

长三角地区大气污染水平时空分布 特征及影响因素差异分析

鞠可一^{1,2} 叶钦¹ 李文慧¹ 何蕾¹¹

(1 江苏科技大学 经济管理学院, 江苏 镇江 212100;

2 南京航空航天大学 能源软科学研究中心, 南京 211106)

【摘要】: 研究采用克里金法分析长三角地区 41 市大气污染水平的时空分布特征及演变规律, 并在此基础上参考环境库兹涅茨曲线建立空间计量模型, 探究影响大气污染水平的社会经济因素。结果表明: 长三角地区 41 座城市大气污染水平的季节性和空间性特征明显, 夏季空气质量状况最好, 冬季大气污染水平较高, 且呈现从西北向东南递减的趋势; 空间回归结果显示, 城乡收入差距的扩大、民用汽车保有量和固定资产投资会使得大气污染趋于严重, 而电力化水平的提升、科技进步和政府对环境财政投入对大气污染水平的改善具有明显的促进作用; 人口密度和人均 GDP 与大气污染水平呈现显著的“N”型和倒“N”型曲线。

【关键词】: 大气污染 城乡收入差距 环境库兹涅茨曲线 空间杜宾模型

0 引言

随着中国经济结构发展转型升级, 大气污染问题逐步走入人们的视野。全球空气质量报告显示, 2020 年中国 $PM_{2.5}$ 水平仍然 3 倍于世界卫生组织年度指南标准, 大气污染问题依然严重。长三角地区是我国最重要的城市群之一, 在全国的政治、社会发展和经济运行过程中都处于重要地位。然而, 2018 年 1 月, 长三角地区出现大范围、长时间的重污染天气, 32 个城市先后出现重度污染, 8 个城市出现严重污染; 2018—2019 年秋冬季, 长三角地区 10 个城市未完成 $PM_{2.5}$ 浓度下降目标, 其中, 5 个城市同比不降反升。此外, 该区域 $PM_{2.5}$ 浓度季节性差异明显: 秋冬季重污染天气频发, $PM_{2.5}$ 平均浓度比其他季节高 50%~70%, 重污染天气占全年 95% 以上。长三角地区空气质量改善成效尚不稳固, 研究长三角地区大气污染水平的时空分布特征及其影响因素刻不容缓。

大气污染水平的量化和影响因素一直是国内外学者关注的重点问题。关于大气污染水平的量化, 部分学者着重讨论了单一污染物(如 NO_2 等)的浓度。随着我国《环境空气质量标准》的修订, 越来越多的学者采用空气质量指数(AQI)作为量化标准, 以 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、CO、 O_3 等 6 类污染物中的首要污染物作为衡量大气污染水平的标准, 一定程度上科学测度了我国主要环境污染物的排放现状, 为科学制定减排计划提供了决策依据^[1]。关于大气污染水平的影响因素, 学者们通过不同角度来选取指标, 研究其对大气污染水平的影响。在人口方面, 王素凤等研究了人口发展对大气污染的门槛效应^[2]; 在社会因素方面, 占华将收入

作者简介: 鞠可一, 管理学博士, 江苏科技大学副教授、博士生导师, 南京航空航天大学能源软科学研究中心研究员, 研究方向: 能源系统建模、决策支持; 叶钦, 江苏科技大学硕士研究生, 研究方向: 绿色经济与发展、能源-经济-环境(3E)系统建模; 李文慧, 江苏科技大学硕士研究生, 研究方向: 绿色能源与可持续发展; 何蕾, 江苏科技大学硕士研究生, 研究方向: 能源系统工程。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目——“能源要素价格扭曲: 成因、测度及适度纠偏策略研究”(项目编号: 71874073; 项目负责人: 鞠可一)成果之一

差距因素引入环境污染影响因素研究,发现收入差距增加不利于环境质量的改善^[3];在政策方面,于连超等^[4],汪克亮等^[5],李辉等^[6]分别研究了环境保护费改税、财政分权与政府创新偏好、城际联动执法对我国大气污染水平的影响。

上述针对大气污染水平及其影响因素的研究大部分围绕整体展开,缺乏区域性的指导结论。鉴于长三角地区重要区位特征以及不断推进的一体化进程,对其大气污染水平的综合测算将更有利于判断该地区的时空关联,进而提出更为合理的减排建议。基于此,本文利用长三角地区 41 市 2015—2019 年的 SO₂、NO₂、PM₁₀、PM_{2.5}、CO、O₃ 等 6 类大气污染物来建立复合指标以反映各个城市的大气污染水平,并采用空间计量模型,参考“环境库兹涅茨曲线”假说,对大气污染的社会经济影响因素进行全面考察,以期发现影响长三角地区大气污染水平的关键因素,并制定专门的应对策略。

1 研究方法

1.1 空间相关性检验

本文采用 Moran' sI 指数对长三角地区大气污染水平的空间相关性进行判断,并描述其空间分布特征,计算公式为:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中, I 为全局莫兰指数, n 是长三角地区城市总数, x_i 和 x_j 为城市 i 和城市 j 的空气质量综合指数, $\bar{x}$ 为空气质量综合指数的均值, W_{ij} 是空间权重矩阵。I_i 代表第 i 个城市的局部莫兰指数。式 (2) 的分母为方差, 一定大于 0; 分子由两个式子的乘积组成, 两个式子都有正负两种可能, 两两组合, 共有四种情形: 高-高聚集 (HH)、低-低聚集 (LL)、低-高聚集 (LH)、高-低聚集 (HL)。

1.2 空间计量模型

由莫兰指数检验能够判断各城市空气质量综合指数是否存在空间相关性, 如果存在空间自相关性, 则以空间计量经济学理论方法为基础, 建立空间计量模型。常用的空间计量模型包括空间滞后模型 (SLM)、空间杜宾模型 (SDM) 和空间误差模型 (SEM) 三种。

空间杜宾模型中包含了本城市自变量的影响以及相邻城市因变量和自变量对本城市的空间溢出效应, 具体表达式为:

$$y = \lambda Wy + X\beta + WX\delta + \varepsilon \quad (3)$$

式 (3) 中, W 为空间权重矩阵, λWy 表示来自相邻城市因变量的影响, λ 为空间回归系数, 用于刻画空间相关性, X 为解释变量, β 为本城市自变量对因变量影响的相应系数。WX δ 表示来自相邻城市自变量的影响, δ 为相应的系数。当 WX δ =0 时,

空间杜宾模型简化为空间滞后模型 (SLM), 表明相邻城市对本城市的空间溢出效应来自因变量; 当相邻城市对本城市的空间溢出效应来自误差项时, 空间杜宾模型简化为空间误差模型 (SEM)。

1.3 空气质量综合指数构成

空气质量综合指数是国家生态环境部用于对 168 个城市空气质量进行评价、排名的一种工具。它是一种描述城市环境空气质量综合状况的无量纲指数, 综合考虑了 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 CO 、 O_3 六类污染物的污染程度, 其值越大表明综合污染程度越重。

空气质量综合指数的计算方法为评价时段内, 六项污染物浓度与对应的二级标准值 (根据《环境空气质量标准》GB3095-2012) 之商的总和, 具体计算公式为:

$$I_{\text{sum}}^* = \sum_{i=1}^6 \frac{C_i}{S_i} \quad (4)$$

式 (4) 中, I_{sum}^* 为空气质量综合指数, C_i 为污染物 i 的浓度值, 依据生态环境部测算方式, 当 i 为 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 及 $\text{PM}_{2.5}$ 时, C_i 为该污染物的月均浓度; 当 i 为 CO 时, C_i 为 CO 日均值的第 95 百分位数; 当 i 为 O_3 时, C_i 为 O_3 日最大 8 小时值的第 90 百分位数。 S_i 为污染物 i 的二级标准, 六项污染物的国家二级标准浓度限值具体数值为: SO_2 ($60 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、 NO_2 ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、 PM_{10} ($70 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、 $\text{PM}_{2.5}$ ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、 CO ($4\text{mg}/\text{m}^3$)、 O_3 ($160 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。

2 变量选取与数据来源

2.1 大气污染水平影响因素

为了全面考察影响空气质量综合指数的社会经济因素, 本文在借鉴其他学者研究的基础上, 通过查阅梳理相关文献, 并结合数据的可得性, 最终选取城乡收入差距 (X_1)、人均电力消耗量 (X_2)、人均民用汽车保有量 (X_3)、第二第三产业产值比 (X_4)、发明专利项数 (X_5)、节能环保财政支出 (X_6)、全社会固定资产投资 (X_7)、人均 GDP (X_8)、人口密度 (X_9) 9 个变量作为影响空气质量综合指数的解释变量。

本文采用泰尔系数来描述城乡收入差距 (X_1), 具体计算公式为:

$$T = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{G_i}{G} \times \ln \left(\frac{G_i/G}{P_i/P} \right) \right) \quad (5)$$

式 (5) 中, T 为泰尔系数, $i=1, 2$, 分别表示城镇地区和农村地区, G 为该城市的城乡总收入, G_i 为该城市的城镇总收入或农村总收入, P 为该城市总人口, P_i 为该城市的城镇人口或农村人口。泰尔系数越大, 说明该城市城乡收入差距越大。

为使数据更为精确, 本文以 2015 年为基期, 按照 GDP、第二产业和第三产业相应指数分别剔除了价格因素的影响。且由于节能环保投入对大气污染的治理存在明显的滞后性, 因此本文采用滞后一期的节能环保支出。此外, 为使得回归的结果更加符合实际, 本文参考“环境库兹涅茨曲线”假说, 在模型中引入人均 GDP (X_8) 和人口密度 (X_9) 的二次项和三次项。最后, 除空气质量综合指数 (I^*)、城乡收入差距 (X_1) 以及第二第三产业产值比 (X_4) 外, 其余变量均进行对数处理。

2.2 数据来源

本文所使用的大气污染数据来自中国空气质量在线监测分析平台(<https://www.aqistudy.cn/historydata/>)和各个城市的大气污染监测站。GDP 及指数、年末常住人口、第二产业第三产业产值及指数、全社会用电量、城乡居民收入和人口以及 2017 年及以后的全社会固定资产投资额来自上海、江苏、浙江和安徽统计年鉴。节能环保支出来自江苏、安徽统计年鉴,《浙江财政年鉴》《中国财政年鉴》。行政面积、2017 年及以后的发明专利授予量和 2016 年及以前的全社会固定资产投资额来自《中国城市统计年鉴》。2016 年及以前的发明专利授予量来自 41 个城市国民经济和社会发展统计公报。

3 长三角地区大气污染时空分布与影响因素分析

3.1 长三角地区空间集聚特征分析

根据 Moran' sI 指数的计算公式(1),采用行标准化后的邻接空间权重矩阵,使用 Stata 软件计算出 2015—2019 年江浙沪皖 41 市空气质量综合指数的 Moran' sI 指数,结果如表 1 所示。

表 1 空气质量综合指数全局莫兰检验

年份	2015	2016	2017	2018	2019
Moran' sI	0.354***	0.487***	0.553***	0.572***	0.578***

注:***、**、*分别表示通过 1%、5%、10%的显著性检验。下同。

由表 1 可知,在 2015—2019 年间,41 市空气质量综合指数的 Moran' sI 指数均为正值,且通过了 1%的显著性检验,说明长三角地区存在显著的空间集聚性。此时,采用空间计量模型比传统模型更能准确考察各影响因素对大气污染水平的作用。此外 Moran' sI 指数逐年增大,说明随着时间的推移,41 市大气污染水平的空间集聚性越来越强,也从侧面证实了江浙沪皖地区“一荣俱荣,一损俱损”的区域大气污染空间集聚效应正在快速形成。

为获取长三角地区 41 市及其相邻城市的大气污染水平的区域相关性,研究进行了局部莫兰指数检验,检验结果如图 1 所示。2015—2019 年长三角地区 41 市大气污染水平的空间分布整体以高-高(HH)集聚和低-低(LL)集聚为主。约以苏州-湖州-杭州-宣城-池州-六安为界,南部集聚特征为 LL,北部为 HH。位于分界线的城市中其集聚特征不稳定。以杭州为例,在研究期内杭州出现了 4 次高-低(HL)集聚,作为唯一一个呈现 HL 特征的省会城市,杭州为浙江省其他城市承担了更多的污染排放。值得注意的是,同样作为省会城市的合肥和南京在本省其他城市大气污染程度较高的情况下,并没有起到表率作用。上海的空间集聚特征为:HH→LH→LL,不仅自身的大气污染水平逐年改善,且带动周边城市的普遍好转。

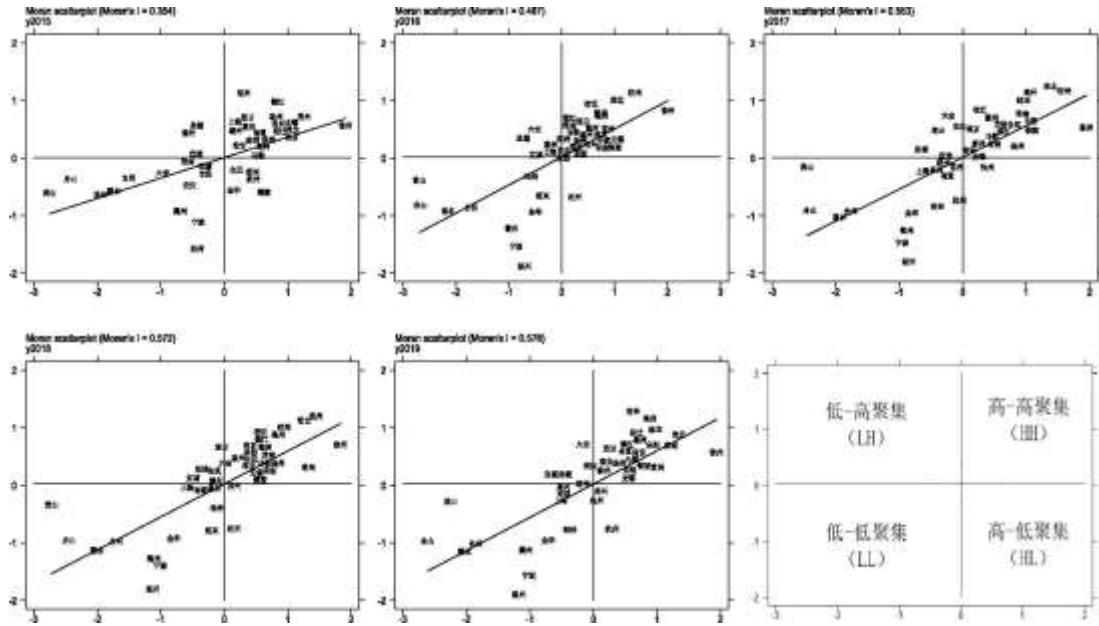


图 1 2015—2019 年长三角地区 41 市大气污染水平集聚图

3.2 长三角地区大气污染水平影响因素分析

根据全局莫兰检验的结果(见表 1)以及 Stata 的检验, 本文决定使用地区固定效应的空间杜宾模型来对长三角地区大气污染水平的影响因素进行研究, 计量模型如下:

$$\begin{aligned}
 I^* = & \lambda WI^* + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \\
 & \beta_6 X_6 + \beta_7 X_6^2 + \beta_8 X_7 + \beta_9 X_8 + \beta_{10} X_8^2 + \beta_{11} X_8^3 + \beta_{12} X_9 + \\
 & \beta_{13} X_9^2 + \beta_{14} X_9^3 + \beta_{15} + \alpha_1 WX_1 + \alpha_2 WX_2 + \alpha_3 WX_3 + \\
 & \alpha_4 WX_4 + \alpha_5 WX_5 + \alpha_6 WX_6 + \alpha_7 WX_6^2 + \alpha_8 WX_7 + \alpha_9 WX_8 + \\
 & \alpha_{10} WX_8^2 + \alpha_{11} WX_8^3 + \alpha_{12} WX_9 + \alpha_{13} WX_9^2 + \alpha_{14} WX_9^3 + \varepsilon \quad (6)
 \end{aligned}$$

表 2 前三列呈现了在标准化后的邻接空间权重矩阵下, 空间杜宾模型的估计结果。

从人均 GDP (X_8) 和人口密度 (X_9) 的三次项系数来看, 二者与大气污染之间分别呈现倒“N”型和“N”型关系。选取东南西北 4 个方位(甬温徽徐)及各省省会(宁杭庐)、直辖市(沪), 标注其在“N”型/倒“N”型曲线中的相对位置, 如图 2 所示。图 2(a)表明, 随着人口的集聚, 大量城市基础设施需要建设, 导致了初期污染的增加(徽), 而随着这些设施的日益完备, 资源高效利用的红利便展现了出来(庐杭徐温甬)。当人口进一步集聚, 资源高效利用带来的红利逐渐消失, 大气污染水平再度随人口密度的增大而增加(宁沪)。图 2(b)显示, 大部分城市延续了“先污染, 后治理”的发展模式, 在其大气污染物的排放速度超过环境和人为的治理速度后, 经济发展初期呈现出大气污染水平和人均 GDP 同步增长的局面(徽温徐)。在人才、资本、信息等要素充分流动后, 企业的生产技术和污染处理技术都会得到革新, 高技术含量、低污染、低耗能的企业比例逐渐提高, 经济发展与大气污染水平逆向而行(庐甬杭沪宁)。

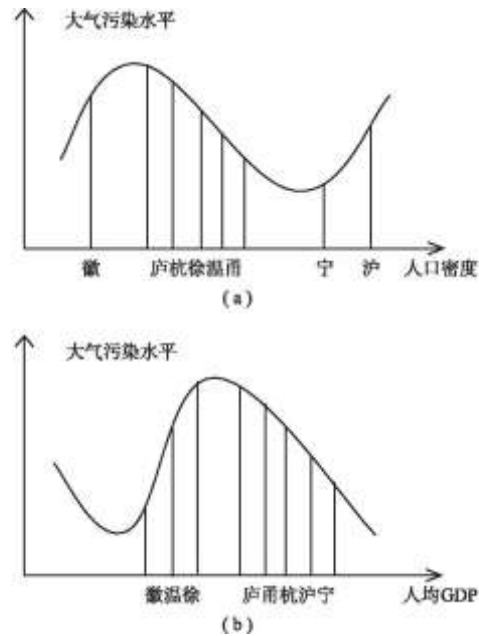


图 2 人口密度、人均 GDP 和大气污染水平的关系

注：上述城市在图中位置仅表示相对位置，无数值含义。

本城市和相邻城市的城乡收入差距(X_1)均会对大气污染水平产生显著的正向影响，即城乡收入差距的扩大会使得大气污染趋于严重。说明大气污染的治理和城乡收入差距的改善是可以同步进行的，二者之间是相辅相成的关系，而非“鱼与熊掌”。考虑到省级城市上海、省会城市南京、杭州和合肥与一般地级市无论是经济水平还是人口规模都相差甚大，表 2 单独呈现了排除沪宁杭庐四大城市后的回归结果。若排除上海的影响，无论是本地区还是相邻地区，城乡收入差距对空气质量综合指数的影响仍然显著为正，表明城乡收入差距会加剧大气污染的结果并非偶然；若排除沪宁杭庐，相邻地区城乡收入差距对空气质量综合指数的影响并不显著，说明省级与省会城市的大气污染受到来自相邻城市城乡收入差距的影响要远大于一般地级市。总体而言，大气污染水平受城乡收入差距的影响在省会城市及相邻地区尤为明显。

此外，从回归结果中还可以看出人均耗电量(X_2)对大气污染水平的影响为负，说明电气化水平的提升在减缓大气污染水平过程中发挥了巨大的促进作用。民用汽车保有量(X_3)对大气污染的影响显著为正，说明汽车行业的发展会对空气质量产生负面影响，政府需要加强对环保型或新能源汽车产业的支持和推广，以缓解燃油汽车对大气污染的负向作用。第二、三产业产值之比(X_4)对大气污染水平的影响显著为负，这可能是由于长三角地区部分城市的第二产业产值以医药、航天、新材料和新能源等高新技术产业为主，这些产业产值高、污染低，造成了第二产业对大气污染水平的影响为负的“特例”。发明专利授予量(X_5)对大气污染水平的影响在 10%的显著水平下为负，说明科技进步对大气污染具有一定的抑制作用。政府节能环保支出(X_6)和大气污染水平间呈现出一项为正，二次项为负的相关关系，其表现形态为“倒 U”型，即在节能环保投入的初期，无法从根本上调整大气污染水平，但随着投入的持续，大气污染水平可进入下行状态。全社会固定资产投资(X_7)对本地大气污染水平的影响不显著，但会正向影响其相邻城市，说明全社会固定资产投资对相邻城市间大气污染水平存在溢出效应。

表 2 回归结果

变量	41 座城市	排除上海	排除沪宁杭庐
----	--------	------	--------

	本地区	相邻地区	本地区	相邻地区	本地区	相邻地区
X_1	65.584***	48.284*	64.868***	48.024*	71.800***	14.138
X_2	-0.378**	-0.089	-0.271	-0.313	-0.253	-0.409
X_3	0.557***	-0.208	0.537***	-0.165	0.445***	-0.205
X_4	-0.617***	0.419	-0.647***	0.436	-0.419*	0.962**
X_5	-0.101*	-0.229**	-0.086	-0.221*	-0.104*	-0.209**
X_6	1.777***	-0.392	2.706***	-1.801	3.358***	-0.813
X_{26}	-0.075***	-0.001	-0.116***	0.060	-0.144***	0.020
X_7	0.243	1.010**	0.212	1.051**	0.252	0.855**
X_8	-368.059***	157.038	-410.110***	138.683	-333.162***	5.393
X_{28}	35.021***	-12.344	39.029***	-10.405	31.918***	1.739
X_{38}	-1.108***	0.312	-1.235***	0.245	-1.016***	-0.123
X_9	203.526***	136.968	188.576***	197.898	274.571***	57.87
X_{29}	-33.247***	-21.588	-31.005***	-31.049	-45.522***	-8.306
X_{39}	1.781***	1.109	1.670***	1.597	2.472***	0.382
λ	0.376***		0.392***		0.399***	
R^2	0.8619		0.8582		0.8498	

4 结论和建议

4.1 结论

长三角地区 41 座城市大气污染水平的空间性特征明显。在空间上，大气污染水平存在显著的空间正相关性，且相关性逐年递增，约以苏州-湖州-杭州-宣城-池州-安庆为界，北部呈现高高聚集，南部呈现低低聚集。

城乡收入差距的扩大会使得大气污染趋于严重，且省会城市(沪宁杭庐)及其相邻地区的表现尤为明显；电气化水平的提升在减缓大气污染水平过程中发挥了巨大的促进作用，而汽车行业的发展会对空气质量产生负面影响，政府需要加强对环保型或新能源汽车产业的支持和推广，以缓解燃油汽车对大气污染的负向作用。

基于环境库兹涅茨曲线空间计量模型实证结果显示，人口密度和人均 GDP 回归结果呈现显著的“N”型和倒“N”型关系。人口的适当集聚可以使得污染治理成本迅速降低，大气污染也逐步减少。但过度集聚也会使得因人口规模带来的污染排放效应超过资源高效利用带来的污染遏制效应，治理成本和大气污染再度增加。同时经济的高质量发展，使得产业结构得到优化升级，大气污染物排放逐步减少。

因为大气环流和经济交流的空间溢出性，各城市间的大气污染存在不同程度的关联。大气污染在空间上的集聚性要求政府在进行大气污染治理时不能忽视本城市与周边城市之间的联系，应当加强区域合作，建立联防联控机制。加强城市和区域间的通力合作，建立共同协作减排机制，推进长三角地区联防联控。为使大气污染治理更加高效，也为防止相邻城市的大气污染导致本城市大气污染的反弹或加剧，长三角地区一体化的联防联控势在必行。

4.2 政策建议

大气污染在空间上存在明显的差异性，各个城市的人口密度、支柱产业及产业结构特点也存在较大的差异。在进行大气污染治理时应当综合各城市的发展情况制定具体、精准的环保政策并缩小城乡收入差距，加速推进共同富裕，让低收入群体也享受到经济发展的益处，提高低收入家庭的环保意识，让“绿水青山就是金山银山”的观念进一步深入人心。各城市综合考虑自身支柱产业和产业结构特点，对短时间内无法放弃的产业进行技术升级，同时逐步淘汰落后产能，引入先进和新型的技术产业同时发展第三产业，让经济和环境达成共赢。与此同时，人口较为密集的城市，如上海、南京等应时刻关注自身的人口承载力，遏制人口的过度集聚，防止因人口密度过大加剧大气污染水平恶化。

参考文献:

- [1] 窦旺胜, 王成新, 刘照胜. 2020 年初京津冀及周边地区空气污染特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(11):8-14.
- [2] 王素凤, 焦建玲, 葛士建. 长三角人口发展对雾霾污染的门槛效应[J]. 系统工程, 2019, 37(4):23-29.
- [3] 占华. 收入差距对环境污染的影响研究——兼对“EKC”假说的再检验[J]. 经济评论, 2018(6):100-112.
- [4] 于连超, 张卫国, 毕茜. 环境保护费改税促进了重污染企业绿色转型吗?——来自《环境保护税法》实施的准自然实验证据[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(5):109-118.
- [5] 汪克亮, 赵斌, 丁黎黎, 等. 财政分权、政府创新偏好与雾霾污染[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(5):97-108.
- [6] 李辉, 徐美宵, 洪扬. 京津冀联动执法对空气质量的改善效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(8):70-79.