

中国城市空气质量时空演化特征及社会经济驱动力

蔺雪芹¹, 王 岱²

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 城市空气污染是中国在快速城镇化和经济发展过程中亟待解决的难题。利用2013年和2014年全国城市空气质量数据, 综合 ArcGIS 空间分析和统计分析, 从年度、季节、月份、小时4个时间尺度比较归纳了全国城市空气质量的时空演化特征, 并采用空间计量模型, 从全国和区域两个空间尺度, 量化分析了城市空气质量变化的社会经济驱动力。结果表明: ① 全国城市空气质量全年达标天数比例增加, 但空气污染程度加重, 高污染区域恶化态势明显; ② 城市空气质量与生产生活活动表现出一定的时间耦合性, 基本呈现“日出趋差、日落趋优”的态势; ③ 全国城市空气污染表现出“东重西轻、北重南轻”的空间格局, 区域一体化态势明显; ④ 区域城市空气污染的总体程度和分布结构具有明显的分异特征, 区域空气污染形成和演化路径可基本归纳为: “重点城市污染加重—重点城市污染扩散—区域整体污染加重—重点城市引领治理—区域污染联防联控—区域整体污染减轻”; ⑤ 从全国层面看, 能源消耗、工业化和技术进步是推动城市空气质量恶化的重要因素, 经济发展对城市空气质量改善具有显著的推动作用。⑥ 受各地区资源环境基础和社会经济发展阶段影响, 各类社会经济因素对城市空气质量改善的驱动方向和驱动强度差异明显。在结论的基础上, 讨论了中国经济发展和环境变化关系的区域分异以及发展理念。

关键词: 城市空气质量; 时空演化; 社会经济; 驱动力; 城市; 中国

DOI: 10.11821/dlxb201608006

1 引言

改革开放以来, 中国逐渐进入经济高速增长和城镇化快速推进时期。1978-2012年, 中国国内生产总值由3645亿元增长至518942亿元, 年均增速9.98%; 城市化率由17.92%上升至52.57%, 年均增速0.96%。经济发展和城镇化水平提升无疑推动了中国物质财富短时期内的快速积累和人民生活水平的大幅提高。同时, 也造成在许多城镇化地区出现了严重的生态环境问题, 尤其是大气污染、灰霾、光化学烟雾等复合型大气污染问题日益突出^[1-2]。2011年秋冬中国东部及中部部分地区首次连续出现雾霾天气, 2013年更是遭遇有观测记录以来最严重的污染天气^[3], 严重影响城市及区域的大气环境及公共健康^[4-5], 大气污染已经成为阻碍中国城市实现可持续发展的重要因素^[6]。多尺度了解城市空气质量变化不仅有利于科学认知城市大气污染变化特征, 还可以为区域性预防控制措施的制定

收稿日期: 2016-03-02; 修订日期: 2016-06-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41430636); 教育部人文社会科学研究青年基金项目(16YJC790056) [Foundation: Key Program of National Natural Science Foundation of China, No.41430636; Youth Program of the Humanities and Social Science Research of Ministry of Education, No.16YJC790056]

作者简介: 蔺雪芹(1980-), 女, 甘肃武威人, 博士, 副教授, 中国地理学会会员(S110008585M), 研究方向为城市地理与区域可持续发展。E-mail: lin-xueqin@139.com

通讯作者: 王岱(1978-), 男, 河北保定人, 博士, 助理研究员, 中国地理学会会员(S110006157M), 研究方向为经济地理与区域可持续发展。E-mail: wangdai@igsnrr.ac.cn

实施提供参考借鉴。

基于地理学视角的城市空气质量相关研究主要集中在两个方面：① 不同尺度及典型地区空气质量的变化特征解析。如在全国尺度^[7-8]、西部工业城市^[9-10]、北方典型城市^[11-12]空气质量的年际变化特征，城市和乡村空气质量比较^[13]，以及重大节事活动期间空气质量变化特征分析^[14]等。有研究认为，大气污染物浓度的地区差异主要是由于城镇化水平的不均衡发展造成的^[15]，在城镇化快速发展和人口密集地区，大气污染程度明显高于城镇化水平较低的区域，因此经济发达、人口密集的东部沿海地区，如京津冀、长三角、珠三角等成为研究的热点区域^[16-22]。② 空气质量的影响因素研究。引起空气质量变化的因素比较复杂，已有研究大多集中在自然环境要素对空气质量变化的影响方面。如气象要素^[23-24]、风场^[25]、沙尘暴^[26]、大雾天气^[27]、城市热岛效应^[28]等。一些研究关注了社会经济要素对大气环境质量的影响，如基于环境库兹涅兹曲线研究了经济增长与大气环境的非线性关系^[29-30]，还有学者研究了城市化^[31]、城市建成区、人口分布以及工业发展^[32]、交通^[33]、能源结构^[34]以及油价变动^[35]等对大气污染和空气质量的影响。在总结中国城市空气质量时空演化特征方面，现有研究已经涉及多个空间尺度和时间尺度，但缺乏对不同空间尺度的比较分析；在对城市空气质量影响机制的阐释方面，现有成果涉及的自然—人文因素比较全面，而本文特别要关注的是社会经济要素对空气质量影响的动力机制在不同空间尺度和不同地区的差异性。瞄准这一问题的理论意义是探索人地关系演进过程和内在机理，现实目的是为制定因地制宜的大气污染防控措施提供科学依据。

2 研究区域与研究方法

2.1 研究区域和数据来源

2012年中国颁布新的《环境空气质量标准》(GB3095-2012)，空气质量监测数据由空气污染指数 (Air Pollution Index, API) 改为空气质量指数 (Air Quality Index, AQI)。2013年京津冀、长三角、珠三角等重点区域以及直辖市和省会城市共 74 个城市按照新标准开始进行监测，2014 年 161 个环境保护重点城市和国家环保模范城市开始实施新标准。本文以执行环境空气质量新标准的 161 个城市为研究区，采用 2013-2014 年月、天、小时 AQI 数据，运用统计分析和 ArcGIS 空间分析，对城市空气环境质量的时空变化特征进行分析。

区域传播性和城市间输送是大气环境污染的一个重要特征，单体城市空气质量优劣受到相邻城市污染状况的影响^[16, 36]。基于此，按照所属省份区位，结合经济发展水平和一体化发展特征，将研究城市划分为 11 个区域 (表 1)。鉴于海口、三亚、拉萨 3 市各时间尺度下 AQI 变化幅度较小，为规避在因素分析过程中对显著程度的平滑影响，不纳入

表 1 中国 11 个区域划分及城市个数分布
Tab. 1 Descriptions of the study area in China

区域名称	省(市、区)	城市个数	区域名称	省(市、区)	城市个数
京津冀地区	北京、天津、河北	13	长三角地区	上海、浙江、江苏	25
珠三角地区	广东	21	山东半岛地区	山东	17
东北地区	吉林、辽宁、黑龙江	16	长江中游地区	湖南、湖北、安徽、江西	14
黄河中游地区	山西、河南、陕西、内蒙古	22	海峡西岸地区	福建	3
长江上游地区	四川、重庆	9	南贵昆地区	贵州、云南、广西	9
西北地区	甘肃、青海、宁夏、新疆	9			

区域划分。

研究数据中,空气质量数据包括中国环境监测统计总站发布的2013-2014年74个城市每月空气质量综合指数(Air Quality Composite Index, AQCI),环境保护部数据中心发布的2014年1-12月161个城市每日空气质量指数(AQI),新浪微博号“中国城市空气污染排行”播报的74个城市2013-2014年每日及每小时空气质量数据。社会经济发展数据主要来自《2014年中国城市统计年鉴》、《2013年中国城市建设统计年鉴》、全国及各省(市、区)《第二次全国科学研究与试验发展(R&D)资源清查主要数据公报》,以及各省(市、区)2012年统计年鉴。

2.2 空气质量空间效应检验模型

2.2.1 全局自相关模型 采用全局自相关描述城市单元空气质量变化的整体分布状况,以判断城市空气质量变化在空间上是否存在集聚性,通常用的检验统计量有Global Moran's I 指数^[37-38],计算公式如下:

$$Moran's I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (i \neq j) \quad (1)$$

式中: x_i 、 x_j 分别为城市单元 i 和 j 的空气质量观测值; n 为城市总数; W_{ij} 为空间权重,采用邻接标准来定义,即当 i 和 j 邻接时, $W_{ij} = 1$, 否则 $W_{ij} = 0$; $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$, \bar{x} 为 x 的平均值。

Global Moran's I 取值范围介于-1~1之间,通过 I 值可以判断区域城市空气质量水平的集聚程度。 $I > 0$ 时表示空间正相关,即区域城市空气质量呈集聚分布, $I < 0$ 时表示空间负相关,即区域城市空气质量呈扩散或均匀分布,当 $I = 0$ 时表示空间不相关,即城市空气质量呈无规律的随机分布。显著性检验可使用标准化统计量 Z 检验来实现,计算公式如下:

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{Var}(I)}} \quad (2)$$

当选用95%的置信水平时, $|Z| > 1.96$,表示空间自相关显著。

2.2.2 局域自相关模型 局域自相关分析可以用来度量局部空间单元相对于整体研究范围空间自相关的影响程度,即一个区域单元的空气质量与邻近单元上空气质量特征的相关程度,计算公式如下:

$$Local Moran's I = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^m W_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (i \neq j) \quad (3)$$

式中: x_i 、 x_j 分别为城市 i 和 j 的空气质量观测值; n 为城市个数; W_{ij} 为空间权重, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$, m 为与城市 i 地理上相邻接的城市个数。局域自相关空间关联模式划分为H-H、H-L、L-H和L-L 4种类型,其空间含义分别为: H-H (L-L) 集聚型表示局部Moran's I 为正值,表示城市空气质量与其相邻城市空气质量之间存在正的空间自相关,即高水平(或低水平)空气质量城市在空间上集聚; H-L (L-H) 集聚型表示局部Moran's I 为负值,表示城市与其相邻城市之间存在负的空间自相关,即高水平(或低水平)空气质量城市被低水平(或高水平)空气质量城市包围。

2.3 基于空间效应的城市空气质量驱动力模型

2.3.1 基本模型设定 根据已有理论和实证研究成果,选取人口密度(X_1)、人均GDP(X_2)、城市化水平(X_3)、工业产值占GDP比重(X_4)、能源消耗总量(X_5)、民用汽车总量(X_6)、环保投资额占GDP比重(X_7)、R&D经费支出占GDP比重(X_8),对应探究人口集聚、经济发展、城市化、工业化、能源消耗、社会发展、环境规制、技术进步等对城市空气质量变化的影响。从区域发展长时期的过程看,经济发展、城市化与生态环境之间存在非线性的倒“U”型曲线关系^[29-30, 39]。本文根据当前中国的发展阶段,初步假设:在短时期内,人口集聚、经济发展、城市化、工业化、能源消耗、社会发展、环境规制、技术进步与城市空气质量存在线性相关关系。基于此,设定基本分析模型如下:

$$\ln Y = \alpha_0 + \alpha_1 \ln X_1 + \alpha_2 \ln X_2 + \alpha_3 X_3 + \alpha_4 X_4 + \alpha_5 \ln X_5 + \alpha_6 \ln X_6 + \alpha_7 X_7 + \alpha_8 X_8 + \varepsilon \quad (4)$$

式中: Y 为空气质量指数; X_1, \dots, X_8 依次分别为人口密度、人均GDP、城市化水平、工业增加值占GDP比重、能源消耗总量、民用汽车总量、环保投资额占GDP比重、R&D经费支出占GDP比重; $\alpha[\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_8]$ 为待估计的模型参数; ε 为模型的误差随机项,服从正态分布, $N(0, \sigma^2)$ 。对空气质量指数、人口密度(X_1)、人均GDP(X_2)、能源消耗总量(X_5)、民用汽车总量(X_6)取自然对数,以减小异方差对模型估计的影响^[40]。

2.3.2 空间效应模型设定 在现实生活中,城市空气质量并不是一个完全独立的观测值,其变化受到周边区域的影响,因此不能忽略空间效应。考虑空间效应的计量回归模型主要有空间滞后模型(SLM)和空间误差模型(SEM)两种^[41]。在进行空间模型选择时,需要采用最小二乘法(OLS)估计考虑空间相关性的约束模型,通过比较拉格朗日乘数的显著性确定模型选择。若拉格朗日乘数LM(lag)比LM(error)在统计上显著,且R-LM(lag)比R-LM(error)显著,则选择空间滞后模型进行分析,基于基本模型的空间滞后模型表达式为:

$$\ln Y = \rho WY + \alpha_0 + \alpha_1 \ln X_1 + \alpha_2 \ln X_2 + \alpha_3 X_3 + \alpha_4 X_4 + \alpha_5 \ln X_5 + \alpha_6 \ln X_6 + \alpha_7 X_7 + \alpha_8 X_8 + \varepsilon \quad (5)$$

式中: Y 为空气质量指数; ρ 为空间回归系数; W 为 $n \times 1$ 阶的空间权值矩阵; X_1, \dots, X_8 分别为8个自变量; $\alpha[\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_8]$ 为待估计的模型参数; ε 为误差随机项。

若拉格朗日乘数LM(error)比LM(lag)在统计上显著,且R-LM(error)比R-LM(lag)显著,则选择空间误差模型进行分析,基于基本模型的空间误差模型表达式为:

$$\ln Y = \alpha_0 + \alpha_1 \ln X_1 + \alpha_2 \ln X_2 + \alpha_3 X_3 + \alpha_4 X_4 + \alpha_5 \ln X_5 + \alpha_6 \ln X_6 + \alpha_7 X_7 + \alpha_8 X_8 + \varepsilon \quad (6)$$

$$\varepsilon = \lambda W\varepsilon + \mu \quad (7)$$

式中: Y 为空气质量指数; λ 为空间误差系数; W 为 $n \times 1$ 阶的空间权值矩阵; X_1, \dots, X_8 为8个自变量; $\alpha[\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_8]$ 为待估计的模型参数; ε 为误差随机项; μ 为正态分布的随机误差向量。由于空间回归模型自变量的内生性,采用极大似然法对模型参数进行估计。空间距离权重计算和空间模型运行均在GeoDa软件中进行^[41]。

3 结果分析

3.1 中国城市空气质量的时空演化特征

3.1.1 城市空气质量整体恶化,高污染区域恶化态势明显 比较2013年和2014年中国74个城市空气质量综合指数(AQCI),剖析城市空气质量的年度变化特征。从全国尺度看,2013年全国AQCI年度均值为4.46,2014年升至6.08;比较两年的月度均值,仅1月有小幅下降,其他月份明显上升,说明74个城市空气质量呈整体恶化趋势。两年AQCI月度变化轨迹基本相似,1月均值全年最高,之后持续下降,8-9月进入低谷,之后逐月

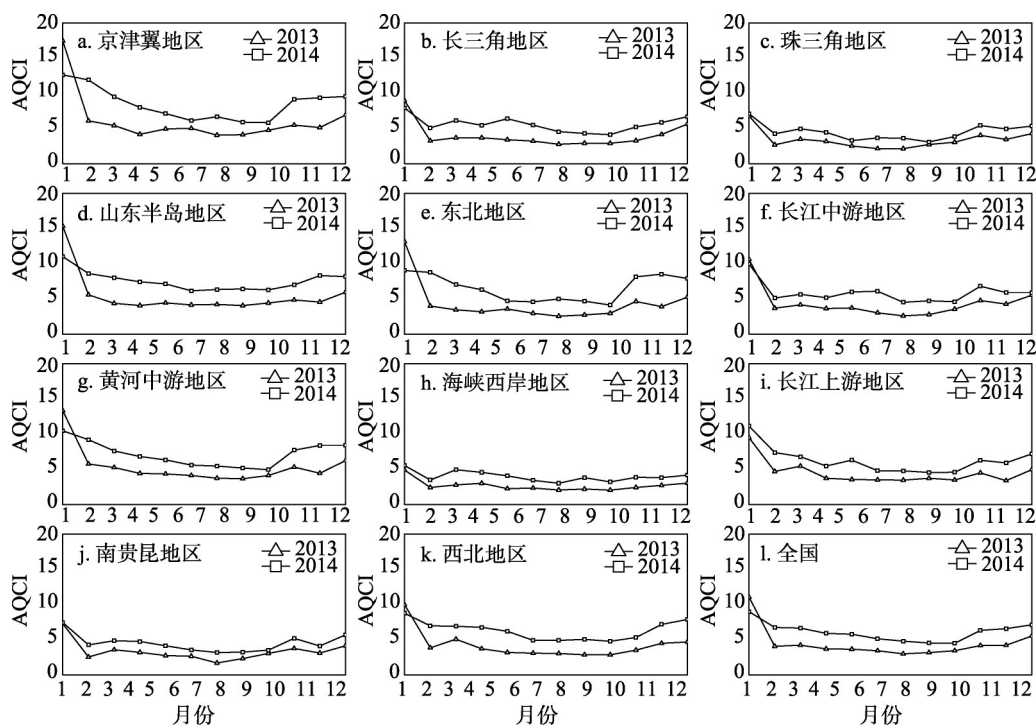


图1 2013年和2014年全国及各区域空气质量综合指数(AQCI)月际变化

Fig. 1 Monthly variations in air quality comprehensive index (AQCI) in China in 2013 and 2014

上升。从区域层面看, 11个区域2014年AQCI年度均值都高于2013年, 其中珠三角、南贵昆、长江上游、海峡西岸4个地区2014年所有月度均值都大于2013年同期(图1)。各区域AQCI月度均值也基本遵循了“冬高夏低、春降秋升”的变化轨迹。

分地区比较AQCI年度均值, 高值区包括京津冀、山东半岛、东北、黄河中游等地区, 低值区包括珠三角、海峡西岸和南贵昆地区, 北方地区空气质量显著较南方差。采用差异系数对11个区域AQCI年度均值变化强度进行度量, 空气质量恶化幅度较大的依次为东北地区(0.6063)、西北地区(0.5221)、京津冀地区(0.4897)、海峡西岸地区(0.4882)、山东半岛地区(0.4615)、长三角地区(0.4333)和黄河中游地区(0.4040), 基本集中在AQCI高值区。换言之, 空气污染程度越严重的地区, 恶化趋势越明显, 已经呈现恶性循环之势。

3.1.2 城市空气质量达标天数比例提高, 但空气污染程度加重 2013年中国城市平均达标天数比例为60.5%, 轻度和中度污染占30.90%, 重度及严重污染占8.6%。2014年中国城市平均达标天数比例为66.03%, 与2013年相比上升5.53个百分点, 轻度和中度污染占28.37%, 重度及以上污染天数比例为5.6%。两年比较, 各级别污染天数均有所下降, 空气质量达标天数增多, 达标天数比例提高。但2014年全国AQCI年度均值较2013年有所上升, 这说明相应区间空气质量污染程度增强, 重污染天气尚未得到有效遏制。

根据《环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)》(HJ633-2012), 空气污染指数划分为6档, 即 $0 < AQI < 50$, 空气质量为优; $51 < AQI < 100$, 空气质量为良; $101 < AQI < 150$, 空气质量为轻度污染; $151 < AQI < 200$, 空气质量为中度污染; $201 < AQI < 300$, 空气质量为重度污染; $AQI > 300$, 空气质量为严重污染。分别统计2014年1-12月不同区域不同污染程度天数在全年的占比(图2), 可以看出污染天数占全

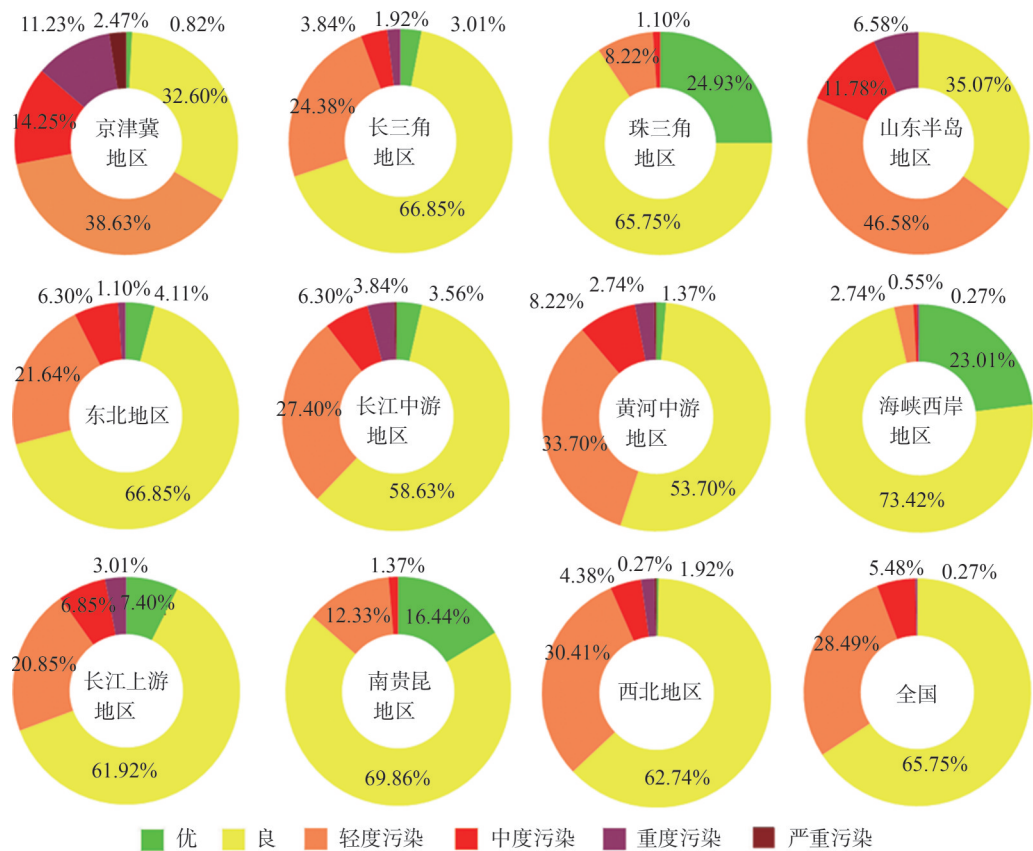


图2 2014年全国及各区域空气质量等级天数占比

Fig. 2 The proportions of days with different air quality levels at national and regional scales in China in 2014

年天数比例由大到小依次为京津冀、山东半岛、黄河中游、长江中游、西北、长江上游、长三角、东北地区、南贵昆、珠三角和海峡西岸地区，占比分别为66.58%、64.93%、44.93%、38%、37%、31%、30.14%、29.04%、14%、9.32%和4%。京津冀地区各级别污染天数占比均远高于全国平均水平，为全国污染最严重的地区；其次是山东半岛地区，各级别污染天数占比仅比京津冀地区低2.47%。

3.1.3 城市空气质量变化与地区社会经济活动表现出一定的时间耦合性 为了最大限度消除春季沙尘天气、夏季降水以及冬季北方供暖等影响，以2014年10月2日为例，对各地区城市空气质量24小时变化特征进行分析（图3）。根据全天AQI变化轨迹，可将11个地区划分为两种类型。一种为常规变化类型区，对应地区生产生活活动“日出而作、日落而息”的特征，城市空气质量基本表现为“日出趋差、日落趋优”。这类地区主要包括京津冀、长三角、珠三角、东北、海峡西岸和南贵昆地区。早晨6-8时和下午18-20时受上下班集中出行影响，城市AQI指数持续增大。京津冀、长三角、珠三角地区全天AQI峰值在早晨8-9点，海峡西岸地区全天AQI峰值在中午14点，东北和南贵昆地区全天AQI峰值在晚上23点。第二种为异常变化类型区，主要包括山东半岛、长江中游、黄河中游、西北和长江上游地区。这种类型区早晚出行高峰时段的AQI指数变化并不突出，绝大部分地区全天AQI峰值出现在深夜，如山东半岛、长江中游、黄河中游地区峰值出现在凌晨12-2时。排除西北地区时差的因素，应该关注地区产业结构对空气质量变化的

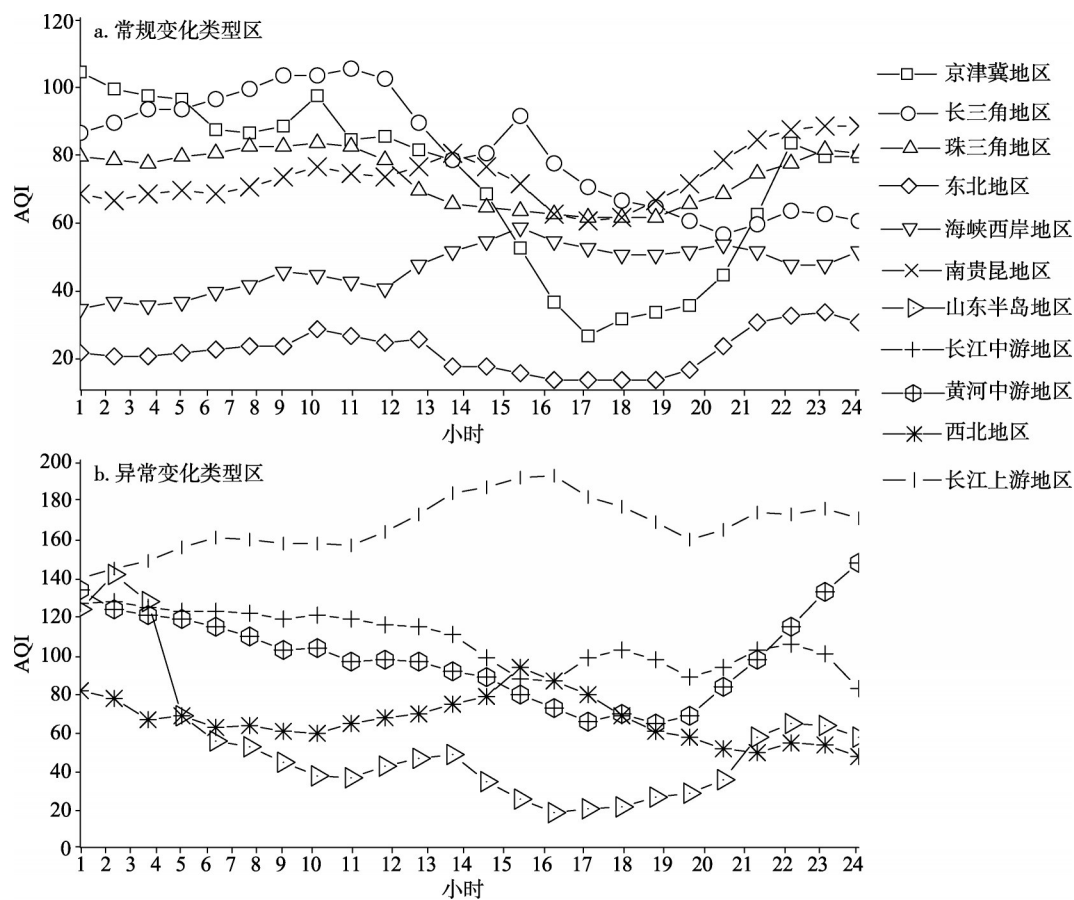


图3 2014年10月2日中国不同区域空气质量指数(AQI) 24小时变化
Fig. 3 The hourly variations of AQI on 2nd October, 2014 in different regions

影响。山东半岛、长江中游、黄河中游等地区是全国沿海、沿江重化工产业的重点集聚区，迫于减排压力，夜间工业生产活动频繁，工业排放加大等可能成为导致城市空气质量下降的因素。

3.1.4 城市空气污染表现出“东重西轻、北重南轻”的空间格局,区域一体化态势明显 对比分析中国161个城市2014年AQI均值的空间分布，总体呈现由沿海向内陆、由北方到南方逐渐降低的态势，高值城市集聚分布在东部沿海和黄河沿线，京津冀地区城市总体最高（图4）。从污染较为严重的东部沿海地区内部看，靠近海洋的城市AQI指数较远离海洋的城市

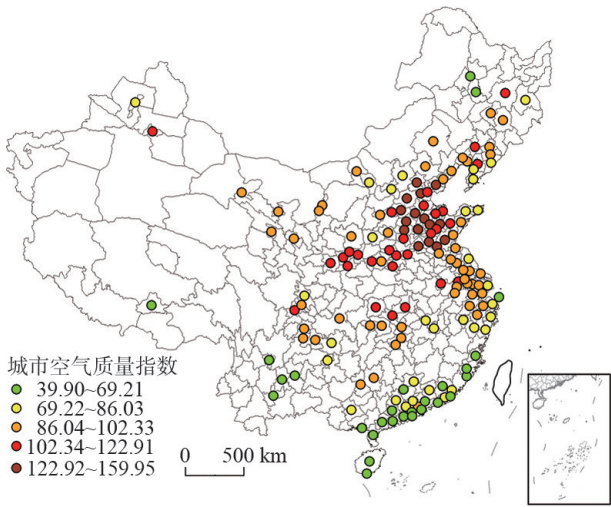


图4 2014年中国城市空气质量指数(AQI)空间分异
Fig. 4 Spatial patterns of AQI in Chinese cities in 2014

AQI指数低。如天津的AQI指数低于北京和石家庄,上海的AQI指数低于南京和杭州,珠海和深圳的AQI指数低于广州,说明临海性对城市空气质量具有重要影响。进行161个城市空气质量的全局空间自相关分析(图5), Moran's I 指数为0.6621,通过0.05水平的显著性检验,表明全国城市空气质量呈现显著的正相关性,即AQI指数分布呈现显著的高值区和高值区邻近、低值区和低值区邻近的集聚态势。进一步进行空间局域自相关分析(图6),得出京津冀、山东半岛、辽东半岛、中原城市群等是AQI指数高一高“热点”的集中区域,珠三角、海峡西岸、海南等是低—低“冷点”的集中区域,被AQI高值区所包围的低值区(低—高“异质点”)较少,主要分布在京津冀、山东半岛周边,被AQI低值所包围的高值区(“高一低”异质点)主要分布在南贵昆和长三角地区。可以看出,当前中国城市大气污染区域一体化态势明显,大气污染治理的区域联防联控越发重要。

3.1.5 区域城市空气污染的总体程度和分布结构具备明显的分异特征 绘制2014年各地区城市AQI指数BOX分布图(图7),根据AQI指数散布范围和分布形态,将城市空气质量分布形态划分为6种类型。第一类是重污高值主导区,京津冀地区属于该类。这类地区AQI均值居11个地区之首,区域内AQI均值以上城市个数大于AQI均值以下个数,表明区域污染一体化态势明显。这类地区单一城市空气污染防控收效甚微,必须建立跨行政区的空气污染联防联控机制。第二类是重污低值主导区,山东半岛地区属于该类。这类地区AQI均值高,区域内AQI均值以上城市个数小于AQI均值以下个数。这类地区城市大气污染扩散效应显著,少数污染严重城市对区域空气污染加重和一体化影响显著。针对这类地区,除了要加强区域联防联控,还要突出重点城市的综合整治。第三类是中污均衡区,东北和长江上游地区属于该类。这类地区AQI均值较高,均值以上城市个数和均值以下城市个数基本持平,呈均衡分布态势。第四类是中污高值主导区,长江中游和西北地区属于该类。第五类是中污低值主导区,长三角和黄

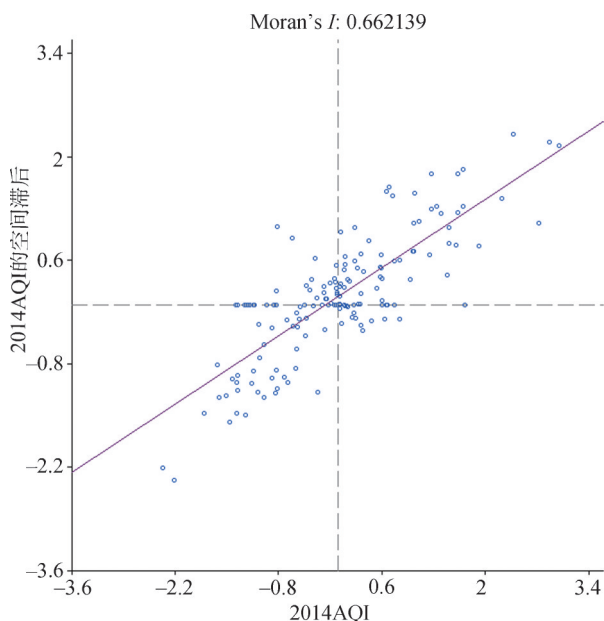


图5 2014年中国城市空气质量指数(AQI)全局自相关图
Fig. 5 Global autocorrelation of AQI in Chinese cities in 2014

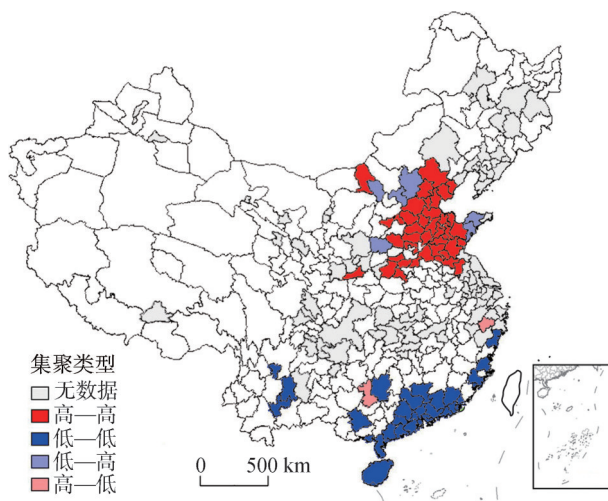


图6 2014年中国城市空气质量指数(AQI)局域自相关图
Fig. 6 Local autocorrelations of AQI in Chinese cities in 2014

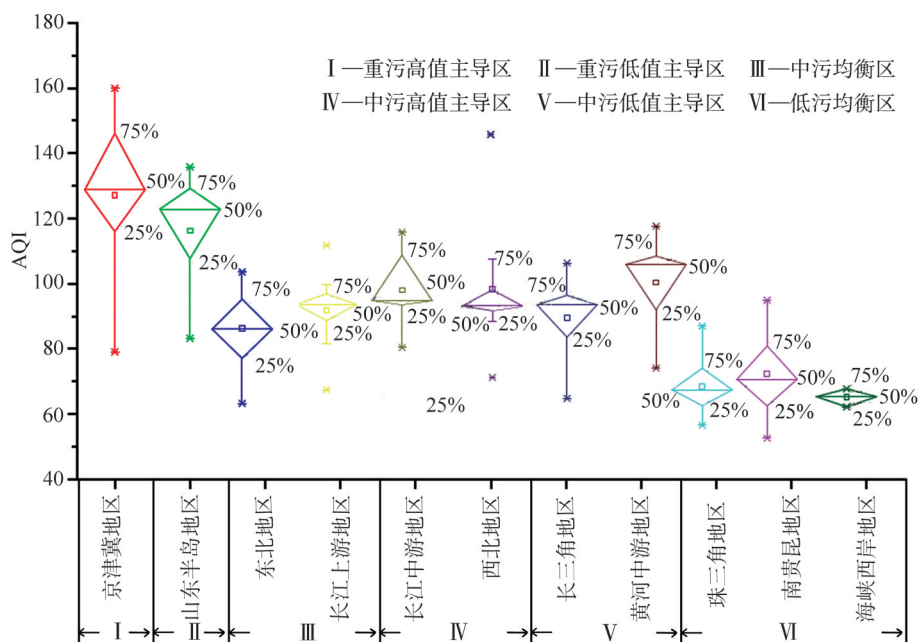


图7 2014年中国不同区域空气质量指数BOX分布

Fig. 7 The statistical distributions of AQI in different regions in China in 2014

河中游地区属于该类。这3类地区整体的空气质量处于临界状态，污染防治应根据城市空气污染的分布形态，处理好整体推进和重点突破的关系，重点污染城市整治和污染扩散预警并重，及时控制区域空气质量的恶化。第六类是低污均衡区，包括珠三角、南贵昆和海峡西岸3个地区。这类地区大气污染程度较低，污染治理应坚持“预防为主，防治结合”的原则，推动区域大气环境质量的保持和持续改善。结合各类地区的发展阶段，初步判断区域空气污染形成和演化路径为：“重点城市污染加重—重点城市污染扩散—区域整体污染加重—重点城市引领治污—区域污染联防联控—区域整体污染减轻”。

3.2 中国城市空气质量演化的社会经济驱动力

3.2.1 城市空气质量演化的社会经济因素解析 采用2014年161个城市AQI指数和2013年各城市社会经济数据，根据前述公式设定，分析城市空气质量变化的社会经济驱动力。进行全局自相关检验，Moran's I 指数为0.6621，呈显著空间相关性。在SPSS中分析各自变量之间的相关性，发现相关系数均小于0.8，然后采用最小二乘法（OLS）对模型进行估计，发现每个变量的方差膨胀因子（VIF）均小于3.5（远小于临界值10），表明模型不存在多重共线性的问题^[40]。采用最小二乘法（OLS）估计考虑空间相关性的约束模型，发现拉格朗日乘数LM(lag)比LM(error)在统计上更显著，且稳健的R-LM(lag)比R-LM(error)更显著，故选择空间滞后模型进行分析，模型估计结果如表2所示。OLS估计中 R^2 为0.284，空间滞后模型估计中 R^2 为0.691，可见考虑空间相关性显著地提高了模型的拟合程度。从空间滞后模型结果可以看出，在综合考虑人口集聚、经济发展、城市化、工业化、能源消耗、社会发展、环境规制和技术进步等因素的前提下，人口密度、城市化、民用汽车拥有量和环保投资对中国城市空气质量变化没有显著的影响，能源消耗总量、工业增加值占GDP比重、R&D经费占GDP比重与城市AQI呈显著正相关，三者每提高1%，AQI上升0.265%和0.108%和0.104%。以煤炭资源为主的能源消耗是造成大气环境恶化的重要因素。技术进步表现出与大气环境恶化的协同增长效应，这一点在

很多研究中已得到验证,即“回弹效应”^[42]。人均GDP与AQI指数呈显著负相关,人均GDP每提高1%,AQI下降0.242%,城市空气质量好转,即经济发展促进城市大气环境改善。从西方发达国家经验来看,人均GDP达到6000~8000美元是环境质量变好的临界点。2013年中国城市人均GDP达到6880美元,进入环境质量正向转化的临界值范围。根据全国人均GDP与161个城市AQI指数的相关性分析判断,经济发展与大气环境演化的关系已通过环境库兹涅兹曲线顶点,但由于中国区域差距非常大,在不同发展阶段的区域,经济发展对空气质量的影响方向和强度应该存在较大差异。

3.2.2 区域城市空气质量演化的社会经济因素分异 为了避免样本数较少带来的模型不稳定性,综合考虑污染程度、经济发展阶段以及区位分布等因素,选取京津冀、长三角、珠三角和山东半岛4个地区进行分析。自变量选择在全国层面显著的经济增长、能源消耗、工业化、技术进步4个指标。经检验,4个地区均适用空间滞后模型,模型估计结果如表3所示。

京津冀地区R&D经费占GDP比重、工业增加值占GDP比重与AQI呈显著正相关,即指标值增大,AQI增大,大气环境质量下降。两个指标每提高1%,城市AQI分别增大1.644%和1.255%。人均GDP与AQI呈负相关,即指标值增大,AQI减小,大气环境好转。人均GDP每提高1%,AQI下降0.416%。2013年京津冀地区人均GDP达到8548美元,城市化水平也处于全国城市发展的高值^[43],可以初步判断经济发展和生态环境关系已通过库兹涅兹曲线拐点。长三角地区R&D经费占GDP比重、能源消耗、工业化与AQI呈正相关,这些指标每提高1%,AQI指数分别增大0.953%、0.404%、0.375%。人均

表2 2014年中国城市空气质量的社会经济影响因素解析
Tab. 2 Estimation results of the socio-economic factors of AQI at the national level in China in 2014

自变量系数	OLS模型		空间滞后模型	
	系数值	T值	系数值	Z值
α_0	0.001	0.012	-0.055***	-1.193
α_1 人口密度	0.062	0.767	0.038	0.691
α_2 人均GDP	-0.427***	-4.155	-0.242***	-3.518
α_3 城市化	-0.011	-0.140	-0.019	-0.356
α_4 工业化	0.200**	2.303	0.108*	1.892
α_5 能源消耗	0.458***	3.711	0.265***	3.322
α_6 民用汽车	0.056	0.413	0.079	0.908
α_7 环保投资	-0.107	-1.363	-0.066	-1.306
α_8 R&D经费	0.199**	2.035	0.104*	1.645
ε	—	—	0.657***	13.967
R^2	0.284	—	0.691	—
对数似然值	—	—	-133.578	—

注: *代表10%水平下显著, **代表5%水平下显著, ***代表1%水平下显著。

表3 2014年中国区域城市空气质量指数的社会经济影响因素

Tab. 3 Estimation results of the socio-economic factors of AQI in different regions in China in 2014

自变量 系数	$M_{\text{京津冀}}$		$M_{\text{长三角}}$		$M_{\text{珠三角}}$		$M_{\text{山东半岛}}$		全国	
	系数值	Z值	系数值	Z值	系数值	Z值	系数值	Z值	系数值	Z值
α_0	-0.042	-0.388	-0.244*	-1.785	-0.004	-0.022	-0.033	-0.260	-0.055	-1.166
α_2 人均GDP	-0.416*	-1.893	-0.994***	-3.646	0.414	0.883	-0.457**	-2.213	-0.252***	-3.814
α_4 工业化	1.255***	5.014	0.375***	2.580	0.179	0.854	0.237	1.430	0.104**	2.097
α_5 能源消耗	-0.195	-0.832	0.404*	1.792	0.545*	1.705	0.217	1.353	0.330***	5.566
α_8 R&D经费	1.644***	5.595	0.953***	3.010	-0.731*	-1.777	0.142	0.749	0.121**	1.961
ε	0.623***	3.667	0.312*	1.742	0.082***	0.301	0.751***	5.395	0.658***	13.870
R^2	0.850	—	0.549	—	0.279	—	0.711	—	0.682	—
对数似然值	-6.516	—	-25.476	—	-25.869	—	-14.809	—	-135.697	—

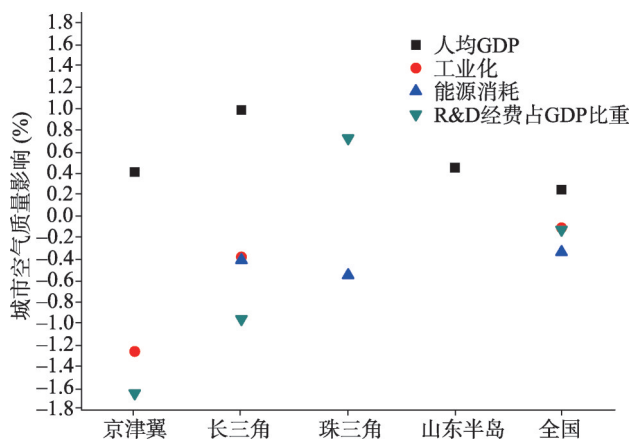
注: *代表10%水平下显著, **代表5%水平下显著, ***代表1%水平下显著。

GDP与AQI呈负相关,指标值每提高1%,AQI下降0.994%。2013年长三角地区人均GDP达13052美元,可以初步判断经济发展和生态环境关系已通过库兹涅兹曲线拐点。珠三角地区能源消耗与AQI呈显著正相关,能源消耗每增加1%,AQI指数增大0.545%;R&D经费占GDP比重与AQI呈显著负相关,指标值每增大1%,AQI减小0.731%。从技术进步的阶段性规律看,技术发展水平越高,全要素生产效率越高,资源利用效率越高,单位产出污染排放越低。广东是中国高新技术产业发展水平最高的地区之一^[44],技术进步的资源环境改善效应显著。山东半岛地区人均GDP与AQI呈显著负相关,人均GDP每增加1%,AQI减小0.457%。

3.2.3 中国城市空气质量演化的社会经济驱动规律 综合以上认为,在全国层面,在同时考虑人口集聚、经济增长、城市哈、工业化、能源消耗、社会发展、环境规制、技术进步等要素前提下,经济发展、工业化、能源消耗和技术进步4个要素表现出与城市空气质量变化之间显著的相关性。其中,经济发展表现为对大气环境质量改善的正向效应,工业化、能源消耗和技术进步表现为对大气环境质量改善的负向效应。

在区域层面,由于社会经济条件的差异,4个要素对城市空气质量影响的显著程度、影响方向和强度存在差异。经济发展表现出对城市空气质量改善的正向推动作用,并且人均GDP越高的地区,经济发展对城市空气质量改善的正向推动作用越大。工业化、能源消耗表现出对城市空气质量改善的负向效应,工业增加值占GDP比重越低,工业发展对空气质量的负向效应越大(图8)。

技术进步在不同发展阶段对空气质量改善的作用方向和作用强度差异明显。在京津冀、长三角和全国,R&D经费支出占GDP比重与城市空气质量呈显著负相关,并且负向影响程度依次减小。在珠三角地区,R&D经费支出占GDP比重与城市空气质量呈显著正相关。结合不同地区的技术发展水平可以判断:在经济发达地区,技术进步在推动资源利用效率提高的同时,导致地区生产活动规模扩大,资源能源需求增加,进而对大气环境产生负向影响。在经济不发达地区,技术进步推动经济发展方式由粗放向集约转化,对环境改善的负向效应较小。



注:正值表示对空气质量改善的正向效应,负值表示负向效应。

图8 中国不同区域城市空气质量的社会经济影响因素示意
Fig. 8 Socio-economic factors of air quality in different regions in China

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 比较2013年和2014年各类空气质量指数显示,中国城市空气质量显著下降,空气质量差的区域恶化态势更明显;城市空气质量达标天数比例有所提高,但天气污染程度增强;城市空气质量变化与地区社会经济活动表现出一定的时间耦合性;城市空气污

染表现出“东重西轻、北重南轻”的空间格局，区域一体化态势明显；区域城市空气污染的总体程度和分布结构具备明显的分异特征，区域空气污染形成和演化路径可基本归纳为：“重点城市污染加重—重点城市污染扩散—区域整体污染加重—重点城市引领治污—区域污染联防联控—区域整体污染减轻”。

(2) 解析中国城市空气质量变化的社会经济驱动力，从全国层面看，能源消耗、工业化和技术进步是推动城市空气质量恶化的重要因素，经济发展对城市空气质量改善具有显著的推动作用。受各地区资源环境基础和社会经济发展阶段影响，各类社会经济因素对城市空气质量改善的驱动方向和驱动强度有所不同。

(3) 根据人均GDP与案例城市AQI指数的相关性分析判断，全国层面以及部分发达地区经济发展与大气环境演化的关系已通过环境库兹涅兹曲线顶点，人均GDP越高的地区，经济发展对城市空气质量改善的正向推动作用越大。在发达地区，技术进步对大气环境产生的负向影响明显；在不发达地区，技术进步对环境改善的负向影响较小。

4.2 讨论

社会经济发展是造成空气质量恶化的关键因素，这一点已经达成广泛共识，诸多研究也证实了这一点。但是从本研究的分析结果看，随着经济发展和城镇化水平的提高，社会经济因素对空气质量的影响与地区发展阶段相适应，呈现显著的阶段性特征，不同阶段各社会经济要素对大气环境的影响存在质和量的差异。即使在社会经济发展水平相近的地区，受地区资源环境基础等多重因素复杂机制的影响，社会经济要素对空气质量的影响方向和强度也存在显著差异。因此，讨论遏制空气质量恶化的手段，不等于要全面遏制经济发展和城镇化水平提升，需要在比较解析社会经济因素与空气质量相关性的基础上，立足区域发展现状特征和资源环境基础，遴选关键要素，确定整治重点和导向。

中国经济发展和环境变化之间确实存在环境库兹涅兹倒“U”型曲线关系，且当前大部分地区仍未通过倒“U”型曲线的拐点。换言之，未来相当长的一段时期内，经济发展对生态环境的胁迫和阻滞作用都可能存在。因此如何在短时期内使大部分地区的发展水平跨过曲线拐点是化解经济发展与空气质量恶化矛盾的关键。在这一过程中，最大限度化解经济发展导致的负面影响，关键问题是彻底转变经济发展方式，依靠科技和创新驱动，尽快建立资源节约和环境友好型发展模式，实现经济发展与环境之间的相互促进和协调发展。

受样本数量限制，对中国城市空气质量变化的社会经济驱动规律的总结分析，仅基于全国和若干案例区的实证分析结果。全面验证社会经济发展对空气质量的影响是一个系统工程，需要长期稳定的数据积累和持续的方法创新。

参考文献(References)

- [1] Chan C, Yao X. Air pollution in mega cities in China. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(1): 1-42.
- [2] Huang W, Tan J, Kan H, et al. Visibility air quality and daily mortality in Shanghai, China. *Sci Total Environ*, 2009, 407(10): 3295-3300.
- [3] Tian S, Pan Y, Liu Z, et al. Size-resolved aerosol chemical analysis of extreme haze pollution events during early 2013 in urban Beijing, China. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 279(28): 452-460.
- [4] Hyslop N P. Impaired visibility: The air pollution people see. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(1): 182-195.
- [5] Pope C A, Dockery D W. Health effects of fine particle air pollution: lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006, 56(6): 709-742.
- [6] Wang S X, Hao J M. Air quality management in China: issues, challenges, and option. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(1): 2-13.

- [7] Wang Zhenbo, Fang Chuanglin, Xu Guang, et al. Spatial-temporal characteristics of the $PM_{2.5}$ in China in 2014. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(11): 1720-1734. [王振波, 方创琳, 许光, 等. 2014年中国城市 $PM_{2.5}$ 浓度的时空变化规律. *地理学报*, 2015, 70(11): 1720-1734.]
- [8] Peng Jian, Chen Sha, Lü Huiling, et al. Spatiotemporal patterns of remotely sensed $PM_{2.5}$ concentration in China from 1999 to 2011. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 174: 109-121.
- [9] Wang Haipeng, Zhang Bin, Liu Zuhua, et al. Wavelet analysis of air pollution index changes in Lanzhou during the last decade. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(5): 1070-1076. [王海鹏, 张斌, 刘祖涵, 等. 基于小波变换的兰州市近十年空气污染指数变化. *环境科学学报*, 2011, 31(5): 1070-1076.]
- [10] Qiao X, Jaffe D, Tang Y, et al. Evaluation of air quality in Chengdu, Sichuan Basin, China: Are China's air quality standards sufficient yet? *Environ. Monit. Assess.*, 2015, 187(5): 1-11.
- [11] Wu Ying, Ji Dongsheng, Song Tao, et al. Characteristics of atmospheric pollutants in Beijing, Zhuozhou, Baoding and Shijiazhuang during the period of summer and autumn. *Environmental Science*, 2011, 32(9): 2741-2749. [吴莹, 吉东升, 宋涛, 等. 夏秋季北京及河北三城市的大气污染联合观测研究. *环境科学*, 2011, 32(9): 2741-2749.]
- [12] Li Xiangyang, Ding Xiaomei, Gao Hong, et al. Characteristics of air pollution index in typical cities of North China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(3): 96-101. [李向阳, 丁晓妹, 高宏, 等. 中国北方典型城市API特征分析. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(3): 96-101.]
- [13] Zhao X J, Zhang X L, Xu X F, et al. Seasonal and diurnal variations of ambient $PM_{2.5}$ concentration in urban and rural environments in Beijing. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(3): 2893-2900.
- [14] Wang S L, Gao J, Zhang Y C, et al. Impact of emission control on regional air quality: An observational study of air pollutants before, during and after the Beijing Olympic Games. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(1): 175-180.
- [15] Fang C L, Liu X L. Temporal and spatial differences and imbalance of China's urbanization development during 1950-2006. *Journal of Geographical Science*, 2009, 19(6): 719-732.
- [16] Wang Shulan, Zhang Yuanhang, Zhong Liujv, et al. Interaction of urban air pollution among cities in Zhujiang Delta. *China Environmental Science*, 2005, 25(2): 133-137. [王淑兰, 张远航, 钟流举, 等. 珠江三角洲城市间空气污染的相互影响. *中国环境科学*, 2005, 25(2): 133-137.]
- [17] Chameides W L, Li X S, Tang X Y, et al. Is ozone pollution affecting crop yields in China. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(7): 867-870.
- [18] Xu J L, Zhu Y X, Li J L. Case studies on the processes of surface ozone pollution in Shanghai. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1999, 49(6): 716-724.
- [19] Luo C, John J C, Zhou X J, et al. A non-urban ozone air pollution episode over eastern China: Observations and model simulations. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(D2): 1889-1908.
- [20] Wang T, Vincent T F, Cheung M, et al. Ozone and related gaseous pollutants in the boundary layer of eastern China: overview of the recent measurements at a rural site. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(12): 2373-2376.
- [21] Xu Xiangde, Zhou Xiujie, Shi Xiaohui, et al. Spatial structure and scale characteristics of air pollution impacts in urban community. *Science in China*, 2005, 35(S1): 1-19. [徐祥德, 周秀骥, 施晓晖, 等. 城市群落大气污染源影响的空间结构及尺度特征. *中国科学*, 2005, 35(S1): 1-19.]
- [22] Wang Angyang, Pan Yue, Tong Yanbing. Research of temporal and spatial distribution of air pollution in the major cities of the Yangtze River Delta. *Environmental Protection Science*, 2015, 41(5): 131-136. [王昂扬, 潘岳, 童岩冰. 长三角主要城市空气污染时空分布特征研究. *环境保护科学*, 2015, 41(5): 131-136.]
- [23] Li Wenjie, Zhang Shihuang, Gao Qingxian, et al. Relationship between temporal-spatial distribution pattern of air pollution index and meteorological elements in Beijing, Tianjin and Shijiazhuang. *Resources Science*, 2012, 34(8): 1392-1400. [李文杰, 张时煌, 高庆先, 等. 京津石三市空气污染指数(API)的时空分布特征及其与气象要素的关系. *资源科学*, 2012, 34(8): 1392-1400.]
- [24] Amos P K, Mickley L J, Jacob D J. Correlations between fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of $PM_{2.5}$ to climate change. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(32): 3976-3984.
- [25] Zhang Renwen, Fan Shaojia. Study of the influence of wind field on air quality over the Pearl River Delta. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (Natural Science Edition)*, 2011, 50(6): 130-134. [张人文, 范绍佳. 珠江三角洲风场对空气质量的影响. *中山大学学报(自然科学版)*, 2011, 50(6): 130-134.]

- [26] Zaakey A S, Solmon F, Giorgi F. Implementation and testing of a desert dust module in a regional climate model. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2006, 6(2): 4687-4704.
- [27] Adams J W, Rodriguez D, Cox R A. The uptake of SO₂ on Saharan dust: A flow tube study. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2005, 5(3): 2643-2676.
- [28] Sarrat C, Lemonsu A, Masson V, et al. Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(10): 1743-1758.
- [29] Grossman G M, Krueger A B. Environmental impacts of North American Free Trade Agreement. *Social Science Electronic Publishing*, 1992, 8(2): 223-250.
- [30] Panayotou T. Demystifying the Environmental Kuznets curve: Turning a black box into a policy tool. *Environment and Development Economics*, 2001, 2(4): 465-484.
- [31] Han L J, Zhou W Q, Li W F, et al. Impact of urbanization level on urban air quality: A case of fine particles (PM_{2.5}) in Chinese cities. *Environmental Pollution*, 2014, 194(7): 163-170.
- [32] Zhao J, Chen S, Wang H, et al. Quantifying the impacts of socio-economic factors on air quality in Chinese cities from 2000 to 2009. *Environmental Pollution*, 2012, 167(6): 148-154.
- [33] Patton A P, Perkins J, Zamore W, et al. Spatial and temporal differences in traffic-related air pollution in three urban neighborhoods near an interstate highway. *Atmospheric Environment*, 2014, 99: 309-321.
- [34] Ma Limei, Zhang Xiao. The spatial effect of China's haze pollution and the impact from economic change and energy structure. *China Industrial Economics*, 2014(4): 19-31. [马丽梅, 张晓. 中国雾霾污染的空间效应及经济能源结构影响. *中国工业经济*, 2014(4): 19-31.]
- [35] Xi Penghui, Liang Ruobing. The impact of gasoline price fluctuation on the air pollution: through the channel of motor vehicle use. *China Industrial Economics*, 2015(10): 100-114. [席鹏辉, 梁若冰. 油价变动对空气污染的影响: 以机动车使用为传导途径. *中国工业经济*, 2015(10): 100-114.]
- [36] Wang Yan, Chai Fahe, Wang Yonghong, et al. Transport characteristics of air pollutants over the Yangtze Delta. *Environmental Science*, 2008, 29(5): 1430-1435. [王艳, 柴发合, 王永红, 等. 长江三角洲地区大气污染物输送规律研究. *环境科学*, 2008, 29(5): 1430-1435.]
- [37] Cliff A D, Ord J K. Spatial processes: models and applications. *Population*, 1982, 37: 963.
- [38] Anselin L, Kelejian H H. Testing for spatial error autocorrelation in the presence of endogenous regressors. *International Regional Science Review*, 1997, 20(1/2): 153-182.
- [39] Huang Jinchuan, Fang Chuanglin. Analysis of coupling mechanism and rules between urbanization and eco-environment. *Geographical Research*, 2003, 22(2): 211-220. [黄金川, 方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析. *地理研究*, 2003, 22(2): 211-220.]
- [40] Damodar N G, Dawn C P. *Basic Econometrics*. 5th ed. Tata McGraw-Hill Education Pvt. Ltd., 2013: 310-315.
- [41] Anselin L. *Spatial Econometrics: Methods and Models*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988: 10-19.
- [42] Wing I S. Explaining the declining energy intensity of the US economy. *Resource and Energy Economics*, 2008, 30(1): 21-49.
- [43] Fang Chuanglin, Wang Deli. Comprehensive measures and improvement of Chinese urbanization development quality. *Geographical Research*, 2011, 30(11): 1931-1946. [方创琳, 王德利. 中国城市化发展质量的综合测度与提升路径. *地理研究*, 2011, 30(11): 1931-1946.]
- [44] Yang Qingke, Duan Xuejun, Zhang Wei, et al. Spatial evolution of high-tech industry development level in china and analysis of the influencing factors. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(12): 1649-1658. [杨清可, 段学军, 张伟, 等. 中国高新技术产业发展水平格局演变及影响因素分析. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(12): 1649-1658.]

Spatio-temporal variations and socio-economic driving forces of air quality in Chinese cities

LIN Xueqin¹, WANG Dai²

(1. College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Air pollution is a serious problem brought by the rapid urbanization and economic development in China, imposing great challenges and threats to population health and the sustainability of the society. Based on the real-time air quality monitoring data obtained for each Chinese city from 2013 to 2014, the spatio-temporal characteristics of air pollution are analyzed using various exploratory spatial data analysis tools. With spatial econometric models, this paper further quantifies the influences of social and economic factors on air quality at both the national and regional scales. There are several important findings: (1) During 2013 and 2014, the number of days with air quality meeting the national standard are increasing, but the annual air quality is getting worse, which is evidenced by a significant increase of AQI values during the period (higher AQI values representing worse air quality). There also appear to be substantial regional variations in the sense that air quality tends to be better in the south and east of China compared with the northern and western China. In terms of temporal patterns, air quality in Chinese cities shows significant seasonal variations, with better-than-average air quality observed during summer and autumn while worse-than-average air quality in spring and winter. (2) With respect to the driving forces of air quality variations, energy consumption, industrialization, investment in technology, and economic development (per capita GDP) have been found to be statistically significantly associated with air quality at the national scale. For example, 1% increase in per capita GDP is related to a decrease of about 0.24% in AQI values (thus better air quality), everything else equal. (3) There is great heterogeneity in the driving forces of air quality among different regions. For instance, whilst one unit increase in industrialization rates (that is an increase of one percentage) is associated with 10.4% increase in AQI values at the national scale, the same amount of increase in industrialization rates is associated with 125.5% and 37.5% increases in AQI values in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan areas and the Yangtze River Delta, respectively. Such spatial heterogeneity has also been observed in the associations between air quality and energy consumption, investment in technology and per capita GDP, implying that geography should be taken into account in the future exploration of the relationships between economic development and air quality or general environmental pollution issues and in the design and implementation of government policies targeting air pollution deductions and sustainable development.

Keywords: city air quality; spatio-temporal variations; social economy; driving forces; city; China