

长三角城市群空间功能分工对雾霾污染的影响效应研究¹

黎文勇^{1,2}

(1. 河南师范大学商学院, 河南新乡 453007;

2. 河南师范大学产业结构转型升级软科学研究基地, 河南新乡 453007)

【摘要】:城市群空间功能分工是区域分工的高级形式,探究其对雾霾污染的影响机制对于促进城市群可持续发展具有重要意义。在阐述城市群空间功能分工影响雾霾污染的机理基础上,利用长三角城市群面板数据进行了实证分析。研究发现:城市群空间功能分工引致的城市功能专业化增强对区域雾霾污染有显著抑制作用,提高城市功能专业化程度不仅有助于降低本地区的雾霾污染水平,对邻近地区的雾霾污染也有抑制作用。城市群空间功能分工的减霾作用在中心城市组、非中心城市组、非G60科创走廊城市组的检验中均成立;相对于中心城市,非中心城市的功能专业化程度提高对雾霾污染的抑制作用更大。城市群空间功能分工主要通过产业结构升级效应和劳动力禀赋效应降低区域雾霾污染。最后从构建功能互补发展格局等方面阐述了政策启示。

【关键词】:长三角城市群;功能分工;雾霾污染;空间效应

【中图分类号】:F127 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004- 8227(2023)01- 0040- 11

【DOI】:10.11870/cjlyzyyhj202301004

我国已基本形成以京津冀城市群、长三角城市群和珠三角城市群为代表的“19+2”城市群格局,顶层设计推动下各城市群经济快速发展,在支撑全国经济增长、参与国际竞争合作等方面的作用也日益凸显。据统计,京津冀城市群、长三角城市群和粤港澳大湾区2020年的GDP分别为8.5、23.7和11.4万亿元,合占全国比重达44%。然而,由于城市规划“千城一面”、发展方式粗放,各城市群内部普遍存在城市功能布局同质化、合作松散无序、环境污染严重等问题。城市功能布局同质化无疑会抑制区域产业分工深化,加剧产业同构和同质化竞争,导致资源错配和生态环境恶化,影响城市群的可持续发展。

为推动城市群高质量发展,我国政府把优化城市功能分工和保护生态环境作为培育和发展城市群的主要任务和重要突破口。国家层面,国家发展和改革委员会于2019年印发《关于培育发展现代化都市圈的指导意见》,提出以推动都市圈内各城市间专业化分工协作为导向,推动中心城市产业高端化发展,夯实中小城市制造业基础,促进城市功能互补,强化生态环境共保共治。区域层面,《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》提出“加强产业分工协作,形成错位发展,中心区加快非核心功能疏解,重点发展总部经济、研发设计等“清洁”环节,中小城市承接制造业产业转移;推进环境协同防治,减少PM2.5等排放”的要求。

¹ 收稿日期:2022- 02- 24; 修回日期:2022- 04- 02

基金项目:河南省高校人文社会科学研究一般项目(2022- ZZJH- 250); 河南师范大学博士科研启动项目(5101089171163)

作者简介:黎文勇(1989 ~),男,讲师,主要研究方向为空间分工与绿色发展. E- mail: wyli0605@163. com

城市群空间功能分工是结合区域总体规划和各城市比较优势，统筹赋予群内各城市主要承担某项或若干项城市功能的一种分工形式^[1]。城市群空间功能分工是区域分工的高级形式，表现为总部经济、研发设计、销售等“清洁”产业环节加速向软硬基础设施较好的中心城市集聚，冶炼、加工、制造等“污染”产业环节向生产要素成本较低的边缘城市转移的过程^[2]。累积因果循环机制作用下，中心城市的生产制造功能逐渐弱化而管理服务功能持续增强，产业以“清洁”的生产性服务业为主，边缘城市的生产制造功能显著增强^[3]，逐渐成为“污染”产业的主要集聚地。

在我国正面临资源约束趋紧和以雾霾为代表的大气污染日益严峻的背景下，城市群空间功能分工加速“污染”产业环节和“清洁”产业环节的空间格局重塑，必将深刻影响城市群的可持续健康发展。由此产生疑问：城市群空间功能分工到底是加重区域的雾霾等大气污染，还是有助于缓解雾霾等大气污染；城市群功能分工通过何种机制影响雾霾等大气污染，这是否存在空间溢出效应等。遗憾的是，这些亟待回答的问题仍缺乏理论和实证分析。本文尝试剖析城市群空间功能分工影响雾霾污染的机理，并以长三角城市群为案例进行实证研究。

1 理论机制分析

1.1 城市群空间功能分工的理论分析

城市群空间功能分工是区域分工领域的研究热点之一。新经济地理学代表人物克鲁格曼基于边际收益递增、不完全竞争与“冰山”运输成本假定，建立了一个存在多区域、两部门(工业和农业)的核心-边缘(CP)模型，探讨了一个均质的经济系统如何演化为工业核心区和农业边缘区分工的格局。CP模型中，工业区承担制造品生产，农业区从事农业生产活动，两地区在空间上呈现功能互补状态。Villar等^[4]将生产服务部门纳入CP模型，探讨了农业、制造业、生产性服务业等异质型产业的区位选择，认为生产性服务业具有向软硬基础设施较好的中心城市集聚，制造业具有向生产要素成本低的边缘城市扩散的动机。得益于交通设施完善、通信技术发展及广泛应用带来运输成本和企业职能部门空间分离产生的沟通、协调、管理等成本大幅下降，生产服务部门正加速向中心城市集聚，而生产制造部门也持续向边缘城市扩散^[5,6]。累积因果循环机制作用下，中心城市的生产制造功能逐渐弱化而生产服务功能趋于增强，边缘城市的生产制造功能持续增强，并在地理空间上呈现中心城市专注于生产服务功能和边缘城市专门承担生产制造功能的功能分工格局^[2,3,7]。

功能分工本质上属于产业价值链分工，其演化深刻影响区域的可持续健康发展。由于产业价值链上的总部管理、研发、设计、销售等相对“清洁”环节和加工、制造、冶炼等“污染”环节的区位选择偏好不同，前者倾向于向中心城市集聚，而后者趋向边缘城市分散。城市群空间功能分工深化将加速产业价值链上的“污染”环节和“清洁”环节的空间布局重塑，进而对区域经济增长和雾霾等大气污染有重大影响。在对经济增长影响方面，有研究表明，城市群空间功能分工通过发挥功能互补效应、集聚效应、竞争效应和选择效应促进生产率提升和经济增长^[8,9]。在对环境污染影响方面，仅有的少量文献从空间功能分工引致的专业化集聚视角，间接探讨了空间功能分工对环境污染的影响。毛熙彦等^[10]指出，专业化集聚带来的拥挤效应会减少“污染”产业环节进一步集聚的收益，从而有助于避免其所在区域朝着污染专业化方向发展。寇冬雪^[11]指出，专业化集聚导致创新动力不足会抑制绿色环境效率提升。

1.2 城市群空间功能分工影响雾霾污染的作用机制

城市群空间功能分工是区域分工的高级形式，其深化对于城市群的可持续健康发展有重要影响。本文认为，城市群空间功能分工至少可以通过以下机制影响地区的雾霾污染：

首先，城市群空间功能分工通过产业结构升级效应影响地区雾霾污染。城市群空间功能分工有助于增强中心城市生产性服务功能和边缘城市生产制造功能，促使各城市形成并通过发挥各自的功能专业化优势和整体功能互补优势嵌入全球生产网络，更大程度参与全球价值链中高端环节的分工协作，推动城市群城市产业结构合理化、高级化和绿色化发展，进而实现能源结构优化升级和资源配置效率提升，降低雾霾污染。有研究指出，都市圈内各城市依据其所属层级在圈内承担相应职能^[12]，即各城市

功能互补。推动城市间形成功能互补的新型产业分工体系，有助于消除和缓解区域产业发展中的恶性冲突^[13]，促进产业可持续健康发展。更为关键的是，城市群空间功能分工有助于增强群内城市功能专业化程度，提高城市体系吸引价值链高端功能的竞争力^[14]，使各城市在对外贸易和吸引外资中处于有利地位。由于对外贸易和 FDI 等活动隐含着知识和技术溢出，扩大对外贸易和引进优质外资项目有助于促进区域产业结构转型升级^[9]，提高资源配置效率和能源利用效率，降低区域雾霾污染。程中华等^[15]研究发现，在工业化中后期阶段，产业结构高级化和合理化发展具有较强的雾霾减排效应。范庆泉等^[16]基于不同视角也得到类似结论。

其次，城市群空间功能分工通过劳动力禀赋效应影响地区雾霾污染。城市群空间功能分工深化带来的劳动力禀赋提升，可以使各个城市更大程度上获得知识和技术溢出，促进资源优化配置和能源效率提升，降低地区雾霾污染。城市群空间功能分工强调结合区域发展规划和各城市比较优势，统筹赋予群内各城市主要承担某项或若干项城市功能。城市群空间功能分工有助于强化群内城市间的互动联系，加速劳动力等要素跨区域流动。竞争选择机制使得只有高技能劳动力得以保留在中心城市^[17]，随着城市群空间功能分工的深化，中心城市劳动力禀赋必然提升。而这无疑会提升中心城市发展总部经济、研发设计等“清洁”产业链环节的比较优势，助其嵌入全球价值链中高端环节，更大程度获得知识和技术溢出，提升资源配置效率和能源利用效率，抑制雾霾污染。同时，城市群空间功能分工为非中心城市承接中心城市的非核心功能疏解创造了机会，非中心城市通过与中心城市进行产业分工协作及空间互动，获得知识和技术溢出，实现人力资本积累，而人力资本水平提升有助于减轻要素市场的扭曲和错配^[18]，降低区域雾霾污染^[19]。

再次，城市群空间功能分工通过推动区域环境协同治理进而抑制雾霾污染。城市群空间功能分工增强了区域城市间的产业分工协作，为区域协同治理雾霾等环境污染创造有利条件。我国的雾霾污染已呈现出发生频率高、蔓延速度快、影响范围广、危害性大等特点，雾霾污染极易由局部城市蔓延至整个城市群，仅依靠单边或局部治理很难从根本上、彻底地解决雾霾污染问题，治理雾霾污染需要各城市共同参与。有学者指出，跨越省际边界的合作是未来环境治理政策的突破方向，应强化区域政府间的合作^[20]。城市群空间功能分工有助于消除和缓解区域发展恶性冲突，增强城市间的产业分工协作，从而为府际之间的交流合作创造有利条件，推进区域协同治理雾霾污染。由于地理上的邻近性，城市群空间功能分工深化带来的城市功能专业化优势，往往具有空间溢出效应^[21]。中心城市通过提高功能专业化程度嵌入全球生产网络，更大程度参与全球价值链中高端环节分工协作。这不仅有助于其自身产业结构优化升级，还辐射带动与其相邻的非中心城市的产业结构优化升级，结果是整个区域实现产业结构优化升级，这必然有助于降低雾霾污染。

2 研究设计与数据说明

2.1 计量模型设定

为考察城市群空间功能分工对雾霾污染的影响，参考已有研究，本文设定如下面板模型：

$$\ln PM_{2.5it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln fdd_{it} + \delta Control_{it} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中： $\ln PM_{2.5it}$ 是城市雾霾污染； $\ln fdd_{it}$ 是城市功能专业化指数； $Control_{it}$ 是一组控制变量； ε_{it} 是随机误差项。

根据前文理论机制分析，为了考察城市群空间功能分工对雾霾污染影响的作用机制，本文参照温忠麟等^[22]检验中介效应的方法，设定如下计量模型：

$$\ln\text{PM}_{2.5it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln\text{fdd}_{it} + \delta \text{Control}_{it} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$W_{it} = \partial_0 + \lambda \ln\text{fdd}_{it} + \delta \text{Control}_{it} + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

$$\ln\text{PM}_{2.5it} = \alpha_0 + \sigma \ln\text{fdd}_{it} + \theta W_{it} + \delta \text{Control}_{it} + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中： W_{it} 是中介变量，包括产业结构高级化和劳动力禀赋两个中介变量； $\ln\text{fdd}_{it}$ 、 $\ln\text{PM}_{2.5it}$ 等变量的定义与前文一致。

为考察城市功能专业化程度提升是否影响其邻近城市的雾霾污染，即为了验证城市群空间功能分工的雾霾减排效应是否存在空间溢出效应，本文设定如下空间杜宾模型(SDM)：

$$\begin{aligned} \ln\text{PM}_{2.5it} = & \alpha + X_{it}\beta + \rho \sum_{j=1}^N W_{ij} \ln\text{PM}_{2.5it} + \\ & \theta \sum_{j=1}^N W_{ij} X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (5)$$

式中： $\ln\text{PM}_{2.5it}$ 为雾霾污染； X_{it} 为核心解释变量和控制变量的集合； W_{ij} 是行标准化处理后的地理距离倒数空间权重矩阵； $W_{ij}\ln\text{PM}_{2.5jt}$ 为因变量的空间滞后项； $W_{ij}X_{it}$ 为核心解释变量和控制变量的空间滞后项； μ_i 为空间固定效应； λ_t 为时间固定效应； ρ 与 θ 为空间相关系数。

可利用偏导矩阵法估计空间杜宾模型变量的直接效应和间接效应[23]，下式右边矩阵对角线元素均值表示直接效应，非对角线元素行列和的均值为间接效应。

$$\left[\frac{\partial Y}{\partial X_{1n}} \dots \frac{\partial Y}{\partial X_{Tn}} \right] = (I - \rho W)^{-1} (I\beta_n + W\theta_n) \quad (6)$$

2.2 变量选取

2.2.1 被解释变量

雾霾污染。雾霾的主要组成包括二氧化硫、氮氧化物和可吸入颗粒物(PM2.5等)。习近平总书记在在北京等地调研过程中多次强调“治理雾霾的首要任务是控制PM2.5”。因此，本文运用PM2.5浓度衡量雾霾污染程度，该数据来源于达尔豪斯大学大气成分分析组(Atmospheric Composition Analysis Group)，是经栅格处理后的浓度均值数据，单位： mg/m^3 。由于二氧化硫在一定程度上也能反映雾霾污染程度，本文将工业二氧化硫排放量作为PM2.5浓度的替换变量用于稳健性检验，工业二氧化硫排放量为Eyh1。

2.2.2 核心解释变量

城市功能专业化指数。借鉴赵勇等^[24]、黎文勇等^[21]的思路方法，利用城市功能专业化指数衡量城市群空间功能分工水平，城市功能专业化的测算公式为：

$$fdd_{it} = \frac{\sum_{k=1}^n LM_{ikt} / \sum_{j=1}^z LP_{ijt}}{\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m LM_{ikt} / \sum_{j=1}^z \sum_{i=1}^m LP_{ijt}} \quad (7)$$

式中：k 和 j 为产业类型； $\sum_{k=1}^n LM_{ikt}$ 和 $\sum_{j=1}^z LP_{ijt}$ 为 t 时期 i 城市的生产性服务功能就业人数和生产制造功能就业人数；

$\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m LM_{ikt}$ 和 $\sum_{j=1}^z \sum_{i=1}^m LP_{ijt}$ 为 t 时期城市群生产性服务功能总就业人数和生产制造功能总就业人数。本文将采矿业、电力煤气及水生产供应业、制造业界定为生产制造部门，表征生产制造功能；交通运输及邮政业、金融业、信息传输、计算机服务和软件业、租赁和商业服务业以及科研、技术服务和地质勘查业界定为生产服务部门，表征管理服务功能。

2.2.3 控制变量

结合已有研究，本文选取经济发展水平、公路网密度、外商直接投资、政府干预、贸易开放、信息化水平、公共汽(电)车营运车辆、年降雨量等控制变量。经济发展水平用人均 GDP 衡量，记为 Rgdp。公路网密度用公路里程与行政区域土地面积之比衡量，记为 Net。外商直接投资用实际利用外资额与 GDP 之比衡量，记为 Fdi。政府干预用非教育科技财政支出占财政总支出比重衡量，公式： $[\text{财政支出总额} - (\text{财政教育支出} + \text{财政科技支出})] / \text{财政支出总额}$ ，记为 Govern。贸易开放用进出口总额与 GDP 之比衡量，记为 Open。信息化水平用人均电信业务收入衡量，记为 infor。由于人们的出行方式会影响雾霾污染，一个地区的公共交通营运能力越强，该地区的人们就越有可能选择乘坐相对“环保”的公共汽车等出行方式，而这有助于减轻当地大气污染，本文使用市辖区公共汽(电)车营运车辆数量作为公共交通营运能力的代理变量，记为 ggjt。气候因素同样会影响 PM2.5 浓度，本文选择年降雨量衡量气候变化情况，记为 jshl。

2.2.4 中介变量

根据理论机制分析，本文选取产业结构高级化、劳动力禀赋作为中介变量。产业结构高级化又称产业结构高度化，“经济服务化”是它的一个重要特征，参考苏方林等^[25]做法，采用第三产业与第二产业之比衡量产业结构高级化，记为 struct。一般而言，劳动力禀赋越高，工资水平也越高，借鉴汪伟等^[26]思路，采用职工平均工资作为劳动力禀赋的代理变量，记为 wage。

2.3 数据说明与统计分析

首先，数据说明。本文中的长三角城市群是《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》中提出的上海、宣城等 27 个城市，数

据为 2011~2018 年的面板数据。除 PM2.5 数据来源于达尔豪斯大学大气成分分析组，其它数据来源于《中国城市统计年鉴》、各省市统计年鉴和统计公报，缺失数据用相邻年份数据均值插补。对各变量取对数处理，描述统计结果见表 1。

其次，图 1 是 2011~2018 年长三角城市群城市功能专业化指数均值及雾霾污染均值排序。(1)从功能专业化指数来看，长三角四大中心城市上海、南京、杭州、合肥的功能专业化指数排序均在前六位，而包括宁波、无锡、苏州等“副中心”在内的其余大部分城市的功能专业化指数均低于 1，这意味着长三角城市群中心城市生产服务功能相对较强，而其余大部分城市目前更多是承担生产制造功能或部分生产服务功能。(2)从雾霾污染来看，长三角四大中心城市中，只有合肥的 PM2.5 浓度排序在前十名，排在前十的其他城市大多属于“边缘”城市，如镇江、马鞍山、铜陵等。而上海、南京、宁波等市的 PM2.5 浓度相对较低。

表 1 变量描述统计

变量符号	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
lnPM2.5	216	3.827	0.283	3.000	4.248
lnfdd	216	-0.229	0.547	-1.356	0.919
lnRgdp	216	11.190	0.453	9.982	12.070
lnNet	216	0.332	0.262	-0.384	0.811
lnFdi	216	-3.731	0.757	-6.250	-2.373
lnGovern	216	-0.245	0.0458	-0.363	-0.137
lnOpen	216	-1.199	0.833	-3.109	0.595
lninfor	216	7.033	0.647	4.241	8.331
lnstruct	216	-0.122	0.340	-1.163	0.853
lnwage	216	11.030	0.266	10.410	11.870
lnggjt	216	7.271	1.078	5.094	9.771
lnjshl	216	7.216	0.253	6.622	7.871
lnEyhl	216	10.330	0.908	7.239	12.260

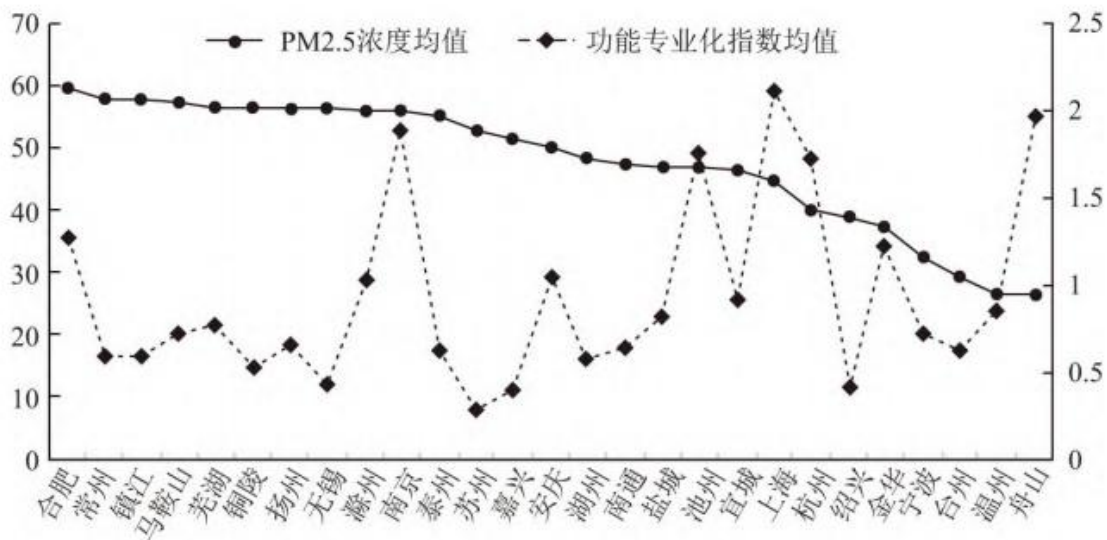


图 1 2011~2018 年长三角城市群城市功能专业化指数与雾霾污染情况

Fig. 1 Urban function specialization index and haze pollution in Yangtze River Delta urban agglomeration during 2011-2018

3 实证结果分析

3.1 基准回归结果及分析

豪斯曼检验结果(567.61***)支持选择固定效应模型。表 2 中,列(1)考察了加入核心解释变量和控制变量的情形,结果显示城市功能专业化与雾霾污染呈现显著的负相关。为考察 $\ln fdd$ 系数符号和显著性的稳定性,在列(1)的基础上进一步使用聚类稳健标准误进行检验,结果显示 $\ln fdd$ 依然显著为负,这进一步表明城市功能专业化与雾霾污染存在负相关关系,即城市群空间功能分工引致的城市功能专业化程度提高有助于降低区域雾霾污染。换言之,城市群空间功能分具有雾霾减排效应。

从控制变量来看,首先,经济发展水平和公路网密度的系数为负,且通过显著性检验,前者表明随着人均 GDP 的持续提高,雾霾污染会显著降低,后者表明提高公路网密度有助于降低雾霾污染。公路网密度越大,意味着城市的可达性越强,从而可以依托发达的公路网络发展低污染产业,并将污染产业转出,实现区域绿色发展。其次,公共交通运营能力的系数显著为负,意味着人们选择乘坐相对“环保”的公共汽车出行确实有助于减轻当地的雾霾污染。再次,外商直接投资、政府干预、信息化水平、年降雨量的系数为负。意味着外商直接投资所隐含的知识技术溢出有助于降低雾霾污染^[27];政府通过推动产业转型升级和增加治理雾霾财政支出提升区域环境效益^[9];信息化水平提高有助于加速知识溢出和技术扩散,提升绿色发展水平;年降雨量增多一定程度上可以降低可吸入颗粒物排放量;然而,由于系数都不显著,表明它们对雾霾污染的抑制作用在统计上是不显著的。此外,扩大对外贸易会加剧雾霾污染,这与康雨^[28]的结论一致。

3.2 城市群空间功能分工对雾霾污染影响的异质性分析

3.2.1 中心城市与非中心城市的异质性

由于中心与非中心城市的软硬基础设施、城市功能定位、产业结构等不同,城市群空间功能分工引起“清洁”产业和“污染”产业空间布局重塑,很可能导致中心城市与非中心城市的雾霾污染存在差异。本文把长三角中的直辖市、省会、副省级城

市、经济规模较大城市定义为中心(副中心)城市,包括上海、南京、杭州、合肥、苏州、宁波、无锡等城市,记为中心城市组,其余城市设定为非中心城市,记为非中心城市组。

由表 2 列(3)-(4)可知,无论是非中心城市组还是中心城市组,城市功能专业化系数均显著为负,具体系数值分别为 -0.155 和 -0.080。这表明长三角城市群空间功能分工有助于降低中心城市和非中心城市的雾霾污染,并且对非中心城市的雾霾污染的抑制作用更大。究其原因,在城市群空间功能分工深化过程中,中心城市通过发挥比较优势增强生产性服务功能,更大程度参与全球价值链中高端环节的分工协作,从而推动其产业结构优化升级,降低雾霾污染。与此同时,辐射带动与其相邻的非中心城市的产业结构优化调整,进而降低非中心城市的雾霾污染水平。从控制变量看,除 lnRgdp 和 lnggjt 的系数方向相同且通过显著性检验之外,其余变量的系数符号方向或显著性都存在一定程度差异。

表 2 全样本回归及异质性分析结果

	全样本回归		非中心城市	中心城市	非 G60 科创走廊城市	G60 科创走廊城市	
	(1)	(2)					
	FE	FE	FE	FGLS	FE	FE	
lnfdd	-0.123***	-0.123**	-0.155***	-0.080***	-0.116**		-0.059
	(-2.85)	(-2.64)	(-2.98)	(-2.70)	(-2.25)		(-0.69)
lnRgdp	-0.542***	-0.542***	-0.524***	-0.630***	-0.465***		-0.727***
	(-10.70)	(-5.44)	(-8.62)	(-7.20)	(-7.24)		(-7.40)
lnNet	-0.240***	-0.240	-0.311***	0.568***	-0.259***		-0.134
	(-2.76)	(-1.50)	(-3.34)	(13.17)	(-2.71)		(-0.48)
lnFdi	-0.038	-0.038	-0.048*	-0.039	-0.042		0.028
	(-1.63)	(-1.15)	(-1.94)	(-0.67)	(-1.62)		(0.48)
lnGovern	-0.255	-0.255	-0.616	-1.013***	-0.158		-0.459
	(-0.72)	(-0.61)	(-1.40)	(-3.27)	(-0.28)		(-0.96)
lnOpen	0.076	0.076	0.097*	-0.241***	0.115*		0.064
	(1.53)	(1.02)	(1.79)	(-5.63)	(1.90)		(0.75)
lninfor	-0.034	-0.034	-0.052*	0.544***	-0.054*		0.204*
	(-1.26)	(-1.61)	(-1.81)	(4.61)	(-1.85)		(1.76)
	-0.075**	-0.075	-0.072*	-0.230***	-0.069		-0.102

lnggjt	(-2.01)	(-1.23)	(-1.79)	(-5.57)	(-1.61)	(-1.24)
lnjshl	-0.021	-0.021	-0.034	-0.238***	-0.015	-0.026
	(-0.62)	(-0.86)	(-0.86)	(-4.98)	(-0.35)	(-0.44)
_cons	10.765***	10.765***	10.550***	9.959***	9.990***	11.555***
	(22.88)	(15.95)	(17.81)	(20.25)	(16.07)	(12.45)
robust	NO	YES	NO	NO	NO	NO
N	216	216	160	56	144	72
R2	0.663	0.663	0.653		0.620	0.800

注：***、**、*分别表示在 1%、5%和 10%置信水平上显著；括号内为 t 统计值，下同。

3.2.2 G60 科创走廊城市与非 G60 科创走廊城市的异质性

为考察城市群空间功能分工对 G60 科创走廊城市和非 G60 科创走廊城市的雾霾污染影响是否存在异质性，本文将长三角城市群 27 城市分为 G60 科创走廊城市和非 G60 科创走廊城市，前者包括上海、嘉兴、杭州、金华、苏州、湖州、宣城、芜湖、合肥 9 个城市，后者包括扬州等城市。结果见表 2 列(5)-(6)。

由表 2 可知，城市群空间功能分工的雾霾减排作用在 G60 科创走廊城市和非 G60 科创走廊城市存在一定差异性。两个分组中，尽管 lnfd 的系数均为负数，但只有非 G60 科创走廊城市分组通过显著性检验，而 G60 科创走廊城市不显著。这表明，城市功能专业化程度的提高有助于降低非 G60 科创走廊城市的雾霾污染。从控制变量看，除 lnfdi 和 lninfor 的系数符号方向不一致，其余变量的系数符号方向都相同。

3.3 城市群空间功能分工对雾霾污染影响的稳健性检验

稳健性检验有 3 种方式：(1) 为避免城市功能专业化与雾霾污染之间可能存在内生关联，采用城市功能专业化滞后一阶(L. lnfd)进行回归分析。(2) 替换被解释变量，一是将每平方公里行政面积 PM2.5(lnPPM2.5)作为被解释变量进行实证分析；二是将工业二氧化硫排放(lnEyh1)作为被解释变量用于稳健性检验。(3) 替换样本，以中原城市群为样本重新进行实证分析(列 10)，考察上述结论在不同区域是否成立。表 3 为实证结果。

表 3 稳健性检验回归结果

	避免内生关联(lnPM2.5)	替换被解释变量(lnPPM2.5)	二氧化硫排放(lnEyh1)	中原城市群样本(lnPM2.5)
	(7)	(8)	(9)	(10)
	FE	FE	FE	FE

L. lnfd	-0.132**			
	(-2.60)			
lnfd		-0.186***	-1.173***	-0.110**
		(-2.65)	(-6.48)	(-2.30)
lnRgdp	-0.545***	-0.491***	-2.523***	-0.714***
	(-9.07)	(-5.93)	(-11.84)	(-8.71)
lnNet	-0.282***	-0.296**	-1.112***	-0.071
	(-2.63)	(-2.08)	(-3.04)	(-0.63)
lnFdi	-0.042	-0.011	-0.134	0.019
	(-1.44)	(-0.28)	(-1.38)	(1.05)
lnOpen	0.118*	0.101	0.547***	-0.667*
	(1.80)	(1.25)	(2.62)	(-1.72)
lnGovern	-0.297	0.241	-2.257	0.088***
	(-0.68)	(0.42)	(-1.51)	(4.25)
lninfor	-0.040	0.010	-0.135	-0.019
	(-1.38)	(0.22)	(-1.19)	(-0.73)
lnggjt	-0.060	-0.158**	-0.350**	0.041
	(-1.33)	(-2.60)	(-2.23)	(1.42)
lnjshl	-0.027	-0.035	0.242*	0.027
	(-0.70)	(-0.61)	(1.66)	(0.74)
_cons	10.821***	1.982**	40.006***	11.540***
	(17.52)	(2.58)	(20.20)	(14.11)
N	189	216	216	232
R2	0.587	0.422	0.687	0.654

由表 3 列(7)可知, 当上一期的城市功能专业化程度提高时, 其有助于降低本期的雾霾污染。列(8)和列(9)分别为替换被解释变量的结果, 无论是使用每平方公里行政面积 PM2.5, 还是工业二氧化硫排放量作为被解释变量, 城市功能专业化指数的系数均显著为负, 意味着城市群功能分工引致的城市功能专业化程度提升有助于抑制雾霾污染。列(10)为替换样本的回归结果, 城市功能专业化(lnfd)的系数同样为负, 且通过 5%显著性检验, 意味着中原城市群功能分工也可以在一定程度上抑制雾霾污染。以上表明, 不管是替换被解释变量还是改变研究区域, 提高城市功能专业化程度均有助于降低雾霾污染。这进一步支持本研究

结论的稳健性。

3.4 城市群空间功能分工对雾霾污染影响的作用机制分析

上述分析表明城市群空间功能分具有雾霾减排效应。为了考察城市群空间功能分工是否通过产业结构升级效应和劳动力禀赋效应降低区域雾霾污染，本文运用中介效应分析方法进行实证分析。作用机制检验结果见表4。

从表4可以看出，列(12)和列(14)中的lnfdd系数均显著为正，而列(13)和列(15)中的lnfdd和中介变量(lnstruct、lnwage)的系数均显著为负，并且lnfdd系数的绝对值均小于基准模型中lnfdd系数的绝对值。前者表明城市群空间功能分工有助于促进产业结构优化升级和提升劳动力禀赋，后者表示城市群空间功能分工引致的产业结构高级化、劳动力禀赋提升对于降低雾霾污染均有积极作用，即城市群空间功能分工确实通过产业结构升级效应和劳动力禀赋效应降低雾霾污染。此外，列(16)、列(17)和列(18)是以lnEyh1为因变量的回归分析，结果也显示城市群空间功能分工通过产业结构升级效应和劳动力禀赋效应降低雾霾污染。

表4 作用机制回归结果

	PM2.5 浓度					二氧化硫排放量		
	基准回归	产业结构升级效应		劳动力禀赋效应		基准回归	产业结构升级效应	劳动力禀赋效应
	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)
	lnPM2.5	lnstruct	lnPM2.5	lnwage	lnPM2.5	lnEyh1	lnEyh1	lnEyh1
lnfdd	-0.123*** (-2.85)	0.093* (1.97)	-0.086** (-2.19)	0.081** (2.11)	-0.074** (-2.01)	-1.173*** (-6.48)	-1.050*** (-6.10)	-1.020*** (-6.06)
lnstruct			-0.398*** (-6.47)				-1.328*** (-4.92)	
lnwage					-0.601*** (-8.51)			-1.891*** (-5.86)
Control	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
N	216	216	216	216	216	216	216	216
	0.663	0.658	0.727	0.869	0.760	0.687	0.724	0.737

R2								
----	--	--	--	--	--	--	--	--

3.5 进一步讨论：城市群空间功能分工雾霾减排的空间溢出效应

本文SDM的Wald($\theta=0$)和Lratio($\theta+\beta\rho=0$)检验统计量为230.67和272.82,都通过1%显著性检验,且SDM的AIC和BIC统计值分别小于SAC的AIC和BIC统计值,意味着SDM不会退化为SAR、SEM、SAC。本文最终选择时间固定效应空间杜宾模型,结果显示,被解释变量的空间效应(Spatial rho)为0.445***,解释变量的空间溢出、直接效应、间接效应、总效应结果见表5。

表5 空间杜宾模型回归结果

	Main	Wx * Var	直接效应	间接效应	总效应
	(19)	(20)	(21)	(22)	(23)
lnfdd	-0.165***	-1.173***	-0.223***	-2.468**	-2.691**
	(-9.34)	(-7.41)	(-4.13)	(-1.97)	(-2.06)
lnRgdp	-0.111***	0.667**	-0.083*	1.223	1.141
	(-3.42)	(2.46)	(-1.80)	(1.48)	(1.33)
lnNet	0.092***	-0.824***	0.058	-1.531	-1.473
	(2.84)	(-2.91)	(1.06)	(-1.39)	(-1.29)
lnFdi	0.094***	0.318***	0.111***	0.714*	0.825**
	(9.57)	(3.98)	(6.57)	(1.81)	(2.02)
lnGovern	0.073	4.425***	0.289	9.031	9.320
	(0.45)	(2.91)	(1.14)	(1.63)	(1.62)
		-1.176***	-0.072	-2.342**	-2.414**

lnOpen	-0.018				
	(-0.95)	(-10.37)	(-1.55)	(-2.12)	(-2.10)
lninfor	0.029	0.308**	0.044	0.659	0.703
	(1.51)	(2.54)	(1.56)	(1.41)	(1.44)
lnggjt	0.052***	0.129	0.059***	0.298	0.356
	(3.86)	(1.12)	(3.02)	(0.99)	(1.13)
lnjshl	-0.010	0.859***	0.033	1.681*	1.715*
	(-0.26)	(3.76)	(0.66)	(1.85)	(1.82)

由表 5 可知，lnfdd 的直接效应、间接效应和总效应的系数均显著为负，表明城市群空间功能分工引致的城市功能专业化程度提高，不仅降低本地区雾霾污染，还有助于降低邻近地区的雾霾污染，即城市群空间功能分工的降雾霾作用具有空间溢出效应。这是因为，城市群空间功能分工引致的城市功能专业化程度提升，有助于促进各城市形成并通过功能专业化优势嵌入全球生产网络，获得先进技术和知识，进而通过利用先进技术治理本地区的雾霾污染。由于地理空间邻近，这些知识和技术会向邻近地区溢出，进而缓解邻近地区的雾霾污染。控制变量方面，纳入了空间因素后，经济发展水平、外商直接投资、贸易开放、气候变化等同样具有空间溢出效应。

4 结论与政策启示

4.1 主要结论

城市群功能分工有助于推动城市群可持续健康发展。在阐述城市群空间功能分工影响雾霾污染的机理基础上，利用长三角城市群面板数据进行了实证检验。研究发现：(1) 城市群空间功能分工引致的城市功能专业化增强对雾霾污染有显著抑制作用，不仅有助于降低本地区的雾霾污染水平，对邻近地区的雾霾污染也有抑制作用，这表明城市群空间功能分具有显著的降霾作用。(2) 异质性分析显示，无论是中心城市，还是非中心城市的功能专业化程度提高均有助于降低雾霾污染。但与中心城市相比，非中心城市的功能专业化增强对区域雾霾污染的抑制作用更大。非 G60 科创走廊城市的功能专业化程度提升也有助于降低雾霾污染。(3) 作用机制回归分析显示，城市群空间功能分工有助于促进产业结构转型升级和提升劳动力禀赋，进而通过发挥产业结构升级效应和劳动力禀赋效应降低区域雾霾污染。

4.2 政策启示

为推动城市群可持续发展，本文认为：(1) 构建功能互补发展新格局。加强顶层设计，打破惯性思维，结合国家战略和各城

市比较优势，合理规划重点产业和交通枢纽空间布局，明确各城市功能定位，推动区域形成功能互错位、优势互补的空间发展格局。中心城市要发挥软硬基础设施优势加快转移“污染”产业环节，依托新兴产业集群打造现代服务业集聚区，推动产业绿色发展；中小城市积极承接中心城市非核心功能疏解和国际制造业产业转移，以“腾笼换鸟”方式淘汰污染高产业。(2)坚持引进来走出去战略。①优化 FDI 结构。保持外资政策的持续性和便利性，营造良好的营商环境，重点引进技术含量高、效益高、环境污染低的外资项目；优化 FDI 空间分布格局。②优化对外贸易结构。改善贸易自由化和便利化条件，充分利用举办国际进口博览会等有利条件，优化进口商品结构，提高高精尖产品和服务型产品比重。同时，加大研发创新力度，提升出口产品质量，依托上海等自贸区平台，扩大商品和服务出口(黎文勇和杨上广，2019)。(3)建立成本共担和利益共享区域利益补偿机制。建立以功能分工为基础的新型产业分工体系难免会存在部分地区出于区域利益最大化而作出让步的情形，这需要依据利益补偿制度向作出让步的地区支付合理的补偿。同时，加快探索跨区域建设项目的成本分担机制，例如，涉及跨区域的基础设施、公共服务以及环境联防联控的成本分担问题，可通过成本分担的方式保障“工程”的持续推进。

参考文献

- [1] 黎文勇, 杨上广. 城市群功能分工对全要素生产率的影响研究——基于长三角城市群的经验证据[J]. 经济问题探索, 2019(5):74-81. LI W Y, YANG S G. Study on the influence of urban division functional division on total factor productivity: Based on empirical evidence of the Yangtze River Delta urban agglomeration [J]. Inquiry into Economic Issues, 2019(5):74-81.
- [2] BRUNELLE C. The growing economic specialization of cities: Disentangling industrial and functional dimensions in the Canadian urban system, 1971-2006[J]. Growth & Change, 2013, 44(3):443-473.
- [3] ANGEL S, BLEI A M. The spatial structure of American cities: The great majority of workplaces are no longer in CBDs, employment sub-centers, or live-work communities [J]. Cities, 2016, 51:21-35.
- [4] ALONSO-VILLAR O, CHAMORRO-RIVAS J M. How do producer services affect the location of manufacturing firms? The role of information accessibility [J]. Environment and Planning A, 2001, 33(9):1621-1642.
- [5] DURANTON G, PUGA D. From sectoral to functional urban specialisation[J]. Journal of Urban Economics, 2005, 57(2):343-370.
- [6] KOLKO J. Urbanization, agglomeration, and coagglomeration of service industries[M]//Agglomeration Economics. University of Chicago Press, 2010:151-180.
- [7] POTLOGEA A V. Globalization and the skilled city[J]. Journal of Urban Economics, 2018, 107:1-30.
- [8] HENDERSON J V, ONO Y. Where do manufacturing firms locate their headquarters?[J]. Journal of Urban Economics, 2008, 63(2):431-450.
- [9] 黎文勇, 杨上广. 市场一体化、城市功能专业化与经济发展质量——长三角地区的实证研究[J]. 软科学, 2019, 33(9):7-12. LI W Y, YANG S G. Market integration, urban function specialization and economic development quality: Empirical research in the Yangtze River Delta [J]. Soft Science, 2019, 33(9):7-12.
- [10] 毛熙彦, 贺灿飞. 贸易开放条件下的区域分工与工业污染排放[J]. 地理研究, 2018, 37(7):1406-1420. MAO X Y, HE C

F.Regional division of labor and its environmental performance in the context of trade liberalisation [J].Geographical Research,2018,37(7):1406-1420.

[11] 寇冬雪. 产业专业化集聚、多样化集聚与环境污染——基于中国 285 个城市的实证分析[J]. 云南财经大学学报, 2020,36(9):3-17.KOU D X.Industrial specialization agglomeration,diversified agglomeration and environmental pollution:An empirical analysis based on panel data of 285 cities in China [J].Journal of Yunnan University of Finance and Economics,2020,36(9):3-17.

[12] FRIEDMANN J.The world city hypothesis [J].Development and Change,1986,17(1):69-83.

[13] 魏后凯. 大都市区新型产业分工与冲突管理——基于产业链分工的视角[J]. 中国工业经济, 2007(2):28-34.WEI H K.The new industrial division and conflict management in metropolitan region:Based on the perspective of industrial-chain division[J].China Industrial Economics,2007(2):28-34.

[14] 贺灿飞, 肖晓俊, 邹沛思. 中国城市正在向功能专业化转型吗?——基于跨国公司区位战略的透视[J]. 城市发展研究, 2012,19(3):20-29.HE C F,XIAO X J.Towards functional specialization of Chinese Cities?:A perspective of locational strategy of multinational corporations in China [J].Urban Development Studies,2012,19(3):20-29.

[15] 程中华, 刘军, 李廉水. 产业结构调整与技术进步对雾霾减排的影响效应研究[J]. 中国软科学, 2019(1):146-154.CHENG Z H,LIU J,LI L S.Research on the effects of industrial structure adjustment and technical progress on haze reduction [J].China Soft Science,2019(1):146-154.

[16] 范庆泉, 储成君, 刘净然, 等. 环境规制、产业升级与雾霾治理[J]. 经济学报, 2020,7(4):189-213.FAN Q Q,CHU C J,LIU J R,et al.Environmental regulation,industrial upgrading and haze governance [J].China Journal of Economics,2020,7(4):189-213.

[17] 胡尊国, 王耀中, 尹国君. 选择、集聚与城市生产率差异[J]. 经济评论, 2017(2):3-16.HU Z G,WANG Y Z,YIN G J.Selection,agglomeration and disparities of urban productivity [J].Economic Review,2017(2):3-16.

[18] 陈言, 李欣泽. 行业人力资本、资源错配与产出损失[J]. 山东大学学报(哲学社会科学版),2018(4):146-155.CHEN Y,LI X Z.Industrial human capital,resource misallocation and output loss [J].Journal of Shandong University (Philosophy and Social Sciences),2018(4):146-155.

[19] 徐盈之, 蔡海亚, 严春蕾. 要素市场扭曲与我国雾霾污染防治[J]. 中国地质大学学报(社会科学版),2019,19(1):22-33.XU Y Z,CAI H Y,YAN C L.Factor market distortion and prevention of haze pollution in China [J].Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition),2019,19(1):22-33.

[20] 马捷, 锁利铭. 城市间环境治理合作: 行动、网络及其演变——基于长三角 30 个城市的府际协议数据分析[J]. 中国行政管理, 2019(9):41-49.MA JIE,SUO L M.Interlocal environmental collaboration:Actions,networks structure and evolution:Based on data analysis of intergovernmental agreements in 30 cities in the Yangtze River Delta[J].Chinese Public Administration,2019(9):41-49.

[21] 黎文勇, 杨上广. 对外开放、功能分工与中国经济增长质量——基于 282 个地级以上城市的空间杜宾模型研究[J].

经济体制改革, 2019(5):28-36. LI W Y, YANG S G. Opening to the outside world, functional division of labor and the quality of China's economic growth:Based on the research of spatial durbin model of 282 cities above prefecture level[J]. Reform of Economic System, 2019(5):28-36.

[22] 温忠麟, 张雷, 侯杰泰, 等. 中介效应检验程序及其应用[J]. 心理学报, 2004(5):614-620. WEN Z L, ZHANG L, HOU J T, et al. Testing and application of the mediation effects[J]. Acta Psychologica Sinica, 2004, 36(5):614-620.

[23] LESAGE J, PACE R K. Introduction to spatial econometrics[M]. New York: CRC Press, 2019.

[24] 赵勇, 白永秀. 中国城市群功能分工测度与分析[J]. 中国工业经济, 2012(11):18-30. ZHAO Y, BAI Y X. Measuring and analyzing the functional specialization of Chinese urban agglomeration [J]. China Industrial Economics, 2012(11):18-30.

[25] 苏方林, 黎文勇. 产业结构合理化、高级化对碳排放影响的实证研究——基于西南地区面板数据[J]. 西南民族大学学报(人文社科版), 2015, 36(11):114-119. SU F L, LI W Y. An empirical study on the impact of industrial structure rationalization and advancedization on carbon emissions:Based on panel data in southwest China [J]. Journal of Southwest Minzu University (Humanities and Social Science), 2015, 36(11):114-119.

[26] 汪伟, 刘玉飞, 彭冬冬. 人口老龄化的产业结构升级效应研究[J]. 中国工业经济, 2015(11):47-61. WANG W, LIU Y F, GUO D D. Research on effects of population aging on industrial upgrading [J]. China Industrial Economics, 2015(11):47-61.

[27] 李力, 唐登莉, 孔英, 等. FDI对城市雾霾污染影响的空间计量研究——以珠三角地区为例[J]. 管理评论, 2016, 28(6):11-24. LI L, TANG D L, KONG Y, et al. A spatial econometric analysis of impact of FDI on urban haze pollution:Case of the Pearl River Delta region[J]. Management Review, 2016, 28(6):11-24.

[28] 康雨. 贸易开放程度对雾霾的影响分析——基于中国省级面板数据的空间计量研究[J]. 经济科学, 2016(1):114-125. KANG Y. Analysis of the impact of trade openness on haze:A spatial econometric study based on China's provincial panel data [J]. Economic Science, 2016(1):114-125.