分析 PM2.5 浓度高的成因

现有文献主要属于第一类。

最初步的分析方式是对 PM2.5 的浓度进行描述性统计：程念亮等（2015）利用 2013 年北京市环境保护监测中心监测的 PM2.5 浓度数据认识北京市重污染日 PM2.5 的浓度水平、逐月变化和空间分布特征，发现重污染日主要集中在冬

季；年均浓度呈现明显的南北梯度分布特征，南部及城六区存在明显的高污染区⁸。郑晓霞等（2014）发现 PM_{2.5} 日变化规律以 19 时为界，表现出明显的昼夜差异，白天的变化规律呈现凹型，夜间的变化规律呈现拱型。上午 6—8 时 PM_{2.5} 质量浓度变化受交通源影响较大，下午 18-20 时 PM_{2.5} 质量浓度变化受交通源和气象因子二者共同作用⁹。苏福庆等（2004）根据京、津、冀气候站历史资料及激光雷达资料分析得出在稳定天气条件下，北京市外来污染物各类尺度的输入通道流场分为边界层西南气流、东南气流和东风气流风带型，其中对形成北京输送汇风带的统计表明，西南风带汇发生频率占 45%，东南风带汇占 36%，东风风带汇占 19%¹⁰。

最频繁在文献中使用的方法是分析各种气象和地理条件与 PM_{2.5} 浓度的关系：

（1）就气象状态来说，静稳天气¹¹是导致雾霾天气产生的重要条件。“静”主要是指水平方向风速比较小，污染物不易扩散。静风即 0 级风，即平均离地 10m 处风速为 0-0.2m/s，国家气象局将风速小于或等于 2 米/秒的风定义为“小风”，也有气象专家以小于 3m/s 定义“小风天气”；“稳”主要是指垂直方向的层结比较稳定，低层大气和高层大气垂直交换较少。污染源基本上都是在近地面产生的，如果大气上下交换受到抑制就会造成污染物在地面堆积。静稳天气是产生雾霾天气的必要不充分条件，而秋冬季是静稳天气高发季节；夏季对流天气经常发生，不利于逆温层的形成。

（2）地形地貌因素常影响地区气压场和局地性流场，因此也对污染物扩散造成影响。北京地处华北地区燕山山脉以南、太行山山脉以东的山麓与山前平原地区，两大山脉对北京地区区域性大气输送有着重要影响。在区域性大气输送中，山麓地带受背风坡地形、山风及热岛作用，常伴随有较低的大气压力，从而形成“输送汇”，这种区域性大气输送通道可以汇集其周边的大气污染物向下游输送，输送汇中的污染物浓度较汇外空气中污染物的浓度高——北京地区主要有燕山山麓输送汇和太行山山麓输送汇两个通道，输送汇沿线城市空气污染物浓度

⁸ 程念亮等：《2013 年北京市 PM_{2.5} 重污染日时空分布特征研究》，《中国环境监测》，2015 年 6 月。

⁹ 郑晓霞等：《降雨过程后北京城区 PM_{2.5} 日时空变化研究》，《生态环境学报》，2014 年第 23 卷。

¹⁰ 苏福庆等：《北京边界层外来污染物输送通道》，《环境科学研究》，2004 年 1 月。

¹¹ 静稳天气，顾名思义指“平静、稳定的天气”，通常是指近地面风速较小，低层大气的动力热力特征表现为大气层结稳定。

对北京 PM_{2.5} 有重要影响（任阵海等，2004）¹²。

也有学者从化学角度分析 PM_{2.5} 的成分以寻找污染的原因和源头：刘庆阳等（2014）采用 2013 年 1 月 24-31 日在西三环城区和大兴郊区收集的 PM_{2.5} 颗粒物，通过化学成分分析法发现在城区和郊区雾霾天气形成的共同污染源均为冬季燃煤燃烧、汽车尾气排放和二次有机气溶胶污染¹³，但无法说明污染是来自域内、域外还是内外兼有。赵晴等（2009）于 2007 年 8 月在北京清华大学、密云水库、河北任丘和内蒙古商都采集颗粒物样品并获得了 PM_{2.5} 质量浓度和 TSP 中 22 种无机元素的时空分布特征，发现二次污染元素 S 和一次污染元素 Zn、Pb、Cu、As、Sb、Ni、Cd、In、Se 在任丘的 PM 中含量最高，表明该观测点受人为源影响最为显著，其较弱的日变化幅度表明高浓度 PM_{2.5} 主要由本地源贡献，本地排放和区域传输共同影响着北京及周边地区的空气质量¹⁴。

另外，还有学者将观测资料和数值模拟结合起来，计算区域源排放对同一受体点的污染贡献率。安俊岭（2012）、程念亮（2013）、李珊珊（2014）等通过模型模拟发现重污染过程中区域输送的贡献更高，李珊珊等（2014）模拟得到北京市年均区域输送占比 39%，但重污染时区域输送占比则达到 58%；程念亮等（2015）通过模拟得到 2015 年重污染过程中区域输送对北京 PM_{2.5} 贡献率在 53%-69%。王自发等（2014）利用嵌套网格空气质量数值预报模式模拟发现静稳天气下在京津冀地区仍存在显著的区域输送，来自区域外的跨城市群输送对京津冀 PM_{2.5} 浓度贡献为 20%~35%¹⁵。

B. 从动态视角研究 PM_{2.5} 的积聚过程

总体上看，使用此类方法进行研究的文献非常少，现有的动态研究方法分为两类：一类是在现有数据基础上进行数值模拟计算路径，另一类是使用实际数据进行经验分析。

通过数值模拟计算路径的文献稍多。任传斌等¹⁶（2016）通过潜在源贡献作

¹² 任阵海等：《不同尺度大气系统对污染边界层的影响及其水平流场输送》。

¹³ 刘庆阳等：《北京城郊冬季一次大气重污染过程颗粒物的污染特征》，《环境科学学报》，2014 年 1 月。

¹⁴ 赵晴等：《北京及周边地区夏季大气颗粒物区域污染特征》，《环境科学》，2009 年 7 月。

¹⁵ 王自发等：《2013 年 1 月我国中东部强霾污染的数值模拟和防控对策》，2014 年第 44 卷。

¹⁶ 任传斌等：《北京城区 PM_{2.5} 输送途径与潜在源区贡献的四季差异分析》，《中国环境科学》，2016 年第 36 期。

用分析法和污染权重轨迹分析法对研究区进行网格化处理,计算每个网格内污染轨迹端点数出现的概率和源区格网的平均权重浓度以分析其对目标格网的污染贡献。由此得到的结论是北京 PM2.5 空气污染春季贡献源区主要为华北、黄淮平原和西部地区;夏季主要受东南季风影响,贡献源区以山东、苏北及黄海地区为主;秋季是夏冬两季的过渡,东南方向的贡献减弱,东北和西部方向的贡献增加,贡献源以冀南、鲁西、鲁中及苏鲁豫皖交界地区为主;冬季环首都圈城市的贡献突出,冀南、鲁西北、晋北、陕西也是主要来源,此外也有来自内蒙中部及蒙古国南部的远距离输送。

使用实际数据进行经验分析的文献非常少。彭应登(2012)在《中国城市 PM2.5 污染状况及防治途径》中提到“北京十多年的大气观测表明,PM2.5 污染是一个区域性”,北京在发生持续性的严重污染时,周边的天津、石家庄、太原等空气质量同样很差,且污染过程基本同步积累和消散。由此,他认为北京空气污染的形成本大部分与周边地区污染物向北京输送有关;孙峰等(2014)将 2013 年 1 月 10-14 日的重污染过程一个典型案例进行研究,认为该次污染是由于稳定气象条件下导致的局地污染物积累叠加华北的污染影响共同造成的,10 日、12 日北京地区 PM2.5 的快速增长就反映了周边地区传输的显著影响。高健等(2012)收集了 2011 年 10 月份的雾霾样本,根据观测期间气体污染物浓度时间分布和颗粒物浓度的累计时间推断 10 月 4-10 日是一次区域性污染过程,并由此推断北京及其周边地区可能存在基数较大的细颗粒物排放源,在不利于扩散的天气条件下极易在短时间内形成重污染。周磊等(2016)根据国家城市环境空气质量实时发布数据和京津冀地区地理国情信息监测成果,采用空间数据挖掘的方法截取多个 PM2.5 快速积聚的过程,统计典型污染事件城市之间发生次序、时间间隔及聚集历时时长,研究不同城典型污染事件发生的时序变化,结果表明:在选取的京津冀 6 个城市中,PM2.5 污染事件统计上存在保定—廊坊—北京—天津—承德—张家口的污染顺序,在单次污染事件中,城市间的 PM2.5 污染存在空间运移关系。

1.4.2 当前文献不足和本文学术贡献

现有文献在方法论上有以下三点不足之处:

(1) 所用数据主要是月度数据和日数据而非小时数据，难以得出可靠的因果关系结论；

(2) 对静止状态的研究较多，对动态过程研究较少。

现有大部分研究的逻辑脱离了过程变化，仅仅观察在发生 PM2.5 污染的或长或短的一段时间里有哪些气象或社会经济因素存在，并能够自圆其说地解释这段时间内的污染，这是一种静态的思维。例如程念亮等（2015）根据所有监测点的 PM2.5 日浓度数据进行空间差值作图描述年度污染物时空分布特征，发现重污染日主要集中在冬季华北地区燃煤时，同时年均浓度呈现明显的南北梯度分布特征，因而判断城内污染主要来自河北地区冬季燃煤；苏福庆（2004）、任阵海等（2004）根据京津冀气候站历史资料和激光雷达资料统计在北京形成污染物输送汇的情况下西南风带汇、东南风带汇、东风风带汇的占比，结合形成不同风带汇的输送通道恰好经过华北平原 3 个主要排放源区的事实，得到的结论为北京城市雾霾为输入型污染。这种推论有其合理性，但并没有确凿的证据证明污染是否外来。

(3) 本已少量的动态研究中案例数量较少，无法通过统计检验得到有普遍性的结论。

要找到确凿证据研究污染是否外来这一问题势必需要对空气的动态过程进行观察和分析，目前已有学者在这个方面做出努力：例如郑晓霞等（2014）在北京地区一次降雨过程后的 72 小时内持续检测 PM2.5 的时空变化并做出分析结论；刘庆阳等（2014）选择北京城郊冬季一次严重的大气重污染过程作为典型代表进行颗粒物的污染特征分析并得出结论；周磊等（2016）以 PM2.5 十次以内的持续积聚过程为依据，统计典型污染积聚事件在不同城市的起止时间和持续时间，并据此证明区域传输关系。同时利用空间自相关方法（Moran I）找到属性值显著不同于其他地方的区域，从空间统计学上查找区域输送的可能源头。上述探索注重探究动态过程，尤其是周磊的文章已经注意到了“污染事件在不同地区发生时间有差异”这一重要条件，但他们都仅对一次或有限几次的过程样本进行分析并得出整体结论，违背了随机抽样和大样本的统计原则，得出的结论不具有普遍代表性。

以上三点也是现有研究无法形成统一结论的重要原因，本文希望能够在以上

三个方面填补学术空白，通过大量的经验观察、统计描述和定量计算得出关于雄安新区 PM2.5 污染物来源地的可靠结论。

1.5 研究框架

第二章对本文所使用的 2014 年 7 月~2017 年 5 月保定市区和雄安新区两地 PM2.5 浓度小时数据、天气数据的具体情况进行了介绍和统计性描述，同时设定后续实证部分所使用的被解释变量、解释变量及控制变量。第三章详细介绍了本文所用的时间序列模型和解决内生性的方法，并展示和比较了 2014 年 9 月~2015 年 7 月数据的 OLS 回归、2SLS 回归和稳健性检验的具体结果；章节 3.3 使用 2016 年全年的数据再次进行回归，并比较了两个时间段内两地空气污染因果关系的变化。第四章使用了环境经济学研究中新兴的过程分析方法，通过统计 PM2.5 积聚过程的特征对两地空气污染的互动关系做了进一步探讨。第五章阐释了前文得出的结论，解释了雄县空气污染程度严重的自然和经济原因。第六章是对全文的总结。

第二章 数据来源、变量设定和样本划分

2.1 数据来源和缺失情况

研究空气污染物来源地需要污染浓度和气象条件数据。

在污染浓度方面，本文通过编写网络爬虫程序定时抓取网页固定坐标处的相应污染物数值¹⁷，具体包括保定市区和雄县两地的 PM2.5 浓度及气象的小时数据。

在气象数据方面，保定和雄县的风力、风向和湿度数据来自河北省气象信息中心。

雄县和保定市区 PM2.5 的浓度数据时间序列较长，覆盖从 2014 年 9 月 6 日 1:00~2017 年 5 月 13 日 23:00 中的每个小时，第四章的上升过程统计分析使用此时间段数据；但两地的风速和相对湿度数据时间序列较短，相对湿度和风速数据覆盖从 2014 年 9 月 6 日 0:00~2016 年 12 月 31 日 23:00 中的每个小时；两地

¹⁷ 具体抓取方法参见西蒙·蒙策尔特等著《基于 R 语言的自动数据收集：网络抓取和文本挖掘使用指南》。

风向时间序列最短,仅覆盖 2014 年 9 月 6 日 1:00~2015 年 7 月 21 日 9:00 这一时间段。

本文首先使用数据齐全的 2014 年 9 月 6 日~2015 年 7 月 21 日的数据进行回归分析;另外,为了研究雄安新区污染治理后区域传输效果的差异,本文还将对 2016 年的数据进行分析,但是风向数据的缺失有可能造成估计误差。

表 2: 本文研究数据可得性情况列表

变量名称	可得时间段
两地小时 PM2.5 浓度	2014 年 9 月 6 日 1:00~2017 年 5 月 13 日 23:00
两地相对湿度	2014 年 9 月 6 日 1:00~2016 年 12 月 31 日 23:00
两地风速	2014 年 9 月 6 日 1:00~2016 年 12 月 31 日 23:00
两地风向	2014 年 9 月 6 日 1:00~2015 年 7 月 21 日 9:00

2.2 变量描述

2.2.1 两地 PM2.5 污染水平描述及分析

在影响 PM2.5 浓度变化的诸多因素中,既包括风速、风向、相对湿度等气象因素,也包括生产、生活和出行等人类活动产生的各种空气污染物,此外还包括各项污染治理措施的成效。

图 1 对近年来北京、雄县和保定的 PM2.5 月平均浓度进行描述和比较,雄县和保定两地的季节变化呈现较强一致性,说明两地污染可能互为因果或受共同的气象条件等因素影响而具有共同特征。另外,雄县县城 PM2.5 月均值持续高于保定,保定又明显高于北京农展馆监测站,显示出雄县和保定市区的污染程度比北京更严重,雄安新区的空气污染实际上非常严重。

图 2 通过描述、比较雄县和保定的 24 小时 PM2.5 平均浓度变化,可以看到:雄县 PM2.5 平均浓度从早上 6 点开始上升到 9 点达到第一次高峰,平均升幅约 20 微克/立方米,此后污染物浓度开始下降,在下午 15 点降至谷底;从下午 16 点开始再次上升至 20 点形成第二次高峰持续到次日 0 时。雄县空气细颗粒物污染有较为明显的“双峰”特征,这或许反映了上下班早晚高峰由于交通拥堵形成的汽车尾气排放的集聚,或许表现出当地工业生产污染物排放的强度,也有可能

是两者叠加结果的综合体现。相比之下，保定的 PM2.5 平均浓度在早高峰期间上升并不明显，夜间的平均浓度却居高不下，一直持续到次日凌晨。

图 1 北京、保定和雄县 PM2.5 月平均浓度比较

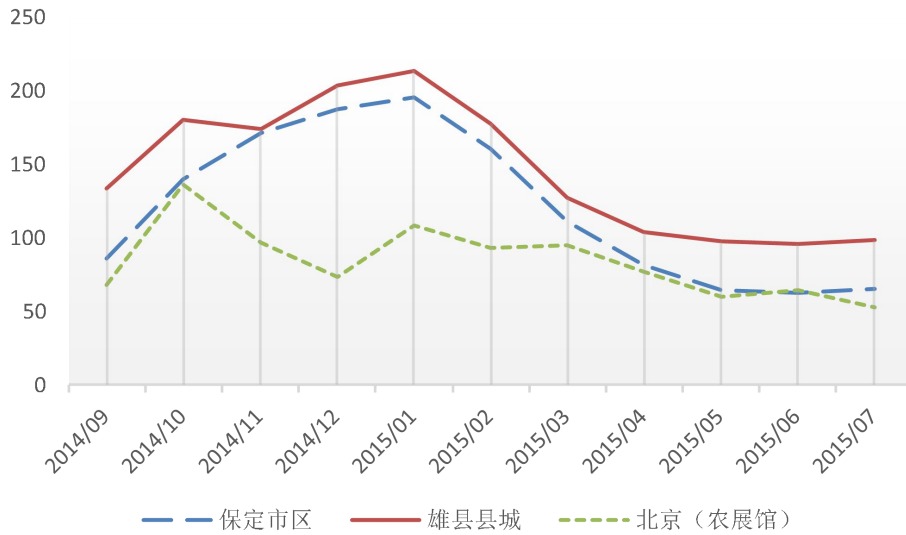
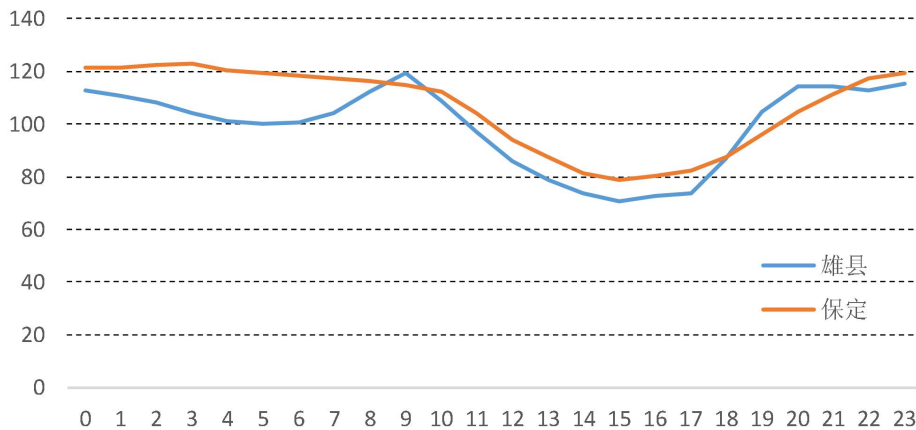


图 2 雄县和保定 24 小时 PM2.5 平均浓度比较



2.2.2 两地气象条件描述及分析

描述和分析气象条件的主要目的是找到必须的控制变量。

如图 3 所示，在一天 24 小时中，雄县和保定均在午后气温最高的时段出现风速的高峰，并在夜晚呈现风速的低谷，气温可能会通过风速间接影响 PM2.5

浓度，因此气温不需要直接作为控制变量。

如图 4 所示，相对湿度在一天 24 小时中的变化特征与风速变化恰恰相反，在午后气温最高的时段呈现低谷，夜间气温低时相对湿度较高。有研究表明，由于 PM2.5 具有吸湿性，因此在一些情况下 PM2.5 浓度变化也会受相对湿度变化的影响。雄县的平均相对湿度略低于保定，气象条件较为有利，相对湿度需要作为控制变量。

从长期观察研究的结果来看，风速对于 PM2.5 集聚的影响要比相对湿度大得多。在同等风速的条件下比较雄县和保定 PM2.5 浓度变化可以得出更有说服力的评价结果，因此，需要将风速作为重要的控制变量。

图 3 雄县和保定 24 小时平均风速比较（米/秒）

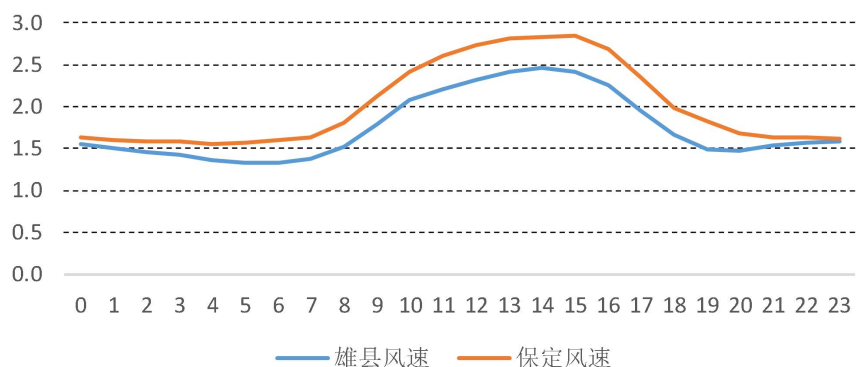
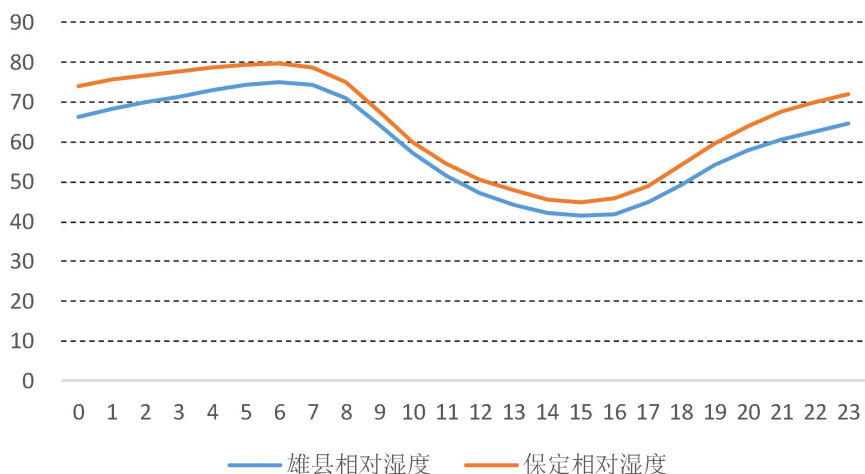
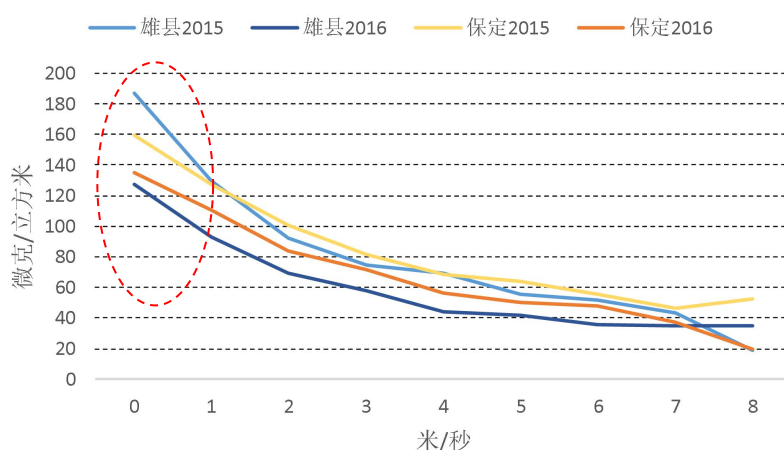


图 4 雄县和保定 24 小时平均相对湿度比较



在图 5 左边，风速为 0 时表示在最不利于空气污染扩散的无风情况下，2015 年雄县 PM2.5 平均浓度为 187 微克，保定为 159 微克；2016 年雄县下降到 127 微克，保定下降到 135 微克。这说明 2016 年雄县空气污染治理更加卓有成效。在无风情况下，2016 年保定 PM2.5 平均浓度与上年相比降低了 24 微克，雄县与上年相比降低了 60 微克。随风速增大，两地的 PM2.5 平均浓度均呈下降趋势。但在风速小于每秒 7 米（4 级风）的情况下，雄县的 PM2.5 平均浓度下降幅度均比保定更快。

图 5 同等风速下雄县和保定的 PM2.5 浓度变化



两地的环境与气象监测数据分析表明：在控制最主要的气象影响因素的情况下，雄县的空气污染治理成效较为明显，本文后续还将通过时间序列定量分析来进一步验证这一推论。

2.3 变量设定

2.3.1 关键变量设定 1：选择雄县作为雄安新区的代表

本文将雄县 PM2.5 浓度作为雄安新区 PM2.5 污染水平的代表，一是由于雄县是雄安新区三县中经济最为发达、产业结构污染性最强的一个县，因此在 PM2.5 的污染上最具代表性；二是由于雄县是雄安新区三县中距离保定市区最远的一个县，如果保定市区与雄县之间存在互相影响，那么与其他两个距离更近的

县也存在互相影响。

A. 经济最发达、产业结构污染性最强

雄安新区规划范围涉及河北省雄县、容城、安新 3 县及周边部分区域，该区域经济发展水平较低，人口密度较特大城市偏低，整个地区已经进入老龄化发展阶段，劳动力受教育水平不高。根据第六次人口普查统计，雄安三县的具体情况如下：

表 3：雄安新区人口统计数据¹⁸

	雄县	安新县	容城县
人口数量（万人）	35.95	43.74	25.82
人口密度（人/平方公里）	695.85	603.05	832.35
15-64 岁人口（%）	73.18	74.48	75.11
64 岁以上人口（%）	7.72	7.2	8.58
老年人口比例（%）	12.26	11.85	13.43
农村人口比例（%）	61.29	61.72	61.64
人均住宅平米数	26.52	27.22	37.17
人均受教育年限	8.16	7.94	8.19
>15 岁文盲百分比	3.53	4.9	4.24
已婚人口比例（%）	75.57	71.95	76.16
第一产业比重（%）	54.46	39	29
第二产业比重（%）	29.7	43	51
第三产业比重（%）	15.84	18	20

相应地，雄安新区主体三县的产业结构较为初级，在河北省内经济较为落后、人均收入水平较低（见表 4），多个支柱产业污染性强，小散乱污的生产方式也使得达标排污要求很难实现。其中，雄县产值最高，是安新县和容城县的产值之和，在工业生产方面更有代表性。

¹⁸ 国家地理信息公共服务平台，网址：<http://xaxq.tianditu.com/>。

具体到各县的产业结构上¹⁹，雄县境内资源和支柱产业可以概括为“一气、二城、三水、四业”，“一气”指雄县东部为华北油田主产区，现有油井 1200 眼、年产原油 30 万吨，天然气储量 10 亿立方米，年产天然气 1800 立方米；“二城”指“地下长城”宋辽古战道和雄州古玩城；“三水”指地热水、矿泉水、白洋淀水；“四业”指塑料包装、压延制革、乳胶制品和电线电缆，这四大支柱产业均对空气质量的负面影响较大。

表 4：雄安新区三县主要经济指标对比²⁰（2016 年）

指标	雄县	容城县	安新县	河北省
GDP（亿元）	101	59.4	57.8	31827.9
GDP 增速（%）	4.7 ²¹	4.09 ²²	0.53	6.8
城镇居民可支配收入（元）	28057		24518	30548
农村居民可支配收入（元）	14517		12316	12881
社会消费品零售总额（亿元）	53.5		49.6	15908
县域面积	524	314	738	

另外，实地调研还发现，雄县与聚集着规模以上工业企业的保定、北京等大城市不同，县城小企业众多，其郊区和乡村甚至聚集着许多没有营业执照的“散乱污”作坊，这些小企业和小作坊污染源分散，难以监测和控制，且利润低，难以保证安装和持续使用环保设施，往往采取监管部门一离开就关闭环保设施的方式来规避监管、超标排放，更提高了其产业结构对空气污染的贡献度。

而安新县和容城县的产业结构对空气污染贡献较小：

容城县县域内市场资源丰富，紧邻小商品集散地白沟；旅游资源丰富，紧邻白洋淀，境内有近万亩水域；地热资源丰富，地处中国东部中低温地热田，具有储量大、可回灌等重要特点，是华北地区具有代表性的地热田。容城县产业结构以服装业为主，四大支柱产业共同发展：（一）服装业。容城服装业有 40 多年历史，2006 年被评定为中国男装名城和全国纺织产业集群试点。目前全县共有

¹⁹ 实地调研和公开资料整理。

²⁰ 数据来源：CEIC、政府门户网站、实地调研。

²¹ 近五年年均增速为 7.92%。

²² 近五年年均增速为 4%。

服装企业 945 家，销售收入亿元以上企业 12 家，从业人员 7 万余人，现拥有国家精品 1 个、国家免检产品 1 个；（二）机械制造业。以汽车零部件制造业为主，目前境内有汽车照明、数控机床、食品机械、服装机械制造企业 30 余家；（三）箱包和毛绒玩具产业。全县有毛绒玩具加工户有约 1170 家，从业人员 1 万余人，箱包产品出口 20 多个国家和地区；（四）食品加工业。境内拥有食品生产企业约 45 家。容城自秦置县，历史悠久，元初著名学者刘因、明朝忠烈杨继盛、清初大儒孙奇逢被誉为“容城三贤”。实地调查发现，容城县的机械制造业企业规模大、生产规范、排污达标；毛绒玩具、服装制造等产业产生的主要是固体废弃物和垃圾，对空气质量影响小。

安新县境内旅游资源丰富，有白洋淀水域面积 312 平方公里，占全部淀区的 85%；该县交通便利，京广铁路、京昆、京港澳、保津、保沧、张石高速环绕县区；域内地热资源丰富，有地热田 350 平方公里和地热水储量 150 亿立方米。在产业结构方面，安新县有制鞋、羽绒制品、有色金属三大支柱产业，均形成了产业集群并在不同程度上有所污染：（一）制鞋业。三台镇制鞋业年产值 30 亿元，在册企业 260 家，个体 513 家；（二）羽绒业。主要是清洗环节，集中分布在新安镇大张庄，年产值在 10 亿元以上，在册企业 135 家、个体 79 家；（三）有色金属。集中分布在老河头工业园区，是全国再生铅产业基地之一，有 2 家企业年产值在 3 亿元以上；（四）旅游业。2016 年全年接待游客 213.77 万人次，实现社会效益 17.2 亿元，财政收入 2400 万元；餐饮、住宿、娱乐等相关服务行业实现产值 12 亿元以上。实地调查发现，有色金属生产会产生较多空气污染物，但规模和排放量比雄县低。

B. 地理位置距离保定市区最远

如图 6 所示，由于雄县是雄安新区三县中距离保定市区最远的一个县，如果保定市区与雄县之间存在互相影响，那么与其他两个距离更近的县也存在互相影响，因而将雄县作为雄安新区的代表最为合适。

图 6 雄安新区地理位置²³



2.3.2 关键变量设定 2：将保定市区作为雄县外域污染物的主要可能来源地

雄安新区的自然地理环境使其容易受到邻近城市空气污染的影响。由于太行山对西北风的屏障作用，山麓和冀中平原在秋冬季容易形成不利于空气污染物扩散的气象条件，致使空气污染快速积聚，形成空气重污染过程。此外，这一地区的地面气流容易受太行山脉走向的影响，风向以西南风和东北风居多。雄安新区的空气质量影响容易受到地处上风区的保定空气质量的影响。

保定中心区东距安新县界仅 10 余公里，从保定市到雄安新区起步区也只有 20 余公里。2015 年 5 月，经国务院批复，保定对市辖区进行调整，清苑和徐水撤县设区。保定市区人口由原来的 119.4 万人增加到 280.6 万人，清苑区和徐水区直接与雄安新区所在的安新县和容城县相邻。

在保定市规模以上工业中，汽车、新能源、纺织、食品和建材等五大主导行业，工业排放、燃煤烟尘、机动车污染与建筑工程扬尘以及生活污染共同构成保定的混合型空气污染源。

如图 7 所示，根据中国政府网公布中共中央、国务院 2019 年 1 月 2 日原则同意的《河北雄安新区总体规划（2018—2035 年）》，目前保定市比较核心的竞秀区、莲池区和相对边缘的清苑区均已被纳入雄安新区规划中的第二层控制区范围，未来有可能在此范围内限制生产和居民生活。这一政策是否有意义、控

²³ 《河北雄安新区规划纲要》，中共河北省委、河北省人民政府，2018 年 4 月。

制保定地区的生产是否是必须付出的经济代价，亟待深入研究和分析。

表 5：2017 年保定市辖区经济状况

	人口 (万)	面积 (平方公里)	GDP (亿元)	人均 GDP (元)	人口密度 (人/平方公里)
竞秀	45.8	139	184.5	40283.8	3295.0
莲池	65.5	173	477.8	72946.6	3786.1
满城	42.6	629	117	27464.8	677.3
清苑	70.9	867	163.4	23046.5	817.8
徐水	64.2	723	202.3	31510.9	888.0
合计	289	2531	1145	39619.4	1141.8

图 7 河北雄安新区城乡空间布局结构示意图



如图 1 所示，北京的污染水平远远低于雄县，而污染物浓度低的区域不可能影响污染物浓度高的区域；本研究使用的是小时级别数据，如图 6 所示，由于北京、天津等大城市距离雄安新区较远，风速较快时会吹散 PM_{2.5}，风速较慢时难以及时将污染物输送至新区，因此在不发生化学反应的污染物积累阶段，不需要考虑北京、天津等地对雄安新区的影响。

综上所述,深入研究近年来雄安新区与邻近城市空气污染过程的因果关系只需要重点关注保定市区的影响。

2.3.3 控制变量设定

根据章节 3.2.1 的研究,气象条件对 PM2.5 浓度影响较大,本文将重要的气象因素作为控制变量,它们包括 1 小时平均风速²⁴、1 小时平均风向和相对湿度。

其中,1 小时平均风向指该小时内持续时间最长的风向,风向一共有 17 个,分别是无风(C)、北向(N)、东北偏北(NNE)、东北(NE)、东向(E)、东南偏东(ESE)、东南(SE)、东南偏南(SSE)、南向(S)、西南偏南(SSW)、西南(SW)、西南偏西(WSW)、西向(W)、西北偏西(WNW)、西北(NW)和西北偏北(NNW)。

第三章 时间序列模型设定和结果比较

3.1 模型设定

3.1.1 自回归分布滞后模型(含当期项)单方程设定

本文尝试研究雄县和保定市区重要空气污染物 PM2.5 的因果关系,但计量经济学中很少见研究两个变量之间因果关系的模型。格兰杰因果检验²⁵是经济学家们最常用的“因果”检验方法,其模型设定是一段时期序列回归模型中包含了 k 个其他预测变量,其中第一个预测变量有 q_1 阶滞后,第二个预测变量有 q_2 阶滞后,以此类推²⁶:

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 Y_{t-1} + \beta_2 Y_{t-2} + \dots + \beta_p Y_{t-p} + \delta_{11} X_{1t-1} + \delta_{12} X_{1t-2} + \dots + \delta_{1q_1} X_{1t-q_1} + \dots + \delta_{k1} X_{kt-1} + \delta_{k2} X_{kt-2} + \dots + \delta_{kq_2} X_{kt-q_2} + u_t \quad (3.1)$$

²⁴ 1 小时平均风速的单位是米/秒。

²⁵ 若 X 是 Y 的格兰杰原因,则在给定模型中的其它解释变量后,再加入 X 的若干滞后项,对预测 Y 有帮助。“格兰杰因果”实际上是“格兰杰预测”。

²⁶ [美]詹姆斯·H·斯托克、[美]马克·W·沃森:《计量经济学:第2版》,孙燕译,2009年8月第1版,第408-409页。

在上式的时间序列预测中，F 统计量能够检验其中一个回归变量滞后项是否包含了模型中其他回归变量没有包含的预测内容，这被称为“Granger 因果关系检验”。但实际上，Granger 因果关系并不是指用理想化随机对照试验得到的因果效应，而仅仅是指给定回归中的其他变量后 X 是 Y 的有用预测变量，应该被称为“Granger 预测性”更为准确²⁷。因此，最常见的“格兰杰因果”事实上只是一种预测方法，不能用以探究因果关系。

因果效应的真正定义是——理想化随机对照试验的结果。在计量经济学的分析中，如果解释变量严格外生，则可以建立含当期项的自回归分布滞后（ADL）模型²⁸来探讨因果关系。采用 OLS 方法估计 ADL 模型在时间序列平稳性检验的基础上，使得单个对象在不同时间点上分别扮演处理组和对照组两种角色，从而得到类似随机对照试验的效果——动态因果效应²⁹。

由此，本文首先建立含当期项的 ADL 模型并进行 OLS 估计。具体模型设定如式（3.2）所示，其中 Y_t 为本地（雄安新区或保定市区）在 t 时刻的 PM2.5 污染水平， Y_{t-p} 为本地区域在 $t-p$ 时刻的 PM2.5 污染水平， X_t 为异地（保定市区或雄安新区）在 t 时刻的 PM2.5 污染水平， X_{t-p} 为异地区域在 $t-p$ 时刻的 PM2.5 污染水平。除此之外，控制变量还包括：以 $YWindspeed_t$ 表示的本地区域在 t 时刻的 1 小时平均风速，以 $YWinddirection_t$ 表示的本地区域在 t 时刻的 1 小时平均风向和以 $YHumidity_t$ 表示的本地区域在 t 时刻的湿度。 δ_{t-p} 的系数大小和显著性是本文最为关注的因果效应。

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 Y_{t-1} + \beta_2 Y_{t-2} + \dots + \beta_p Y_{t-p} + \delta_0 X_t + \delta_1 X_{t-1} + \delta_2 X_{t-2} + \dots + \delta_q X_{t-q} + \beta_{ws} YWindspeed_t + \beta_{wd} YWinddirection_t + \beta_h YHumidity_t + u_t \quad (3.2)$$

上述模型有严格的外生性要求，但是由于雄县和保定市区彼此紧邻，我们有充分理由怀疑雄安新区和保定市区的空气污染存在同期跨区域传输的互为因果和其他共同影响因素导致的内生性问题，因而需要考虑联立方程的模型设定以解决内生性问题。

²⁷ 同上，第 409 页。

²⁸ 同上。

²⁹ 同上，第 447 页。

3.1.2 自回归分布滞后模型（含当期项）的联立方程设定

为了便于将单方程模型和联立方程模型的估计结果进行对比，本文将动态因果效应单方程模型联立，具体模型设定如式（3.3）：

$$\begin{aligned} B_t &= \beta_0 + \beta_1 B_{t-1} + \beta_2 B_{t-2} + \delta_0 X_t + \delta_1 X_{t-1} + \dots + \delta_p X_{t-p} + \beta_{ws} B \text{Wind speed}_t + \\ &\beta_{wd} B \text{Wind direction}_t + \beta_h B \text{Humidity}_t + u_t \\ X_t &= \beta_0 + \beta_1 X_{t-1} + \beta_2 X_{t-2} + \delta_0 B_t + \delta_1 B_{t-1} + \dots + \delta_p X_{t-p} + \beta_{ws} X \text{Wind speed}_t + \\ &\beta_{wd} X \text{Wind direction}_t + \beta_h X \text{Humidity}_t + v_t \end{aligned} \quad (3.3)$$

3.2 模型估计结果

本章使用 2014 年 9 月~2015 年 7 月的样本数据进行不同模型的估计，这一时间段内雄安新区尚未进行有效的空气污染治理，且各重要变量数据齐全，用于研究雄安新区原生环境最为可靠。

3.2.1 滞后阶数选择和平稳性检验

根据时间序列数据的分析要求，本文首先确定时间序列模型的滞后阶数和进行平稳性检验。

A. 确定滞后阶数

实践中自回归阶数 k 的选取需要平衡多加入一个滞后项的边际收益和附加的估计不确定性的边际成本。一方面，如果估计的阶数太低，就可能遗漏包含在较远滞后值中的宝贵信息；另一方面，如果阶数太高，就会估计不必要的系数，从而引入额外的估计误差。

为了解决这一问题，本文使用最小化“信息准则”来估计 k ，两种估计准则分别为 AIC 和 BIC 准则，在 STATA 软件中的计算方法分别表示为：

$$\text{AIC} = -2 * \ln(\text{likelihood}) + 2 * k$$

$$BIC = -2*\ln(\text{likelihood}) + \ln(N)*k$$

其中 k 代表需要估计的参数个数， N 代表观测值数量。

保定市计算结果如表 6 所示，AIC 和 BIC 的值均在持续下降，但到滞后 4 阶时下降幅度趋于稳定，因此后文保定市 PM2.5 浓度的最高阶数确定为 4 阶。

表 6: 保定市时间序列自回归阶数选择

k	AIC	AIC降幅	BIC	BIC降幅
1	58609		58622	
2	55054	6.5%	55074	6.4%
3	52944	4.0%	52971	4.0%
4	51088	3.6%	51122	3.6%
5	49372	3.5%	49412	3.5%

雄县计算结果如表 7 所示，AIC 和 BIC 的值均在持续下降，滞后 3 阶时下降幅度最小。但是为了与保定市的回归结果保持可比，因此后文雄县 PM2.5 浓度的最高阶数也确定为 4 阶。

表 7: 雄县时间序列自回归阶数选择

k	AIC	AIC降幅	BIC	BIC降幅
1	75678		75692	
2	75327	0.47%	75348	0.46%
3	75009	0.42%	75037	0.41%
4	74687	0.43%	74721	0.42%
5	74348	0.46%	74389	0.45%

B. 平稳性检验

平稳性检验即判断历史关系是否可以应用于未来。判断准则是，如果 ADF 小于临界值，则可以应用；反之，则不可以。若数据无时间趋势，ADF 检验在 1%水平下的临界值为-3.43；若有时间趋势，则该临界值为-3.96。

本文使用 STATA 软件时间序列检验模块中自带的单位自回归根的改进

Dicker-Fuller (ADF) 检验来检验样本数据的序列平稳性，检验结果如表 8 所示——根据 ADF 检验的临界值，保定市区和雄县两地的 PM2.5 污染物时间序列均通过了平稳性检验，可以继续进行时序模型分析。

表 8： 全部样本时间序列数据平稳性检验结果

	滞后阶数	保定PM2.5时间序列		雄县PM2.5时间序列	
		ADF Test Statistic	是否平稳	ADF Test Statistic	是否平稳
全部样本	1	-14.448	是	-15.916	是
	2	-12.957	是	-15.029	是
	3	-12.667	是	-15.052	是
	4	-12.367	是	-14.530	是
	5	-12.311	是	-13.265	是

3.2.2 自回归分布滞后模型（含当期项）估计结果

自回归分布滞后模型（含当期项）的 OLS 估计结果如表 9 和表 10 所示。表 9 的估计结果显示，雄县当期 PM2.5 浓度每提高 1 微克/立方米，保定当期会提高约 0.1 微克/立方米，雄县的滞后 2、3、4 期对保定当期几乎没有影响。保定本地滞后 1 期 PM2.5 浓度每升高 1 微克/立方米，本地当期会提高约 1.27 微克/立方米；保定本地滞后 2 期 PM2.5 浓度每升高 1 微克/立方米，本地当期会降低约 0.37 微克/立方米。表 10 的估计结果显示，保定市区当期 PM2.5 浓度每提高 1 微克/立方米，雄县当期会提高约 0.28 微克/立方米，保定市区滞后 2 期 PM2.5 浓度每提高 1 微克/立方米，雄县当期会降低约 0.17 微克/立方米，保定市区的滞后 3、4 期对雄县当期几乎没有影响。雄县本地滞后 1 期 PM2.5 浓度每升高 1 微克/立方米，本地当期会升高约 0.75 微克/立方米，雄县本地滞后 2 期 PM2.5 浓度对当地几乎没有影响。

这一回归结果表明：第一、保定市区和雄县的 PM2.5 浓度受本地影响的程度比互相影响更大；第二、保定市区对雄县的影响比雄县对保定市区的影响更大；第三、雄县和保定市区的当期 PM2.5 浓度关联性很强，很可能存在内生性问题。

因此，动态因果效应的单方程 OLS 估计尚不足以说明两地之间 PM2.5 污染的因果关系。

表 9：雄县 PM2.5 浓度对保定当期的影响（OLS 估计）³⁰

解释变量	保定当期 PM2.5 浓度			
	(1)	(2)	(3)	(4)
雄县当期 PM2.5 浓度	0.0975*** (0.00730) ³¹	0.0980*** (0.00730)	0.102*** (0.00758)	0.102*** (0.00795)
雄县滞后 1 期 PM2.5 浓度	0.00371 (0.00753)	0.0167* (0.00934)	0.0138 (0.00962)	0.0111 (0.0103)
雄县滞后 2 期 PM2.5 浓度		-0.0176** (0.00753)	0.00399 (0.00950)	0.00409 (0.00988)
雄县滞后 3 期 PM2.5 浓度			-0.0315*** (0.00761)	-0.0302*** (0.00970)
雄县滞后 4 期 PM2.5 浓度				-0.000874 (0.00772)
保定滞后 1 期 PM2.5 浓度	1.277*** (0.0118)	1.276*** (0.0118)	1.269*** (0.0121)	1.261*** (0.0126)
保定滞后 2 期 PM2.5 浓度	-0.392*** (0.0112)	-0.388*** (0.0114)	-0.374*** (0.0118)	-0.365*** (0.0125)
风向	是	是	是	是
风速	是	是	是	是
湿度	是	是	是	是
观测值数量	5,954	5,954	5,706	5,475
R 平方	0.962	0.962	0.963	0.962

表 10：保定市区 PM2.5 浓度对雄县当期的影响（OLS 估计）

解释变量	雄县当期 PM2.5 浓度			
	(1)	(2)	(3)	(4)
保定当期 PM2.5 浓度	0.284*** (0.0198)	0.292*** (0.0219)	0.289*** (0.0220)	0.276*** (0.0219)
保定滞后 1 期 PM2.5 浓度	-0.155*** (0.0198)	-0.178*** (0.0351)	-0.169*** (0.0371)	-0.185*** (0.0368)
保定滞后 2 期 PM2.5 浓度		0.0172 (0.0214)	-0.0139 (0.0370)	0.0348 (0.0387)

³⁰ 星号含义为：*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1, 下同。

³¹ 括号内为标准误（standard error）。

保定滞后 3 期 PM2.5 浓度			0.0194 (0.0213)	-0.0573 (0.0369)
保定滞后 4 期 PM2.5 浓度				0.0552*** (0.0213)
雄县滞后 1 期 PM2.5 浓度	0.737*** (0.0130)	0.738*** (0.0130)	0.747*** (0.0130)	0.795*** (0.0133)
雄县滞后 2 期 PM2.5 浓度	0.0369*** (0.0129)	0.0355*** (0.0130)	0.0396*** (0.0130)	-0.00492 (0.0133)
风向	是	是	是	是
风速	是	是	是	是
湿度	是	是	是	是
观测值数量	5,954	5,954	5,706	5,475
R 平方	0.854	0.854	0.859	0.864

3.2.3 自回归分布滞后模型（含当期项）联立方程估计结果

自回归分布滞后模型（含当期项）联立方程的 2SLS 估计可以解决 OLS 估计中的内生性问题，其估计结果如表 11 和表 12 所示。表 11 的估计结果显示，雄县当期 PM2.5 浓度对保定当期没有影响，雄县滞后 1 期 PM2.5 水平每增加 1 微克/立方米，保定当期 PM2.5 浓度约上升 0.08 微克，雄县滞后 2、3、4 期的 PM2.5 水平对保定当期几乎没有影响；保定本地滞后 1 期 PM2.5 浓度每升高 1 微克/立方米，本地当期会提高约 1.28 微克/立方米；保定本地滞后 2 期 PM2.5 浓度每升高 1 微克/立方米，本地当期会降低约 0.38 微克/立方米。表 12 的估计结果显示，保定市区当期 PM2.5 浓度对雄县没有比较确定的正贡献，保定市区滞后 1 期 PM2.5 水平每增加 1 微克/立方米，雄县当期 PM2.5 浓度约上升 0.4 微克/立方米，滞后 2、3、4 期的 PM2.5 水平对雄县当期没有确定的正贡献；雄县本地滞后 1 期 PM2.5 浓度每上升 1 微克/立方米，当地当期会升高约 0.77 微克/立方米，雄县本地滞后 2 期 PM2.5 浓度每上升 1 微克/立方米，当地当期会升高约 0.28 微克/立方米。

上述回归结果表明：第一、保定市区和雄县的 PM2.5 浓度受本地影响的程度比互相影响更大；第二、保定市区对雄县的影响比雄县对保定市区的影响幅度更大；第三、在解决了内生性之后，雄县和保定市区当期的 PM2.5 浓度关联性降低，滞后项系数所代表的因果效应开始表现出来。

表 11: 保定当期 PM2.5 浓度的影响因素 (2SLS 估计)

解释变量	保定当期 PM2.5 浓度			
	(1)	(2)	(3)	(4)
雄县当期 PM2.5 浓度	0.00142 (0.0350)	0.0105 (0.0352)	0.0210 (0.0356)	-0.000793 (0.0372)
雄县滞后 1 期 PM2.5 浓度	0.0809*** (0.0285)	0.0851*** (0.0285)	0.0777*** (0.0292)	0.0970*** (0.0322)
雄县滞后 2 期 PM2.5 浓度		-0.0151** (0.00768)	0.00439 (0.00959)	0.000308 (0.0101)
雄县滞后 3 期 PM2.5 浓度			-0.0285*** (0.00780)	-0.0260*** (0.00996)
雄县滞后 4 期 PM2.5 浓度				-0.00163 (0.00784)
保定滞后 1 期 PM2.5 浓度	1.296*** (0.0139)	1.294*** (0.0139)	1.285*** (0.0142)	1.278*** (0.0142)
保定滞后 2 期 PM2.5 浓度	-0.402*** (0.0119)	-0.397*** (0.0120)	-0.384*** (0.0126)	-0.374*** (0.0130)
风向	是	是	是	是
风速	是	是	是	是
湿度	是	是	是	是
观测值数量	5,954	5,954	5,706	5,475
R 平方	0.961	0.962	0.962	0.961

表 12: 保定市区 PM2.5 浓度对雄县当期的影响 (2SLS 估计)

解释变量	雄县当期 PM2.5 浓度			
	(1)	(2)	(3)	(4)
保定当期 PM2.5 浓度	0.216*** (0.0446)	-0.0864 (0.143)	-0.176 (0.131)	-0.146 (0.124)
保定滞后 1 期 PM2.5 浓度	-0.0916** (0.0418)	0.320* (0.190)	0.457** (0.178)	0.380** (0.168)
保定滞后 2 期 PM2.5 浓度		-0.139** (0.0626)	-0.249*** (0.0758)	-0.173** (0.0724)
保定滞后 3 期 PM2.5 浓度			0.0511** (0.0238)	-0.0291 (0.0390)
保定滞后 4 期 PM2.5 浓度				0.0549** (0.0220)
雄县滞后 1 期 PM2.5 浓度	0.745*** (0.0138)	0.772*** (0.0186)	0.790*** (0.0179)	0.834*** (0.0178)

雄县滞后 2 期 PM2.5 浓度	0.0327** (0.0131)	0.0287** (0.0136)	0.0294** (0.0138)	-0.0155 (0.0141)
风向	是	是	是	是
风速	是	是	是	是
湿度	是	是	是	是
观测值数量	5,954	5,954	5,706	5,475
R 平方	0.854	0.847	0.848	0.855

3.2.4 自回归分布滞后模型（不含当期项）估计结果

前文 OLS 和 2SLS 估计结果差异较大，根据现有文献，本节建立格兰杰因果模型进行稳健性检验。

表 13 的估计结果显示，雄县滞后 1 期 PM2.5 水平每增加 1 微克/立方米，保定当期 PM2.5 浓度约上升 0.09 微克，雄县滞后 2、3、4 期的 PM2.5 水平对保定当期几乎没有影响。保定本地滞后 1 期 PM2.5 浓度每升高 1 微克/立方米，本地当期会提高约 1.29 微克/立方米；保定本地滞后 2 期 PM2.5 浓度每升高 1 微克/立方米，本地当期会降低约 0.4 微克/立方米。

表 13: 保定当期 PM2.5 浓度的影响因素（不含当期项的自回归分布滞后模型）

解释变量	保定当期 PM2.5 浓度			
	(1)	(2)	(3)	(4)
雄县滞后 1 期 PM2.5 浓度	0.0822*** (0.00480)	0.0935*** (0.00751)	0.0938*** (0.00752)	0.0940*** (0.00752)
雄县滞后 2 期 PM2.5 浓度		-0.0154** (0.00763)	0.00781 (0.00950)	0.00765 (0.00951)
雄县滞后 3 期 PM2.5 浓度			-0.0302*** (0.00763)	-0.0253*** (0.00956)
雄县滞后 4 期 PM2.5 浓度				-0.00664 (0.00752)
保定滞后 1 期 PM2.5 浓度	1.297*** (0.0119)	1.297*** (0.0119)	1.294*** (0.0120)	1.291*** (0.0122)
保定滞后 2 期 PM2.5 浓度	-0.403*** (0.0113)	-0.400*** (0.0115)	-0.392*** (0.0118)	-0.388*** (0.0121)
风向	是	是	是	是
风速	是	是	是	是
湿度	是	是	是	是
观测值数量	6,011	5,980	5,951	5,922
R 平方	0.961	0.961	0.961	0.961

表 14 的估计结果显示,保定市区滞后 1 期 PM2.5 水平每增加 1 微克/立方米,雄县当期 PM2.5 浓度约上升 0.2 微克/立方米,保定市区 PM2.5 的滞后项总得来说对雄县污染水平有正贡献;雄县本地滞后 1 期 PM2.5 浓度每上升 1 微克/立方米,当地当期会升高约 0.78 微克/立方米,雄县本地滞后 2 期 PM2.5 浓度的影响步确定,但本地滞后项的影响总得来说是正向的。

表 14: 保定市区 PM2.5 浓度对雄县当期的影响 (不含当期项的自回归分布滞后模型)

解释变量	雄县当期 PM2.5 浓度			
	(1)	(2)	(3)	(4)
保定滞后 1 期 PM2.5 浓度	0.102*** (0.00733)	0.205*** (0.0199)	0.220*** (0.0219)	0.186*** (0.0220)
保定滞后 2 期 PM2.5 浓度		-0.102*** (0.0192)	-0.162*** (0.0348)	-0.106*** (0.0365)
保定滞后 3 期 PM2.5 浓度			0.0406* (0.0210)	-0.0374 (0.0365)
保定滞后 4 期 PM2.5 浓度				0.0562*** (0.0210)
雄县滞后 1 期 PM2.5 浓度	0.789*** (0.0124)	0.766*** (0.0127)	0.779*** (0.0127)	0.824*** (0.0130)
雄县滞后 2 期 PM2.5 浓度	0.00789 (0.0126)	0.0256** (0.0129)	0.0273** (0.0129)	-0.0164 (0.0132)
风向	是	是	是	是
风速	是	是	是	是
湿度	是	是	是	是
观测值数量	6,484	6,199	5,958	5,735
R 平方	0.854	0.852	0.857	0.863

对比章节 3.2 中的三个模型,我们可以看到联立方程模型 2SLS 估计和不含当期项的自回归分布滞后模型的估计结果非常相近。从原理上来讲,联立方程模型解决了内生性问题且显示两地当期无显著的正向效应,因此不含当期项的分布滞后模型估计结果应当比较可靠,同时也更加简洁。

3.3 2016 年两地污染的互动关系变化

根据章节 3.2 的分析结果,本文认为不含当期项的自回归分布滞后模型在估计保定市区和雄县 PM2.5 污染互动关系这一问题上比较可靠和简洁,因此,为

了研究随着污染治理不断推进保定市区和雄县之间的空气污染互动关系变化,本节直接使用分布滞后模型对 2016 年全年的数据进行回归分析,并将该结果与 2014 年 9 月-2015 年 7 月的样本回归结果进行对比。需要注意的是,由于 2016 年的 1 小时平均风速数据缺失,两个样本的回归结果并不完全可比。

表 15 的估计结果显示,2016 年雄县滞后 1 期 PM_{2.5} 水平每增加 1 微克/立方米,保定当期 PM_{2.5} 浓度约上升 0.07 微克,明显低于 2014 年 9 月-2015 年 6 月的影响系数 0.09;雄县滞后 2、3、4 期的 PM_{2.5} 水平估计系数从前期样本的有正有负转为全负,也表现出 2016 年雄县对保定影响有所减弱;总体来看,2016 年雄县 PM_{2.5} 污染对保定仍存在正贡献。2016 年保定本地滞后 1 期 PM_{2.5} 浓度每升高 1 微克/立方米,本地当期会提高约 1.30 微克/立方米,略微高于前期样本的估计结果;保定本地滞后 2 期 PM_{2.5} 浓度每升高 1 微克/立方米,本地当期会降低约 0.38 微克/立方米,略微低于前期样本的估计结果,2016 年保定本地滞后项对本地当期项的影响总体高于前期样本的估计结果。

表 16 的估计结果显示,2016 年保定滞后 1 期 PM_{2.5} 水平每增加 1 微克/立方米,雄县当期 PM_{2.5} 浓度约上升 0.22 微克,略微高于 2014 年 9 月-2015 年 6 月的影响系数 0.2;总体来看,2016 年保定市区 PM_{2.5} 污染对雄县仍存在正贡献。2016 年保定本地滞后 1 期 PM_{2.5} 浓度每升高 1 微克/立方米,本地当期会提高约 0.79 微克/立方米,略微高于前期样本的估计结果;保定本地滞后 2 期 PM_{2.5} 浓度每升高 1 微克/立方米,本地当期会上升约 0.065 微克/立方米,高于前期样本的估计结果,2016 年雄县本地滞后项对本地当期项的影响总体高于前期样本的估计结果。

通过对比 2014 年 9 月-2015 年 7 月和 2016 年全年两个样本不含当期项的自回归分布滞后模型回归结果,我们可以看到:2016 年保定对雄县的污染影响有所增强,雄县对保定的污染影响明显减弱,这显示出 2016 年雄县的空气污染治理更有成效。

计量模型的分析结果需要经过实际数据进行说明和检验,下一章将通过研究保定市区和雄县 PM_{2.5} 污染物的快速积聚过程来检验本章的计量估计结果。

表 15: 保定当期 PM2.5 浓度的影响因素 (不含当期项的自回归分布滞后模型)

解释变量	样本 1: 2016 年				样本 2: 2014 年 9 月-2015 年 7 月			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
雄县滞后 1 期 PM2.5 浓度	0.0505*** (0.00307)	0.0684*** (0.00527)	0.0692*** (0.00532)	0.0687*** (0.00532)	0.0822*** (0.00480)	0.0935*** (0.00751)	0.0938*** (0.00752)	0.0940*** (0.00752)
雄县滞后 2 期 PM2.5 浓度		-0.0228*** (0.00536)	-0.0115* (0.00674)	-0.0126* (0.00677)		-0.0154** (0.00763)	0.00781 (0.00950)	0.00765 (0.00951)
雄县滞后 3 期 PM2.5 浓度			-0.0144*** (0.00535)	-0.0141** (0.00675)			-0.0302*** (0.00763)	-0.0253*** (0.00956)
雄县滞后 4 期 PM2.5 浓度				0.000143 (0.00527)				-0.00664 (0.00752)
保定滞后 1 期 PM2.5 浓度	1.314*** (0.0104)	1.307*** (0.0104)	1.305*** (0.0105)	1.306*** (0.0106)	1.297*** (0.0119)	1.297*** (0.0119)	1.294*** (0.0120)	1.291*** (0.0122)
保定滞后 2 期 PM2.5 浓度	-0.395*** (0.00993)	-0.383*** (0.0101)	-0.380*** (0.0104)	-0.380*** (0.0105)	-0.403*** (0.0113)	-0.400*** (0.0115)	-0.392*** (0.0118)	-0.388*** (0.0121)
风向	否	否	否	否	是	是	是	是
风速	是	是	是	是	是	是	是	是
湿度	是	是	是	是	是	是	是	是
观测值数量	8,161	8,074	7,992	7,911	6,011	5,980	5,951	5,922
R 平方	0.965	0.965	0.965	0.965	0.961	0.961	0.961	0.961

表 16: 保定市区 PM2.5 浓度对雄县当期的影响 (不含当期项的自回归分布滞后模型)

解释变量	样本 1: 2016 年				样本 2: 2014 年 9 月-2015 年 7 月			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
保定滞后 1 期 PM2.5 浓度	0.0863*** (0.00719)	0.226*** (0.0217)	0.225*** (0.0240)	0.234*** (0.0241)	0.102*** (0.00733)	0.205*** (0.0199)	0.220*** (0.0219)	0.186*** (0.0220)
保定滞后 2 期 PM2.5 浓度		-0.146*** (0.0212)	-0.127*** (0.0382)	-0.183*** (0.0399)		-0.102*** (0.0192)	-0.162*** (0.0348)	-0.106*** (0.0365)
保定滞后 3 期 PM2.5 浓度			-0.0158 (0.0231)	0.114*** (0.0398)			0.0406* (0.0210)	-0.0374 (0.0365)
保定滞后 4 期 PM2.5 浓度				-0.0869*** (0.0232)				0.0562*** (0.0210)
雄县滞后 1 期 PM2.5 浓度	0.794*** (0.0111)	0.783*** (0.0112)	0.779*** (0.0113)	0.778*** (0.0113)	0.789*** (0.0124)	0.766*** (0.0127)	0.779*** (0.0127)	0.824*** (0.0130)
雄县滞后 2 期 PM2.5 浓度	0.0519*** (0.0111)	0.0655*** (0.0113)	0.0682*** (0.0114)	0.0713*** (0.0115)	0.00789 (0.0126)	0.0256** (0.0129)	0.0273** (0.0129)	-0.0164 (0.0132)
风向	否	否	否	否	是	是	是	是
风速	是	是	是	是	是	是	是	是
湿度	是	是	是	是	是	是	是	是
观测值数量	8,177	8,080	7,999	7,924	6,484	6,199	5,958	5,735
R 平方	0.855	0.855	0.854	0.853	0.854	0.852	0.857	0.863

第四章 从 PM2.5 快速积聚过程再看两地污染的互动关系

随着空气质量的改善和研究思想的进步,环境经济学研究越来越推崇分析积聚过程的新方法³²。本文具有独特的数据优势,覆盖了 2014 年 9 月 6 日 1:00~2017 年 5 月 13 日 23:00 时间段内每个小时的 PM2.5 浓度和气象数据,可以对该时间段内的全部过程特征进行统计和分析,并与上文的时间序列分析结果相互印证。

图 8 展示了 2014 年 12 月 21 日至 24 日的 3 次 PM2.5 污染物积聚和消散的完整过程并分析了其相对应的气象条件,可以看到 PM2.5 污染物快速消散的过程往往与大风有关且存在空间上的时滞;PM2.5 污染物快速积聚的过程既有可能是由于静稳天气下的本地污染累积和外地扩散影响,也有可能是由于持续风向下的区域传输影响,持续风向导致的污染传输会表现出明显的时滞;PM2.5 污染物持续在某一水平上下波动的影响因素较为复杂,难以帮助我们厘清污染源头。因此,逐个分析空气质量由清洁到快速累积至高位的的积聚过程特征有助于避开干扰因素,研究 PM2.5 污染物真正的区域来源。

4.1 积聚过程的定义和分析方法

4.1.1 积聚过程定义

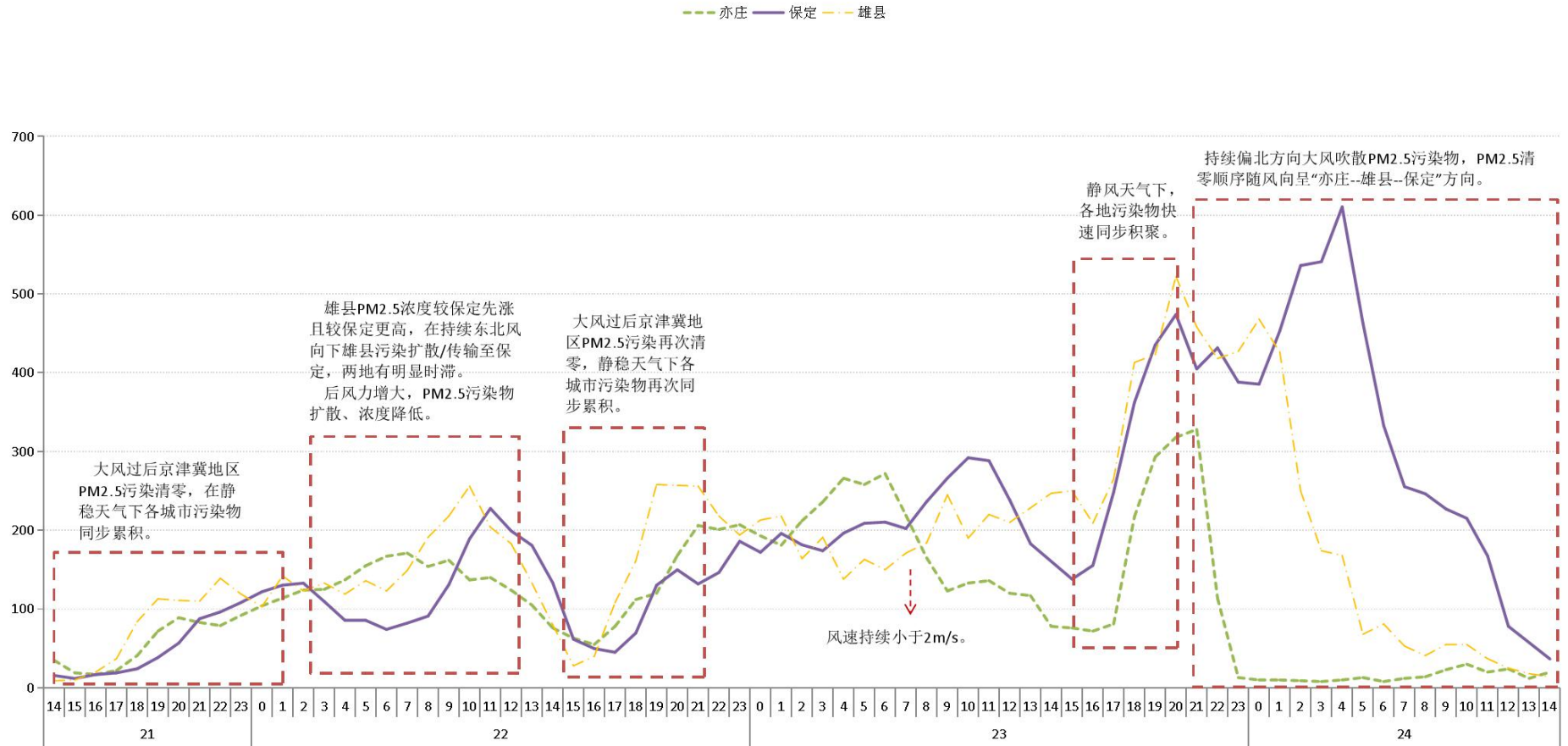
我们根据科学的标准在 2014 年 9 月 1 日至 2017 年 5 月 13 日的时间段内选取了 476 个积聚过程作为研究对象,达标过程需要在 24 小时之内满足以下两个条件:

- 1) PM2.5 质量浓度升高到 150 微克/立方米以上³³;
- 2) PM2.5 质量浓度上升幅度在 100 微克/立方米以上。

³² 贺克斌等:《大气颗粒物与区域复合污染》,科学出版社,2011年。

³³ 当 PM2.5 浓度超过每立方米 150 微克时,才可能对健康有不利影响。

图 8 2014 年 12 月 21 日 14 时至 24 日 14 时北京（亦庄）、保定和雄县三地 PM2.5 积聚和消散过程



4.1.2 积聚过程分析方法

根据因果关系判断的常识和图 8 的分析结果，本部分将两地 PM2.5 污染的因果关系判断标准确定如下：

第一、受到各学科广泛认同的因果判定准则是比较时间先后，**早的影响晚的；**

第二、自然科学研究中常用的因果判定准则是比较浓度高低，撇开化学反应，通常条件下**浓度高的地区会影响浓度低的地区。**

由此，通过统计 476 个 PM2.5 快速积聚过程中两地同步上升的比例、保定更高的比例、保定先涨的比例，能够初步判断保定对雄县、雄县对保定空气污染的互动关系。

4.2 积聚过程分布

图 9 至图 14 分别用柱状图展示了 2014 年至 2017 年间从秋季到次年春季保定和雄县 PM2.5 的积聚过程分布状况。图中纵轴表示每个积聚过程上升期末端达到的 PM2.5 浓度水平（微克/立方米）。

图 9 保定市 2014-2015 年重污染期积聚过程

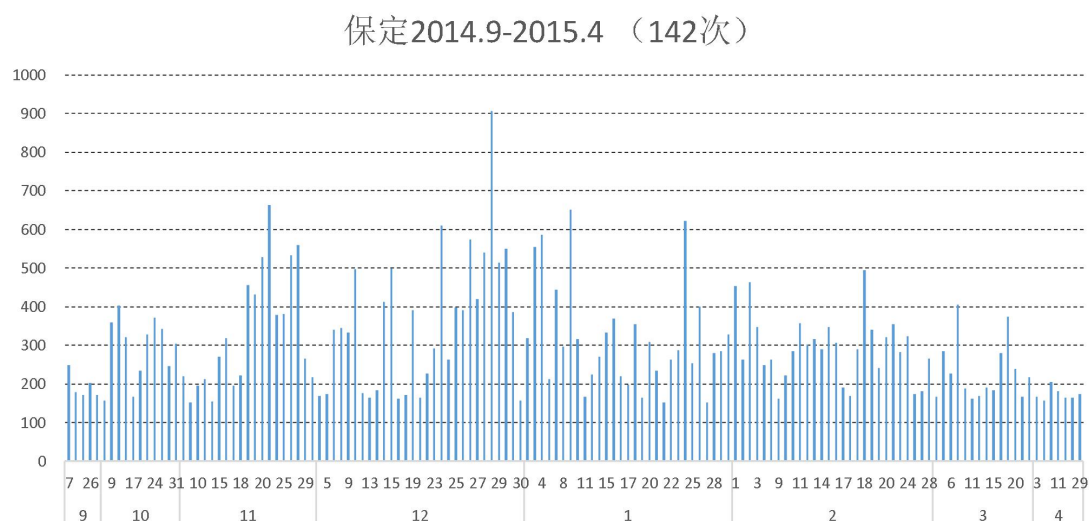


图 10 保定市 2015-2016 年重污染期积聚过程

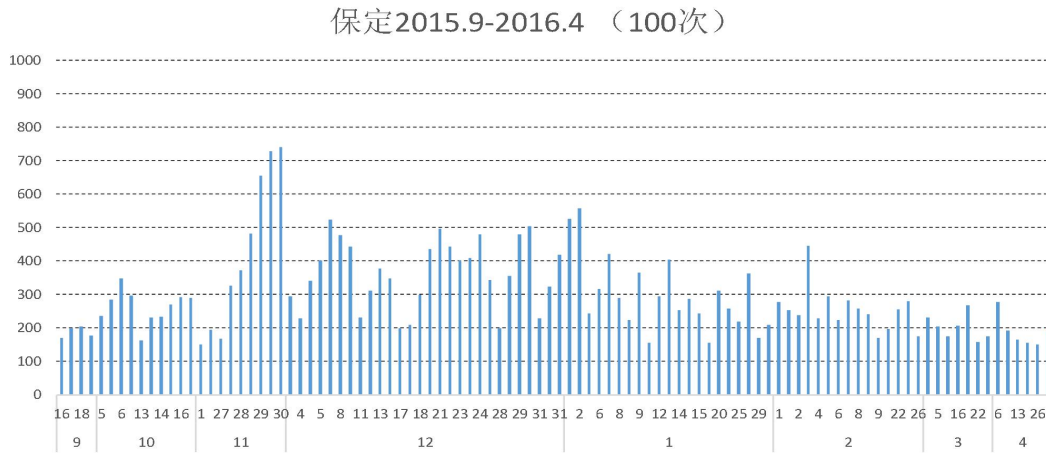
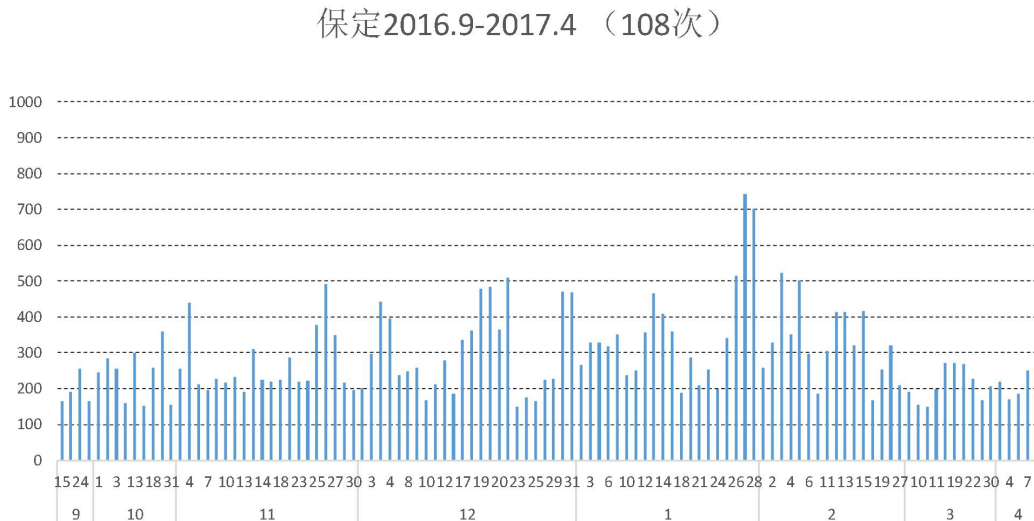


图 11 保定市 2016-2017 年重污染期积聚过程



尽管保定的积聚过程在 2015-16 年的 100 次比 2014-15 年的 142 次有明显的下降，但 2016-17 年与 2015-16 年同期的 108 次相比却略有回升。雄县的 PM_{2.5} 污染积聚过程次数则呈现出持续下降的趋势：从 2014-15 年的 179 次，下降到 2015-16 年的 123 次，再下降到 2016-17 年的 101 次。这也反映出雄县的环境治理成效更加显著。

图 12 雄县 2014-2015 年重污染期积聚过程

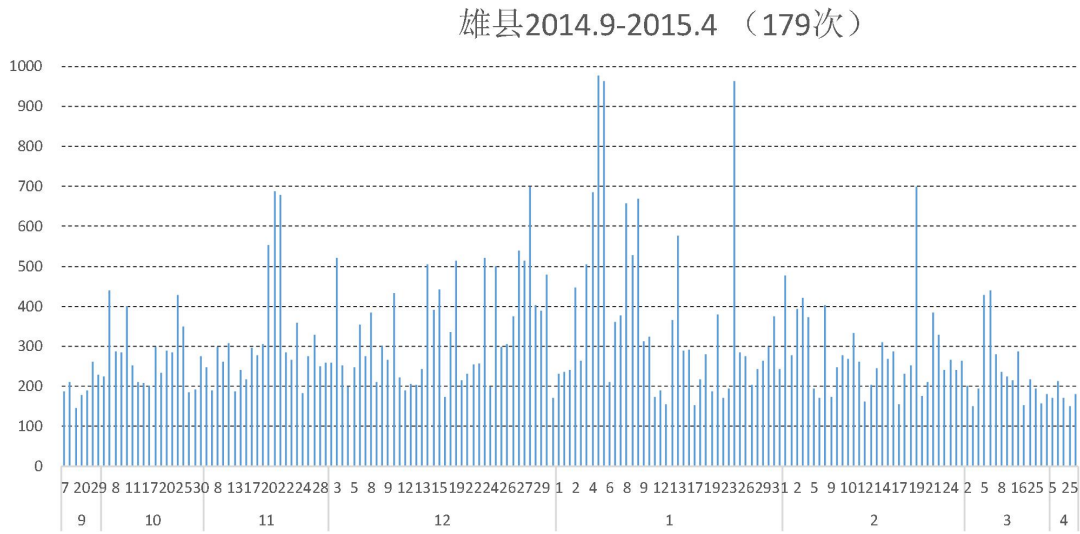


图 13 雄县 2015-2016 年重污染期积聚过程

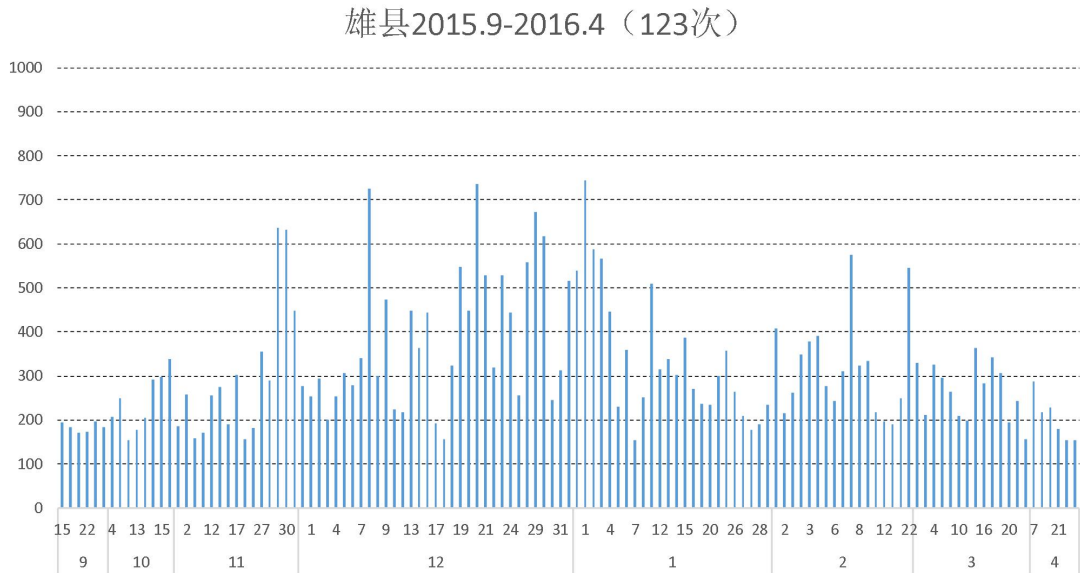
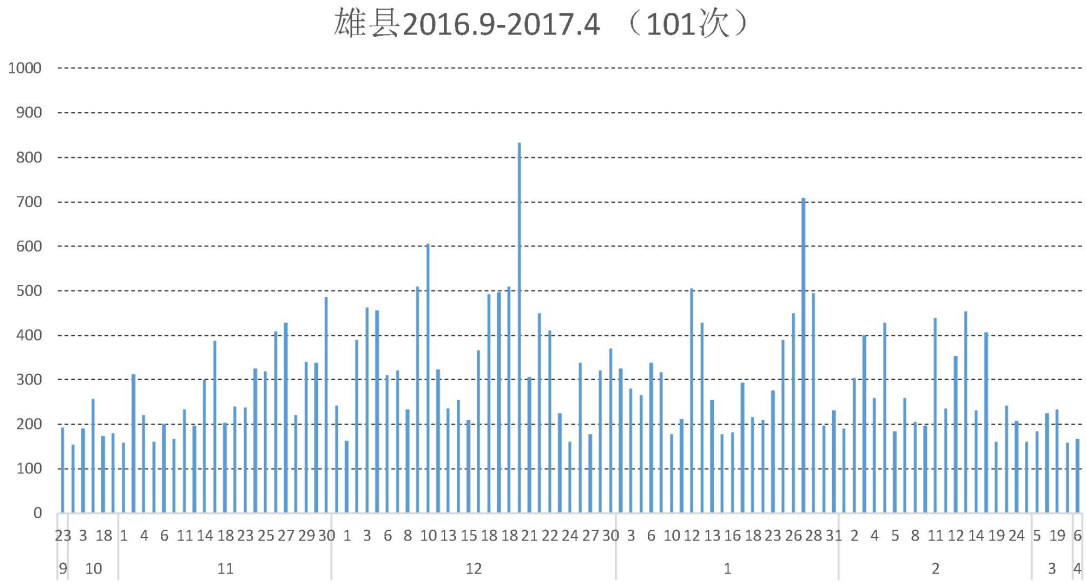


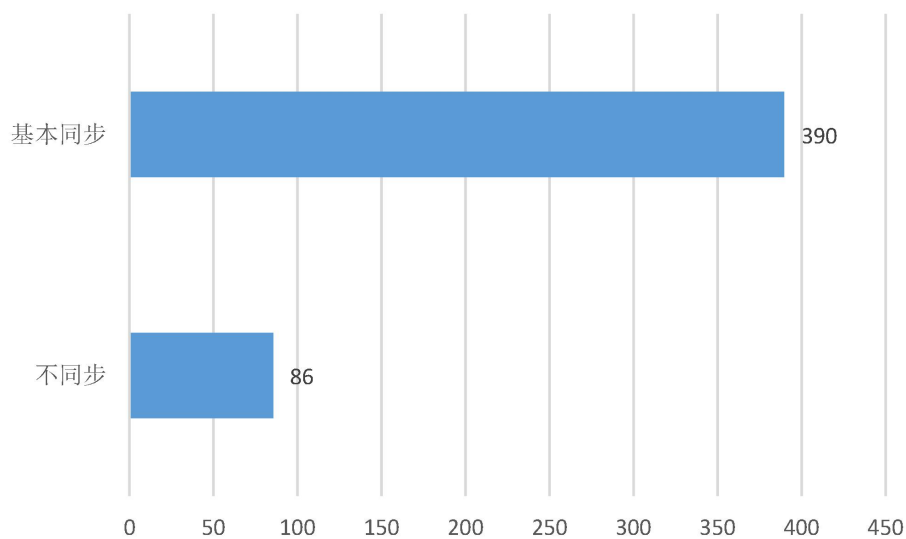
图 14 雄县 2016-2017 年重污染期积聚过程



4.3 同步积聚过程统计

如图 15 所示，在雄县与保定两地从 2014 年 9 月至 2017 年 4 月的 476 次有损健康的 PM_{2.5} 污染积聚过程中，雄县与保定两地基本同步涨落的积聚过程次数为 390 次，同步涨落占比高达 82%。

图 15 保定与雄县空气污染积聚过程同步情况



超过 8 成的两地 PM2.5 污染积聚过程为同步变化，既反映了两地的自然条件相近，表明两地生产生活的主要能源结构类似，也说明两地之间的 PM2.5 污染可能存在互动（因果）关系。

4.4 快速积聚过程特征统计

根据章节 4.1.2 给出的判断准则，我们观察记录了每次空气污染积聚过程中的 PM2.5 浓度变化时间，注意区分是雄县上涨在先，还是保定上涨在先。此外，我们还注意观察雄县和保定在每次空气污染积聚过程中 PM2.5 浓度的相对大小，区别纪录这一污染过程中的 PM2.5 浓度是“保定更高”，还是“雄县更高”。

我们还注意观察了风力方向和相对湿度的变化，将沙尘天气对 PM2.5 积聚过程的影响剔除，一共找到 434 个对应过程。表 10 概括汇总了 2014 年 9 月至 2017 年 5 月雄县和保定两地的 434 次 PM2.5 快速积聚过程的对比分析结果。

表 17： 雄县与保定两地 PM2.5 污染积聚过程分析比较³⁴

	2014-15	2015-16	2016-17	2014-17 总计
同步过程	159	99	100	358
过程总数	176	134	124	434
同步占比	90%	74%	81%	82%
同步变化条件下				
保定先涨	83	39	71	193
占比	52%	39%	71%	54%
保定更高	68	34	63	165
占比	43%	34%	63%	46%

在雄县与保定两地 PM2.5 积聚过程同步变化的前提条件下，保定率先上涨的 PM2.5 积聚过程次数约占 54%，保定 PM2.5 积聚程度更为严重的比率为 46%。说明雄县和保定的空气污染存在互为因果的相互影响模式。

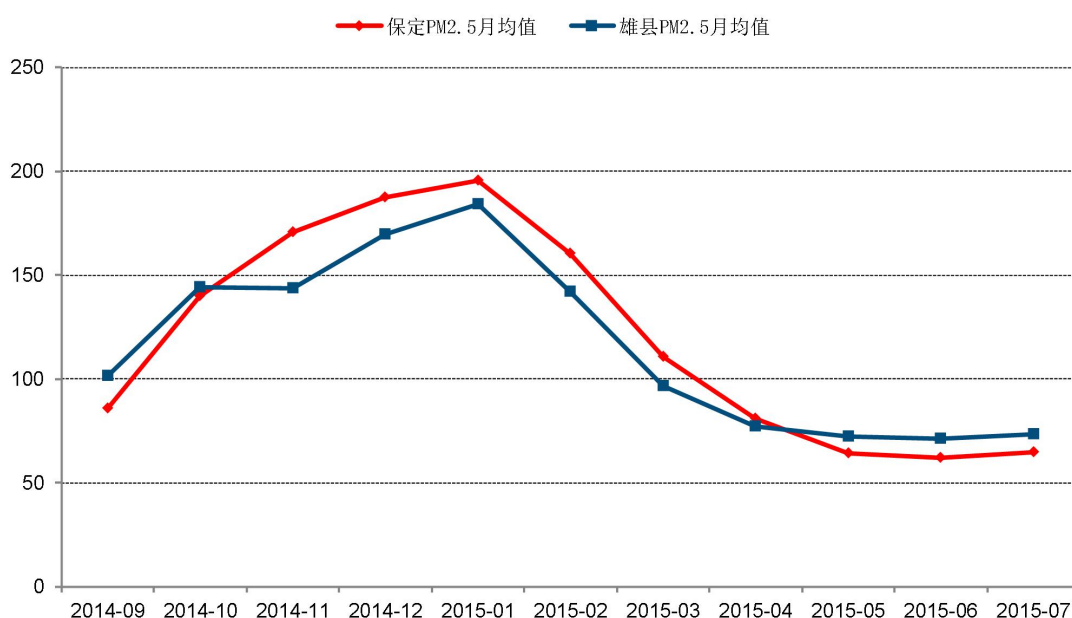
³⁴ “2014-15”代表 2014 年 9 月~2015 年 4 月，以此类推。

2014-15 年和 2015-16 年保定先涨、保定更高的比例基本在 40%左右，雄县对保定污染严重的嫌疑更重；但 2016-17 年保定先涨、保定更高的比例均大幅提升至 60%以上，显示出雄县治理效果更明显、PM2.5 污染显著减弱，保定对雄县污染的正贡献可能增强。

第五章 为什么经济落后的雄安新区空气污染如此严重？

在本研究推进的过程中，笔者发现人们经常误认为雄安新区人口密度低、经济发展水平低，空气污染水平也会由于不够密集的生产生活排放而比较低，但是根据前文的计量分析和污染过程统计，我们发现经济落后的雄县与经济发达的保定市区 PM2.5 污染程度不相上下，以 2014 年 9 月~2015 年 7 月的数据为例（图 16），经济发达、人口密集的保定市区与经济落后、人口稀疏的雄县 PM2.5 年均值和月均值几乎不相上下，在夏秋季节雄县 PM2.5 的月均值甚至会高于保定市区。

图 16 保定市区和雄县 PM2.5 浓度月均值比较（2014.09-2015.07）

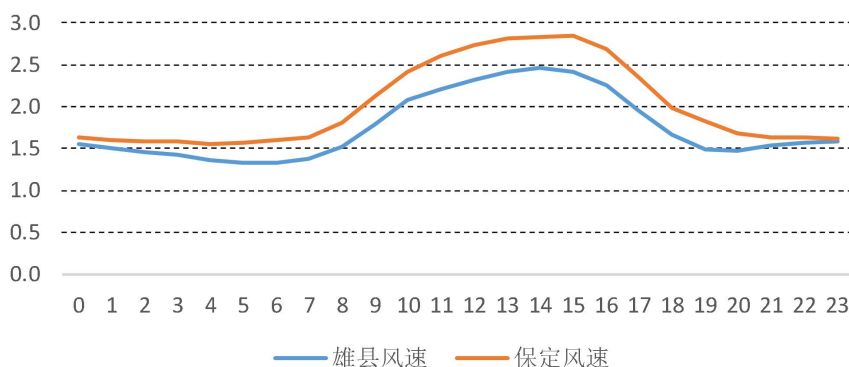


通过数据分析和实地调研，本文认为这是由自然和人为因素共同导致的：

第一、雄县的扩散条件比保定市区差。许多研究结果表明，空气中 PM2.5

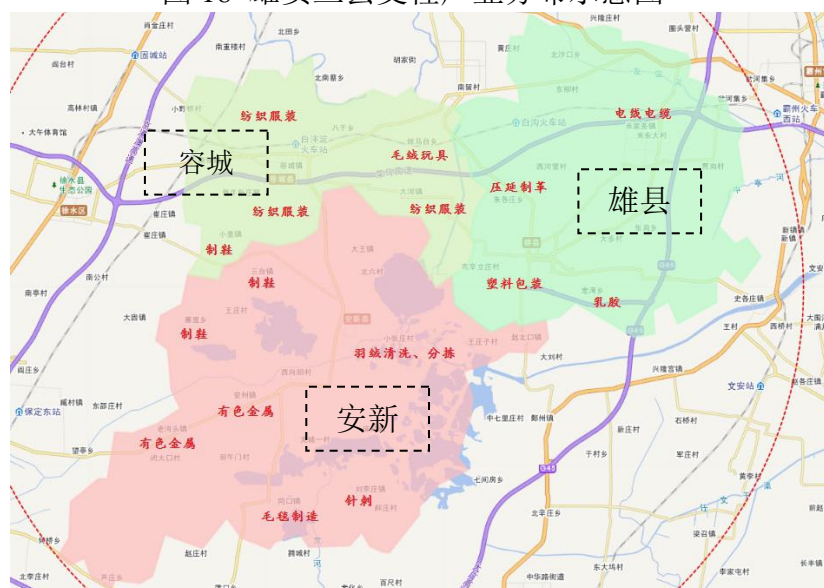
代表的细颗粒物浓度容易受风速的变化的影响，风速越高，PM2.5 越容易被吹散。因此比较 PM2.5 浓度通常需要考虑风速的差别。如图 17 所示，雄县的平均风速略低于保定，不利于雄县空气污染物的扩散。

图 17 雄县和保定 24 小时平均风速比较（米/秒）



第二、雄县的产业结构污染性很强。如图 18 所示，雄县的四大支柱产业为塑料包装、压延制革、乳胶制品和电线电缆，这四大支柱产业均对空气质量有巨大的负面影响。

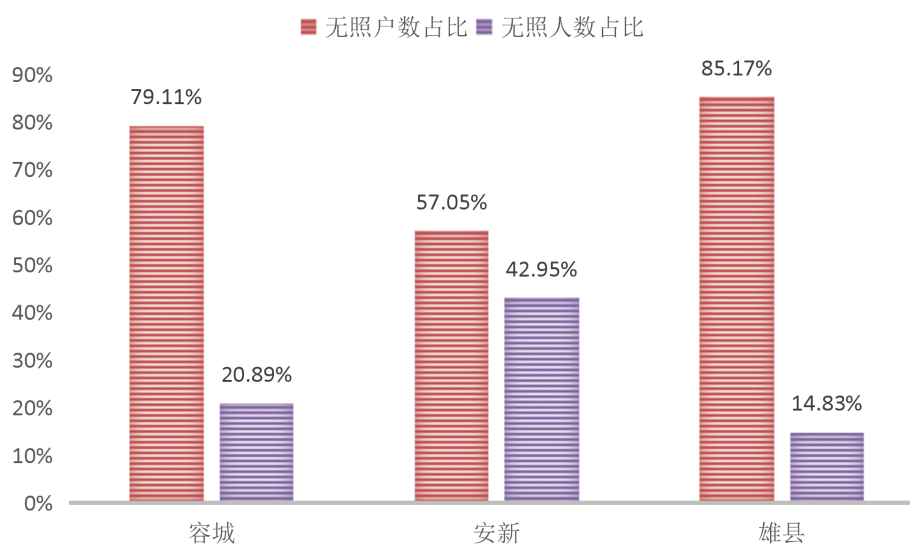
图 18 雄安三县支柱产业分布示意图³⁵



³⁵ 数据来源于国家地理信息公共服务平台和实地调研。

第三、雄安新区非正规生产的小企业众多，根据 2013 年河北省经济普查的数据，容城、安新、雄县三县的无证经营企业占比分别高达 79.11%、57.05%和 85.17%（图 19），这些企业的生产排污行为极不规范。实地调研发现，雄县县城没有营业执照的小企业大多是“散乱污”作坊，这些小企业和小作坊污染源分散，难以保证安装和持续使用环保设施，往往采取监管部门一离开就关闭环保设施的方式来规避监管、超标排放，因此单位能耗排放量大于生产相对规范的保定市区，由此导致空气污染非常严重。

图 19 雄安新区存在大量无证经营的企业³⁶和个人³⁷（2013 年）



第六章 结论

雄安新区是我国的千年大事、百年大计，新区定位于吸引高端产业和来自国内国外的高端人才，这些产业和人才对于高质量的空气和环境要求很高，建设绿色雄安对于新区的成功至关重要。

本文作者通过长时间的数据积累掌握了保定市区和雄县县域的 PM_{2.5} 小时浓度以及两地的天气数据，发现雄安三县尤其是雄县的空气污染水平在很多时刻甚至高于经济更加发达、人口更加密集的保定和北京市区。为了给雄安新区的空

³⁶ 指无证经营的法人单位和个体户。

³⁷ 河北省第三次经济普查数据。

气治理提出合理建议，本文提出了一个重要问题，即雄安新区的 PM2.5 污染主要源自域内自生还是域外传输。

为了解答这一问题，本文分别使用含当期项的自回归分布滞后模型单方程 OLS 估计、联立方程 2SLS 估计和不含当期项的自回归分布滞后模型对 2014-15 年和 2016 年两个样本进行估计，含当期项的 OLS 估计具有明显的内生性，联立方程模型 2SLS 估计和不含当期项的 OLS 估计结果较为一致：无论是雄县还是保定市区，本地污染物积聚对本地当期 PM2.5 污染水平的影响都大于外地的传输或扩散影响；2014-15 年两地之间空气污染互有影响，但保定市区对雄县的影响比雄县对保定市区的影响幅度更大，2016 年雄县对保定市区的影响较前期更有显著减弱，保定对雄县污染的贡献进一步增强。

本文接下来继续通过统计 PM2.5 快速积聚过程的特征印证了上述结论：超过 8 成的两地 PM2.5 污染积聚过程为同步变化，在同步变化的前提下保定率先上涨的 PM2.5 积聚过程次数约占 54%，保定 PM2.5 积聚程度更为严重的比率为 46%，说明雄县和保定的空气污染存在互为因果的相互影响模式。进一步统计发现 2014-15 年和 2015-16 年保定先涨、保定更高的比例基本在 40% 左右，但 2016-17 年保定先涨、保定更高的比例均大幅提升至 60% 以上，显示出雄县后期 PM2.5 污染显著减弱，雄县空气污染治理效果更明显，呼应了计量分析结果显示的保定对雄县污染贡献增强的结论。

根据中国政府网公布中共中央、国务院 2019 年 1 月 2 日原则同意的《河北雄安新区总体规划（2018—2035 年）》，目前保定市比较核心的竞秀区、莲池区和相对边缘的清苑区均已被纳入雄安新区规划中的第二层控制区范围，根据本文的研究结论，未来可能确实有必要在此范围内规范企业生产和人民生活行为。

最后，本文根据实地调研和数据分析提出，雄安新区自身污染严重的原因包括自然扩散条件差、支柱产业污染性强和非正规生产的“散乱污”企业多三个方面，雄安新区的环境治理仍然要首先从自身着手清理最重要的污染源头。

参考文献

- [1] 朱英：《中共中央、国务院决定设立河北雄安新区》，新华社，2017年4月1日。
- [2] 吴良镛等：《京津冀地区城乡空间发展规划研究》，清华大学出版社，2002年10月第1版。
- [3] 吴良镛等：《京津冀地区城乡空间发展规划研究二期报告》，清华大学出版社，2006年10月第1版。
- [4] 吴良镛等：《京津冀地区城乡空间发展规划研究三期报告》，2013年10月第1版。
- [5] 朱英：《中共中央、国务院决定设立河北雄安新区》，新华社，2017年4月1日。
- [6] 毛泽东：《介绍一个合作社》，1958年4月15日。
- [7] 新华网：《中科院：燃煤及机动车为京津冀强霾污染元凶》，2013年2月18日。
- [8] 国家地理信息公共服务平台，网址：<http://xaxq.tianditu.com/>。
- [9] 程念亮等：《2013年北京市PM_{2.5}重污染日时空分布特征研究》，《中国环境监测》，2015年6月。
- [10] 郑晓霞等：《降雨过程后北京城区PM_{2.5}日时空变化研究》，《生态环境学报》，2014年第23卷。
- [11] 苏福庆等：《北京边界层外来污染物输送通道》，《环境科学研究》，2004年1月。
- [12] 任阵海等：《不同尺度大气系统对污染边界层的影响及其水平流场输送》。
- [13] 刘庆阳等：《北京城郊冬季一次大气重污染过程颗粒物的污染特征》，《环境科学学报》，2014年1月。
- [14] 赵晴等：《北京及周边地区夏季大气颗粒物区域污染特征》，《环境科学》，2009年7月。
- [15] 王自发等：《2013年1月我国中东部强霾污染的数值模拟和防控对策》，2014年第44卷。
- [16] 任传斌等：《北京城区PM_{2.5}输送途径与潜在源区贡献的四季差异分析》，《中国环境科学》，2016年第36卷。
- [17] 彭应登：《中国城市PM_{2.5}污染状况及防治途径》，《中国经济报告》，2012（1）：40-44。
- [18] 孙峰等：《北京地区冬季典型PM_{2.5}重污染案例分析》，《中国环境监测》，2014年12月。
- [19] 高健等：《北京2011年10月连续灰霾过程的特称于成因初探》，《环境科学研究》，2012年11月。
- [20] 周磊等：《京津冀PM_{2.5}时空分布特征及其污染风险因素》，《环境科学研究》，2016年4月。
- [21] [美]詹姆斯·H·斯托克、马克·W·沃森：《计量经济学》，上海人民出版社，2009年第2版，第463页。

[22] 贺克斌等, 《大气颗粒物与区域复合污染》, 科学出版社, 2011 年。

致谢

感谢我的导师胡大源老师。从本科开始胡老师就给了我很大的帮助和支持，在这篇论文写作期间胡老师更是展示了他严谨的治学态度的极强的责任心。

感谢北大国发院的王敏老师，他慷慨地赠予天气数据并对研究方法给出了各种修改建议，使这项研究得以如期完成。

感谢我的父亲刘海青先生和母亲霍玉萍女士。通过几年的思考和比对，我渐渐发现世界上几乎不可能有完美的教育，每一种培养模式都有其优势和劣势，我非常庆幸自己有一对价值观如此相同且如此坚定的父母，给了我能够立足于这个社会的能力和无尽的爱。

感谢我在衡水中学的班主任郝会锁老师。他面对北京高中开出的优惠条件毫不动心，坚持在贫困的衡水地区传道受业；他没有坐在自己衡水中学副校长的位置上止步不前，而是毅然远离妻儿奔赴新疆西藏苦寒之地支援教育。他传授给学生的不只是应对高考的知识和技巧，更重要的是他让我明白了“自信”的含义——在任何时候都要认清那个真实的你自己，无论身处高潮或是低谷。

感谢邱晗同学，他参与了本论文的多项研究工作，对我的论文提出了许多建设性意见，并时刻在我最需要的时候伸出援手。

感谢国发院的老师们，你们所创造和传播的知识真正对我产生了正外部性；感谢国发院师兄师姐和同级们的支持和陪伴；感谢我的舍友们和孔晓婷同学，我深知自己是一个麻烦的人，为我对你们的每一次打扰致歉。

感谢北京大学的培养，七年的北大生涯，虽有遗憾但绝无后悔。我将带着母校的教养和希冀，努力创造历史、不忘初心。

北京大学学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明： 所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

论文作者签名： 日期： 年 月 日

学位论文使用授权说明

(必须装订在提交学校图书馆的印刷本)

本人完全了解北京大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，即：

- 按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；
- 学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并提供目录检索与阅览服务，在校园网上提供服务；
- 学校可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文；
- 因某种特殊原因需要延迟发布学位论文电子版，授权学校一年/两年/三年以后，在校园网上全文发布。

(保密论文在解密后遵守此规定)

论文作者签名： 导师签名：

日期： 年 月 日