

引用格式:姚尧,李江风,胡涛,等.中国城市NO₂浓度的时空分布及社会经济驱动力[J].资源科学,2017,39(7):1383-1393.
[Yao Y, Li J F, Hu T, et al. Spatiotemporal variation in NO₂ concentrations and socioeconomic driving forces in Chinese cities[J].
Resources Science, 2017, 39(7): 1383-1393.] DOI: 10.18402/resci.2017.07.15

中国城市NO₂浓度的时空分布及社会经济驱动力

姚尧^{1,2}, 李江风^{1,2}, 胡涛³, 杨媛媛⁴, 丁镭⁵

(1. 中国地质大学(武汉)公共管理学院, 武汉 430074;

2. 国土资源部法律评价工程重点实验室, 武汉 430074;

3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074;

4. 华北水利水电大学管理与经济学院, 郑州 450046;

5. 宁波职业技术学院工商学院, 宁波 315800)

摘要:城市空气质量改善是当前中国社会经济转型发展过程中的重要目标。基于中国274个地级及以上城市2004-2013年以来的监测数据对NO₂浓度的时空特征进行分析,并通过空间计量经济模型构建了社会经济要素对城市NO₂污染影响的动力机制。结果表明:①10年间,城市NO₂浓度年均值整体呈现先波动下降再增加的“U”形曲线特征,NO₂浓度年达标率由2004年78.1%降至2013年最低值73.0%,NO₂污染的控制总体不稳定。②城市NO₂浓度分布格局总体发生一定变化,并在局部区域有显著改变。京津冀、山东半岛、长三角等东部经济发达城市是主要NO₂高污染区,并存在显著的空间正相关关系(集聚状态)。③解析了城市NO₂浓度分布变化的社会经济驱动力。10年间,城市经济增长依然是影响NO₂浓度和变化的主要原因,并呈“U”型曲线特征;人口城市化水平、二产比重和机动车数量激增是恶化城市NO₂浓度的重要因素。空间自回归系数值为0.236 659,表明城市的NO₂浓度除受自身影响外,还受相邻城市的溢出扩散影响。未来,需继续加强氮氧化物减排控制,并在NO₂治理过程中注重城市间的联合防控。

关键词:NO₂浓度;时空演化;社会经济;驱动力;空间计量模型;城市;中国

DOI: 10.18402/resci.2017.07.15

1 引言

改革开放以来,伴随社会经济的跨越式发展,中国城镇化水平也取得快速提高^[1,2],人口城镇化率由1978年的17.9%增长到了2015年的56.1%,年均增长约1.03%。这极大促进了城市物质财富的积累和居民生活水平的提高,也不可避免带来了包括雾霾、光化学烟雾等空气污染问题在内的“城市病”现象。因而,科学落实污染物减排、不断提升城市空气质量,是转型期中国绿色发展的重要目标之一^[3]。

作为重要的痕量气体之一,NO₂是环保部门重点监测的一种大气污染物,也是酸雨、对流层臭氧

和大气气溶胶的重要前体物,对生态和动物、人体健康均具有较大的危害^[4,5]。最新的中国灰霾成因研究报道亦表明,大气细颗粒物中NO₂液相氧化SO₂是目前雾霾形成的一个重要途径,并根据由易到难的原则,认为应优先加强对氮氧化物(NO_x=NO+NO₂)的污染减排控制^[6]。因此,在全社会关注雾霾治理以及“十二五”NO_x减排的背景下,重新审视形成雾霾的前体物NO₂的浓度及其时空演化特征,对区域空气污染治理有着积极调控作用。

目前,基于环境地理视角的城市NO₂浓度相关研究主要表现在三个方面:①利用卫星遥感数据揭

收稿日期:2017-01-09;修订日期:2017-05-05

基金项目:国土资源公益性行业科研专项(201511004-4)。

作者简介:姚尧,男,贵州榕江人,博士生,主要研究方向为土地利用转型与环境经济。E-mail:yyy@cug.edu.cn

通讯作者:李江风,E-mail:jfli0524@163.com

示对流层 NO₂ 的时空分布状况以及区域差异。臭氧监测仪(OMI)传感器获取的 NO₂ 数据具有相对较高的质量和时空分辨率,大量的研究基于 NO₂ 柱浓度数据来反演和比较区域 NO_x 排放的变化^[7-12]。②利用地面监测的质量浓度数据研究 NO₂ 的时空分布特征。比如程念亮等、王占山等对北京市的 NO₂ 时空分布特征进行了分析^[13,14];王英等对京津冀和长三角两个区域的近地面 NO₂ 浓度和垂直柱浓度进行差异比较^[15];此外,还有些学者在研究城市空气质量时空演化特征时关注了 NO₂ 的污染变化^[16,17]。然而,传统的 NO₂ 地基监测数据关注局地大气污染微观特征,虽然精度较高但在空间覆盖上具有局限性^[11],多数研究聚焦于某一城市或城市群,并且研究尺度序列较短或是某单一年份,而缺乏对长时间序列、大尺度上的综合比较。③关注大气 NO₂ 的形成机制和人类影响关系^[5,11,18]。已有研究证实,地区产业以及能源结构很大程度上决定了地区的 NO_x 污染来源,进而影响区域的 NO₂ 浓度污染状况^[19]。并结合环境库兹涅茨曲线(EKC)理论,对 NO₂ 浓度与经济发展、城市化的关系进行了大量的实证探索^[20-22],但对污染物排放格局的空间关联和溢出效应研究欠缺^[23]。

基于此,本文以 2004-2013 年中国地级及以上城市的 NO₂ 浓度数据为研究对象,探讨其时空演化特征,并利用空间计量经济模型关注社会经济要素对 NO₂ 污染影响的动力机制,以期制定因地制宜的 NO₂ 污染防控措施提供科学依据。

2 数据来源和研究方法

2.1 数据来源

NO₂ 浓度数据来源于《中国环境年鉴(2005-

2014年)》和《中国环境质量报告(2008-2014年)》^[24,25],部分缺失数据参考了环保部、各省市环保部门的环境质量报告书或环境状况公报。考虑到面板数据的完整性和连续性,最后共筛选出 274 个城市。再运用数理统计分析和 ArcGIS 空间分析方法,对 2004-2013 年来 NO₂ 浓度的时空变化特征进行分析。

社会经济发展数据主要来自《中国城市统计年鉴(2005-2014年)》^[26],部分缺失数据参考各省市的统计年鉴。考虑到空气浓度的年均值主要是来自城区站点的监测所得,本文采用市辖区统计口径数据来构建模型^[17],城市社会经济指标亦选择对应的市辖区统计数值,即建成区面积、市辖区人均 GDP、市辖区二产比重、建成区绿化覆盖率等指标。各变量的统计特征见表 1,其中各变量的数量个数为所筛选出的城市个数 274 乘以年份所得。

2.2 研究方法

2.2.1 空间自相关检验

空间自相关检验是空间计量经济分析的一个前提条件和重要内容。首先,采用全局自相关检验来表征城市 NO₂ 浓度的整体分布状况,进而判断其是否存在空间集聚性,一般用 Global Moran's I 指数进行统计检验^[27-29],其计算公式如下:

$$Global\ Moran's\ I = \frac{N \sum_i \sum_j W_{ij} (X_i - \bar{X}) (X_j - \bar{X})}{(\sum_i \sum_j W_{ij}) \sum_i (X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

式中 N 为城市总数; X_i 和 X_j 为城市 i 和 j 的 NO₂ 浓度; \bar{X} 为 NO₂ 浓度的平均值; W_{ij} 为空间权重矩阵,采用邻接标准来定义(相邻为 1,不相邻则为 0)。Global Moran's I 取值区间在 $[-1, 1]$,并通过 I 值大小来判定其分布的集聚状况。当 $I < 0$ 时表现为空间负

表 1 各个变量的统计特征

Table 1 Statistical description of each variable

	变量	数量	均值	标准差	最小值	最大值
NO ₂	NO ₂ /(μg/m ³)	2 740	30.230	11.202	3.000	73.000
建成区面积	Area/km ²	2 740	108.297	146.280	5.000	1 350.000
民用汽车总量	Car/万辆	2 740	23.600	8 164.540	0.840	518.900
绿化覆盖率	Green/%	2 740	36.258	8.525	2.410	91.030
第二产业比重	Industry/%	2 740	52.671	78.474	12.400	90.970
人均GDP	PGDP/万元	2 740	3.974	3.028	0.185	26.775
人口城市化率	Urban/%	2 740	47.940	16.244	9.210	100.000

2017年7月

相关,城市NO₂浓度呈扩散或均匀分布;当 $I=0$ 时表示空间不相关,城市NO₂浓度呈无规律的随机分布; $I>0$ 时表示其分布呈空间正相关,城市NO₂浓度则呈集聚分布特征。具体的显著性水平检验可采用标准化统计量Z值进行^[28,29]。

为进一步揭示局部层面各邻近地理单元的空间相互作用关系,即一个城市的NO₂浓度与邻近城市NO₂浓度的相关程度,这里利用Moran散点图和Local Moran's I指数进行检验^[29,30]。其中,Moran散点图用以反映变量与其空间滞后向量的相关关系,揭示空间单元观测值之间关联和差异程度,共由四个不同象限构成,分别为高高型(HH)、高低型(HL)、低高型(LH)和低低型(LL),依次表示某城市NO₂浓度与其邻域城市NO₂浓度的四种不同关系:HH为城市本身与邻近城市的NO₂浓度均较高(存在较强的空间正相关,为高浓度热点区),HL为城市本身NO₂浓度高,而邻近城市NO₂浓度低(存在较强的空间负相关,异质性突出),LH则与HL相反,LL型为城市本身与邻近城市的NO₂浓度均较低(存在较强的空间正相关,为低污染高质量集聚区)。Local Moran's I计算采用ArcGIS10.2软件完成,Moran散点图采用GeoDa9.5软件完成^[3]。

2.2.2 基于空间效应的NO₂浓度驱动力模型

(1)基本模型假定。前人研究发现,空气质量的变化受多种内外动力因素的综合影响,城市社会经济指标,尤其是表征城市化过程的若干指标被广泛采纳,用于空气质量变化的影响模型构建中^[20]。选取市辖区人均GDP(PGDP)、人口城市化率(Urban)、建成区面积(Area)、第二产业比重(Industry)、民用汽车总量(Car)、建成区绿化覆盖率(Green),分别表示城市经济发展、人口集聚、城市扩张、产业结构、城市交通和城市绿化吸收等对城市NO₂浓度的影响。此外,加入时间哑变量(T)表征因变量随时间推移的自发变化趋势,消除污染排放的累积和滞后效应带来的潜在误差干扰。基于此,假定的二次曲线基本分析模型如下:

$$\begin{aligned} \ln NO_2 = & \beta_1 + \beta_2 \ln PGDP + \beta_3 \ln^2 PGDP \\ & + \beta_4 \ln Urban + \beta_5 \ln Area \\ & + \beta_6 \ln Industry + \beta_7 \ln Car \\ & + \beta_8 \ln Green + \beta_9 T + \varepsilon \end{aligned} \quad (2)$$

式中 NO_2 为城市的NO₂浓度; $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_9$ 为待估计的模型参数; ε 为模型的误差随机项。

(2)空间效应模型假定。依据空间计量回归的基本思想,当前研究城市环境质量空间效应的计量模型主要有两种:①空间滞后模型(SLM);②是空间误差模型(SEM)^[28,32]。首先利用ADF-Fisher和PP-Fisher方法对面板数据做单位根检验,结果发现因变量和所有解释变量都是平稳的,可进行后续的回归。其次,利用OLS法估计不考虑空间相关性的约束模型,进而比较拉格朗日乘数的显著性来进行空间模型确定^[33,34]。如果拉格朗日乘数LM(lag)比LM(error)更为显著,同时R-LM(lag)比R-LM(error)显著,就考虑选用SLM模型。具体的SLM表达式为:

$$\begin{aligned} \ln NO_2 = & \delta WNO_2 + \beta_1 + \beta_2 \ln PGDP \\ & + \beta_3 \ln^2 PGDP + \beta_4 \ln Urban \\ & + \beta_5 \ln Area + \beta_6 \ln Industry \\ & + \beta_7 \ln Car + \beta_8 \ln Green + \beta_9 T + \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

式中 δ 为空间回归系数; W 为邻近空间权值矩阵; ε 为误差随机项。

若LM(error)比LM(lag)更为显著,并且R-LM(error)比R-LM(lag)显著,就考虑选用SEM模型来分析。具体的SEM表达式为:

$$\begin{aligned} \ln NO_2 = & \beta_1 + \beta_2 \ln PGDP + \beta_3 \ln^2 PGDP \\ & + \beta_4 \ln Urban + \beta_5 \ln Area + \beta_6 \ln Industry \\ & + \beta_7 \ln Car + \beta_8 \ln Green + \beta_9 T + \lambda W\varepsilon + \mu \end{aligned} \quad (4)$$

式中 λ 为空间误差系数; μ 为正态分布的随机误差向量。最后,面板数据模型的类型(固定效应或者随机效应),采用Hausman检验完成。

3 NO₂浓度的时空分布格局

3.1 时间变化特征

NO₂城市年均浓度值与达标城市比例变化见图1。可以发现,2004年以来,全国274个地级及以上城市NO₂浓度年均值整体呈现先波动下降再增加的“U”形曲线特征,具体年均浓度的平均值由2004年的32.13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 下降到最低值2009年的28.84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,再上升到最高值2013年的34.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,相较于2004年总体增幅为9.25%。总的来看,10年间NO₂的年均浓度平均值皆低于2012年版新《环境空气质量标准》里所规定的二级标准限值(40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),高值

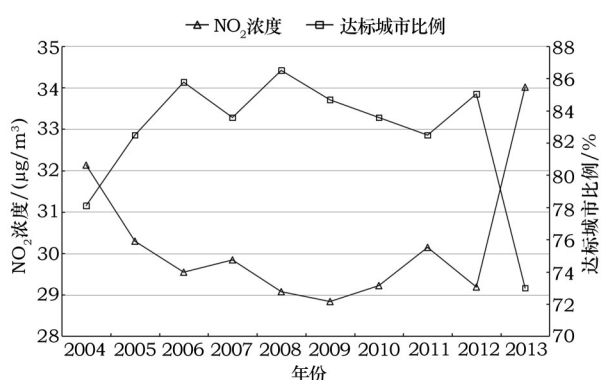


图1 城市NO₂浓度年均值与达标城市比例变化

Figure 1 The NO₂ concentration and ratio of reaching standard cities at county level or above in China from 2004 to 2013

污染区主要集中在数量相对较少的部分工业和城市化发展快速的发达区域。

与之相反,地级城市中NO₂浓度年均值达标城市比例则表现为倒“U”形曲线特征,其中达标城市比例由2004年的78.1%上升2008年的最高值86.5%,再下降到最低值2013年的73%。这意味着10年间,城市NO₂污染的控制总体不稳定,表现出一定恶化的发展态势。但受北京奥运会的举办及严格的环境规制手段的影响^[35,36],相比2004年,2008年NO₂浓度年均值上有明显下降,并在达标城市比例上达到了最高,体现了个别年份空气环境治理的有效性。此外,从各城市NO₂浓度分布区间可发现:①城市集中分布特征明显。其中,2004年浓度区间位于(10~60)μg/m³的城市数量有263个,到了2008年则增长到271个,而2013年依然保持有269个。②高浓度污染城市总体数量较少,没有出现大于旧空气质量标准二级浓度限值(80μg/m³)的高污染城市。历年大于60μg/m³的高浓度城市数量总体保持6个左右。因此,有必要重点针对高浓度区城市进行重点的NO_x减排控制和NO₂质量改善。

3.2 空间分布特征

基于ArcGIS软件的空间插值分析功能,选取274个城市2004年、2008年和2013年三个截面年份的NO₂年均值数据,绘制出对应年份的NO₂浓度的空间分布演化(见图2)。

从图2可以发现,2004-2013年,全国NO₂污染并没有显著改善,但NO₂浓度分布格局总体发生一定变化,并在局部区域有显著改变。①首先,京津

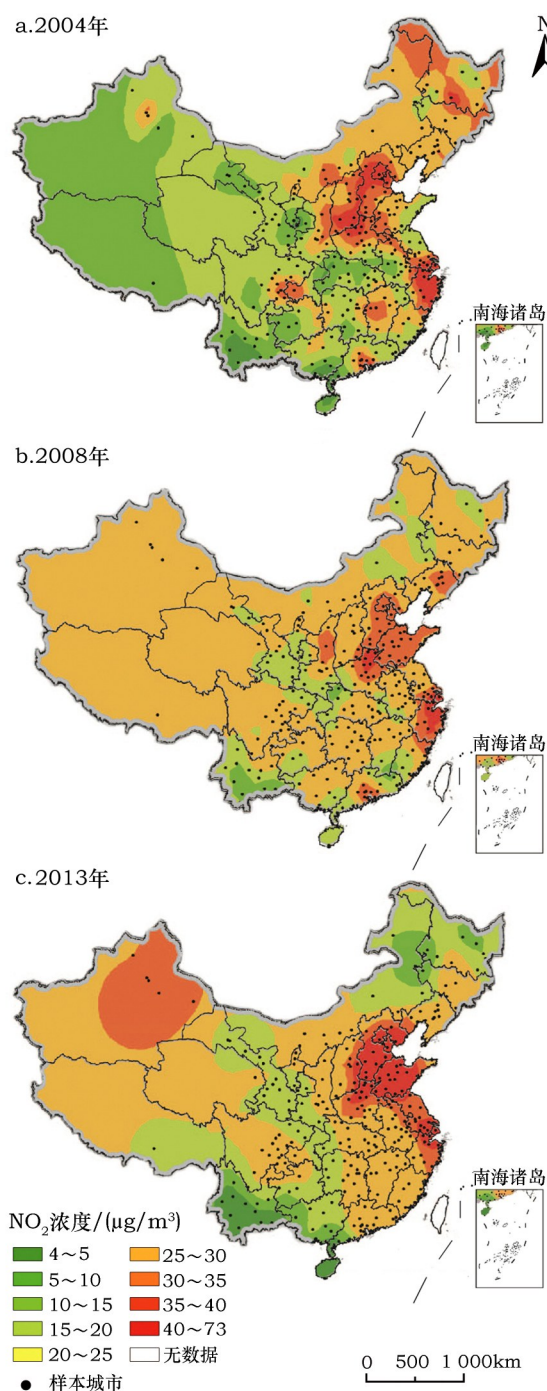


Figure 2 Spatial distribution of NO₂ concentration in China in 2004, 2008 and 2013

冀地区、山东半岛、长三角等东部经济发达城市(群)是我国NO₂主要污染区域,没有改变。但西部城市普遍有浓度增加、污染趋重的趋势。②早期NO₂浓度相对较高的次级污染区域如珠三角、东北、辽宁半岛等城市群,到了2013年则有一定改善,其中东北大部分城市在2004-2013年间呈现了较好的

2017年7月

改善趋势,其他污染较轻的区域主要零星分布在西南、内蒙古部分区域以及甘肃南部周围一带。③形成了以新疆乌鲁木齐等为代表城市的新的污染相对严重区域。这种分布特征和演化状况与张兴赢等、李龙等结合 OMI 遥感数据分析的对流层 NO₂ 浓度分布特征和结果基本一致^[9,11]。即卫星遥感和地面监测数据的比较验证发现,城市对流层 NO₂ 柱密度与近地面的 NO₂ 浓度呈现较为一致的变化规律,并且深受工业活动、机动车尾气排放等人类活动的影响。由此,中国开始在“十二五”时期将 NO_x 分重点区域、重点行业减排控制纳入总量控制的约束指标体系中,并在“十三五”环保规划中继续强调。同时,未来的城市 NO₂ 控制,尤其是东部经济发达城市(群)的 NO_x 减排控制和 NO₂ 质量改善是个焦点和难点之一,也越来越受到相关学者的关注^[5,14,31]。

3.3 空间集聚特征

根据全局 Moran's I 指数的时段变化特征,利用 GeoDa 和 ArcGIS 软件,绘制 2004 年、2008 年、2013 年三个截面年份 274 个城市 NO₂ 浓度的 Moran's I 散点分布图 3(图 3a、图 3c、图 3e 为 LISA 集聚图,图 3b、图 3d、图 3f 为相应的 Moran 散点分布)。

从图中可以发现,①全局 Moran's I 值均大于 0,并在 1% 水平上显著,即 NO₂ 的浓度分布以集聚状态分布,有着显著的空间正相关关系,这亦表明可引入空间计量回归模型做检验;②从具体数值来看,2004 年的 Moran's I 值为 0.236 659,降低到 2008 年的 0.142 070,再上升至 2013 年的 0.412 595,表明 NO₂ 浓度分布的空间集聚水平呈先弱化再增强的演变过程,2013 年既是 NO₂ 污染加重的年份,也是 NO₂ 浓度集聚凸显的时期;③从 LISA 图的集聚结果来看,在通过显著性检验的城市当中,HH 和 LL 型集聚是主要的空间集聚类型。结合图 2,可以看出,2004 年 HH 集聚区主要分布在京津冀都市圈的北京、天津、张家口、石家庄、保定,河南的郑州、洛阳,长三角的苏州、湖州、绍兴等 21 个城市,LL 集聚区主要表现为零散分布的特征,包括甘肃的张掖、定西、平凉,广西的贵港、梧州、玉林等 18 个城市;到 2008 年,HH 集聚区范围有一定程度缩小(传统的高污染地区华北大部城市基本消失,主要得益于北京奥运会期间对北京及其周边城市的空气污染排放

控制与治理^[36]),主要分布在河南的新乡、开封、郑州、许昌及长三角的上海市、湖州、绍兴等 11 个城市;LL 集聚区范围基本维持稳定,并集中分布在甘肃、广东等 6 小块区域共 20 个城市。而在 2013 年,HH 集聚区范围则又进一步扩大,主要集聚城市从华北地区扩散到山东半岛大部分城市,并依然涵盖了长三角的嘉兴、湖州等共 35 个城市,表现出一定的区域恶化蔓延趋势;LL 集聚区的空间分布依然较为稳定、空间格局也基本保持一致,共有 22 个城市。未来,在重点控制 HH 集聚区的污染形成同时,可着力培育 LL 型的 NO₂ 低浓度值“空气集聚净区”,以阻隔连片 HH 集聚区的溢出蔓延。

4 NO₂ 浓度分布的社会经济驱动力

通过空间自相关的分析结果证实了 NO₂ 浓度分布存在空间相关性,因此在模型的建立过程中必须在基本模型假设的基础上考虑空间效应的影响,运用 MatlabR2010a 软件对数据模型进行处理(结果见表 2,见 1389 页)。

4.1 NO₂ 浓度分布的社会经济因素解析

Hausman 检验结果发现,普通面板检验过程中随机效应模型更为合适。从回归系数来看,人均 GDP 通过了 1% 的显著性水平检验,并且二次型系数为正值,一次项系数为负值,表明城市空气 NO₂ 污染在 10 年间呈“U”型变化的趋势,即随着城市经济的发展,NO₂ 浓度先降低改善后增大恶化。该结果与李茜等对 2001-2010 年的中国 237 个城市的面板检验结果一致^[20],即中国空气中 NO₂ 污染依然处在不断加重阶段,还没有到达污染随经济发展而减轻的改善拐点,当前高能耗的经济发展方式和 NO₂ 的污染还没有分离,不存在经典的 EKC 倒“U”型曲线。此外,经计算,U 型曲线的最低拐点值为市辖区人均 GDP 为 19 909 元,从城市的分布数量来看,占总数的 72.7% 的城市分布在“U”型曲线的右侧(浓度上升、污染加剧),但越过拐点的城市数量在 2011 年后减少放缓,这可能与“十二五”后国家对 NO_x 减排的控制政策有关,也与 2011 年后产业结构调整对 NO_x 减排效应开始显现有关^[3]。

从其他解释变量结果看,除建成区绿化覆盖率对 NO₂ 浓度有削减作用以外(5% 水平上显著),人口城市化率、第二产业比重、汽车拥有量三个指标对

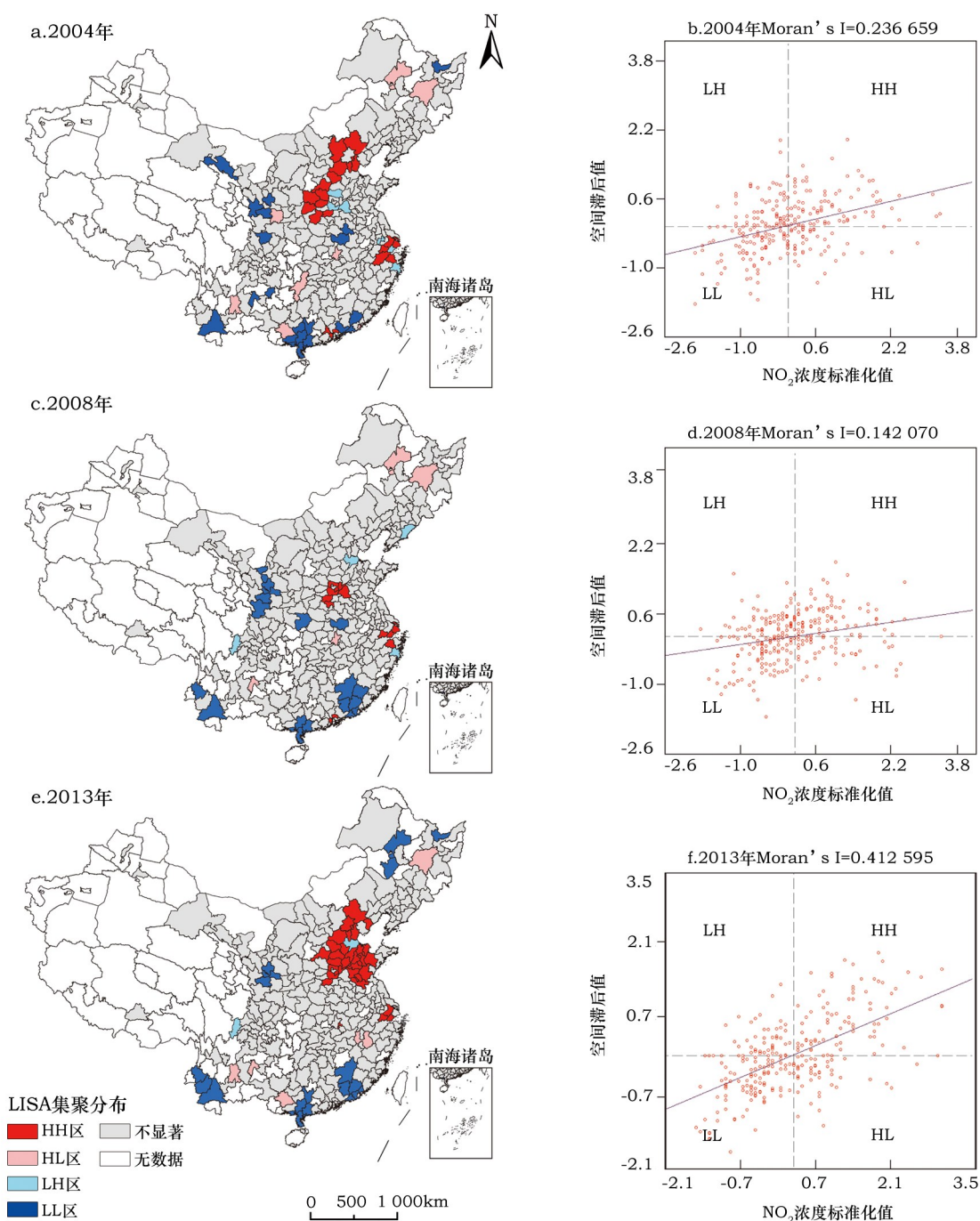


图3 274个城市NO₂浓度分布的LISA集聚图和Moran散点分布

Figure 3 Moran scatter plot of NO₂ concentration in 2004, 2008, and 2013. The right part shows quadrant distributions of NO₂ concentration, and the left part shows the corresponding spatial patterns

NO₂浓度增高有着显著的贡献(均在1%水平上显著),有加剧污染的趋势。Lamsal等利用NASA遥感观测的NO₂数据与多国城市人口拟合,亦发现更大的人口规模意味着更严重的NO₂污染^[37]。而从污染源来看,大气中的NO_x主要直接来自重油、汽油、

煤炭、天然气等燃料的燃烧,间接来源表现为工业排放和机动车尾气排放,伴随城市规模的扩张和经济收入的提高,机动车数量的激增使得NO_x排放总量居高不下,据《全国环境统计公报》^[38]显示,2011-2013年全国机动车尾气排放的NO_x量分别为637.6

2017年7月

表2 面板模型检验结果

Table 2 Estimation results of panel models

模型估计	OLS		SLM-FE		SLM-RE		SEM-FE		SEM-RE	
	系数值	t值	系数值	t值	系数值	t值	系数值	t值	系数值	t值
常数项	4.910***	5.9	—	—	6.273***	7.1	—	—	5.284***	5.9
lnPGDP	-0.695***	-4.0	-0.954***	-5.4	-0.751***	-4.4	-0.828***	-4.7	-0.815***	-4.5
ln ² PGDP	0.035***	4.3	0.048***	5.5	0.038***	4.3	0.039***	4.6	0.038***	4.3
lnUrban	0.218***	4.4	0.375***	5.5	0.252***	4.6	0.337***	5.1	0.172***	3.1
lnArea	0.052**	2.5	0.040*	1.8	0.029	1.4	-0.027	-1.3	0.065**	3.2
lnIndustry	0.118***	2.9	0.108***	3.0	0.142***	4.2	0.088***	2.6	0.267***	8.9
lnCar	0.081***	4.5	0.089***	4.9	0.099***	5.3	0.092***	5.1	0.088***	4.5
lnGreen	-0.066**	-2.5	-0.108***	-4.2	-0.090***	-3.4	-0.061***	-2.5	-0.086***	-3.4
T	0.012	-0.6	0.016	-0.9	0.015	-0.8	0.013	-0.6	0.012	-0.6
δ	—	—	0.236***	8.6	0.236***	8.7	—	—	—	—
λ	—	—	—	—	—	—	0.234***	9.5	0.222***	8.5
R ²	0.608		0.788		0.744		0.707		0.679	
Hausman	5.87		—		41.25***		—		217.81***	
log-likelihood	—		—		—		336.367		-269.810	

注: ***, **, * 分别表示在1%、5%和10%水平下显著。

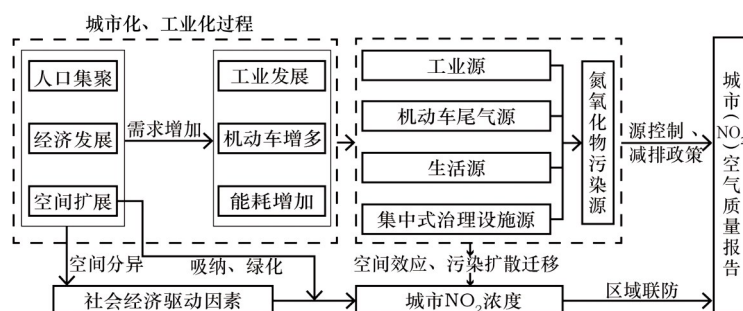
万 t、640 万 t、640.6 万 t, 分别占到 NO_x 总排放量的 26.5%、27.4%、28.8%, 有逐年上升趋势, 是影响 NO_x 总量减排的重要因素。因而, 加强对机动车尾气排放的控制成为当前城市空气污染治理的重点和共同努力途径, 改善车用油品质量、提高污染排放标准、推广新能源汽车、提升新技术则是关键所在^[39]。

考虑空间效应后, 模型检验发现 LM(lag) 比 LM(error) 在统计上更显著, 且稳健的 R-LM(lag) 比 RLM(error) 更显著, 因而选用 SLM 模型进行分析; 而 Hausman 检验结果表明 SLM 的固定效应模型更合适。从拟合优度来看, OLS 模型的 R² 为 0.608, SLM-FE 模型中的 R² 为 0.788, 表明引入空间相关性后提高了模型的整体拟合优度。从空间自回归系数 δ 来看, 在 SLM 模型中其值为 0.236 (在 1% 水平上显著), 意味着城市间 NO₂ 浓度存在显著的空间自相关性, 表明一个城市的 NO₂ 浓度除受自身影响外, 还受相邻城市的溢出扩散影响, 即一个城市 NO₂ 浓度每提升 1%, 其中约 0.236% 受其邻接周围城市的 NO₂ 扩散作用影响。从具体回归系数来看, 在 SLM-FE 模型中, 建成区面积指标对 NO₂ 浓度影响的显著性有一定减弱, 人口城市化率、第二产业比重、汽车拥有量指标与城市 NO₂ 浓度呈显著正相关关系, 三者每提高 1%, NO₂ 浓度上升 0.375% 和

0.108% 和 0.089%; 而建成区绿化覆盖率与 NO₂ 浓度呈显著负相关, 指标值每提高 1%, NO₂ 浓度下降 0.108%, 表明绿化空间增大对空气环境显著改善作用。

4.2 NO₂ 污染的社会经济驱动机理及政策启示

根据前文的 NO₂ 浓度分布的空间格局与影响因素解析, 城市 NO₂ 污染与排放格局的形成机制见图 4, 并提出相关污染防控措施和治理建议。从模型实证结果来看, 经济增长依然是影响 NO₂ 浓度和变化的主要原因, 并处于加剧 NO₂ 污染过程。因而, 转变传统高能耗的经济增长方式, 实现城市的绿色发展势在必行, 以期早日迎来 NO₂ 浓度的改善拐点。从城市化水平角度来看, 较高的人口规模集聚水平是影响城市空气质量变化的一个重要因素^[36]。因而, 未来需要科学厘清城市化水平和空气污染阈值关系, 着手建立城市人口规模与空气质量数据的动态关联监测系统, 稳妥推进人口迁移和流动, 积极培育中小城镇和特色小镇, 合理控制大城市人口规模。同时, 从整个区域的角度来看, NO₂ 分布存在显著的空间效应, 环境政策制定过程中不应只关注地方省份或单一城市的减排, 还要考虑对其周边城市的影响, 以实现区域的联防联控。如参照京津冀大气污染防治联防联控机制, 积极推进长三角区域、山东半岛大气污染防治协作, 完善区域间应急

图4 中国城市NO₂浓度分布的社会经济驱动形成机制Figure 4 Formation mechanism of distribution of NO₂ concentration in China

响应、数据共享、技术协作、联合执法的长效合作。

其次,从污染源角度来看,工业源依然是NO_x排放的主要来源,但是其所占比重减少,工业结构调整的减排效应开始显现^[3]。而同时,机动车尾气源的NO_x排放量及所占比重开始逐渐增加,是促使大城市(都市圈)NO₂高浓度污染的一个重要因素。因此,在私家车不断普及膨胀的背景下,需不断支持和鼓励发展公共交通、绿色出行;推广纯电动等新能源公交车的使用,以最大限度地减少尾气的排放量。此外,可依托科技进步,研制道路净化装置等,可降解氮氧化物浓度、臭氧等浓度,净化空气。

此外,城市的绿化建设和合理空间布局可以削弱NO₂污染作用。未来的生态文明城市和新型城镇化建设过程中须强调“绿色城市”的建设:①要科学规划土地利用和功能布局、切实保障和增加城市绿色空间;②在NO₂、颗粒物等污染严重的城市区块(如街道)有针对性种植易吸附污染物的特色植被、并丰富绿化植被类型,提升绿化环保效益;③鼓励发展立体绿化的模式(垂直绿化),有效提高城市的整体绿化水平和绿化覆盖面。

5 结论与讨论

5.1 结论

城市空气污染物浓度的定量分析和时空分布格局研究是认识区域环境污染问题的基础。通过分析中国274个地级城市2004-2013年以来的NO₂年浓度监测数据的时空特征,并在传统面板模型的基础上考虑空间效应的影响,分析了中国城市NO₂浓度分布的社会经济驱动因素,主要结论如下:

(1)2004-2013年,中国城市NO₂浓度年均值整体呈现先波动下降再增加的“U”形曲线特征,NO₂

浓度年浓度由31.13μg/m³升至2013年最高的34.01μg/m³;达标城市则由78.1%(214个)降至2013年最低值73.0%(200个),NO₂污染的控制总体不稳定。

(2)10年间,城市NO₂浓度分布格局总体发生一定变化,并在局部区域有显著改变。京津冀都市圈、山东半岛、长三角等东部经济发达城市(群)是主要NO₂高污染区,西部新疆部分城市出现污染加重局面,同时东北大部分城市呈现了污染好转的趋势。全局Moran's I值检验表明城市NO₂的浓度分布存在着显著的空间正相关关系,且空间集聚水平呈现先弱化再增强的特征。

(3)解析了城市NO₂浓度分布变化的社会经济驱动力。10年间,城市经济增长依然是影响NO₂浓度和变化的主要原因,并呈“U”型曲线规律;人口城市化水平、二产比重和机动车数量激增是恶化城市NO₂浓度的重要因素。空间自回归系数检验结果表明一个城市的NO₂浓度除受自身影响外,还受相邻城市的溢出扩散影响,未来氮氧化物减排和NO₂治理过程中,需注重城市间的联合防控。

5.2 讨论

(1)NO_x减排控制的加强。社会经济发展是驱动城市空气质量变化的关键因素,而雾霾依然是困扰中国当前城市环境质量改善和生态文明建设的一大顽疾。考虑到大气污染复合性和危害性,城市尤其是特大城市在NO₂质量改善上需持之以恒,并与细颗粒物的治理有机结合、综合防治。同时,依据贺克斌等研究,大气细颗粒物吸附的水分中NO₂与SO₂的化学反应是现阶段雾霾期间硫酸盐的主要形成途径,当前应优先加大NO_x减排力度^[40]。因而,

2017年7月

目前环境政策在保持对SO₂实施有效减排的同时,须格外重视对NO_x、氨气等污染物减排控制,在“十二五”对NO_x总量减排基础上,优先加强NO_x减排控制(“十三五”已明确到2020年NO_x排放总量控制在1574万t以内),尤其对重点行业、重点区域和重点城市的控制,以实现NO₂的持续污染减缓和质量达标改善。

(2)NO₂治理的区域协作。围绕NO₂主要污染区域,参照京津冀大气污染防治联防联控机制,积极推进东部发达地区的长三角城市群、山东半岛城市群大气污染防治协作,完善区域间应急响应、数据共享、技术协作的长效合作;发挥城市群间协作机制平台作用,推进政策协同,严格环境联合执法,大力实施重点行业的减排治理任务,不断完善区域协作机制。

参考文献(References):

- [1] Yin K, Wang R S, An Q X, *et al.* Using eco-efficiency as an indicator for sustainable urban development: a case study of Chinese provincial capital cities[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 36(2):665-671.
- [2] Fang C L, Ma H T, Wang J. A regional categorization for “new-type urbanization” in China[J]. *PLOS One*, 2015, 10 (8) : e0134253.
- [3] 刁贝娣,曾克峰,苏攀达,等. 中国工业氮氧化物排放的时空分布特征及驱动因素分析[J]. 资源科学, 2016, 38(9) : 1768-1779. [Diao B D, Zeng K F, Su P D, *et al.* Temporal-spatial distribution characteristics of provincial industrial NO_x emissions and driving factors in China from 2006 to 2013[J]. *Resources Science*, 2016, 38(9) : 1768-1779.]
- [4] Sachin D G, Vander A, Beig G. Satellite derived trends in NO₂ over the major global hotspot regions during the past decade and their inter-comparison[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157 (3):1873-1878.
- [5] 张强,耿冠楠,王斯文,等. 卫星遥感观测中国1996-2010年氮氧化物排放变化[J]. 中国科学, 2012, 57(16) : 1446-1453. [Zhang Q, Geng G N, Wang S W, *et al.* Satellite remote sensing of changes in NO_x emissions over China: 1996-2010[J]. *Science in China*, 2012, 57(16) : 1446-1453.]
- [6] Wang G H, Zhang R Y, Gomez M E, *et al.* Persistent sulfate formation from London Fog to Chinese haze[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(48) : 13630-13635.
- [7] Velders J M, Granier C, Portmann R W. Global tropospheric NO₂ column distributions' comparing three-dimensional model calculations with GOME measurements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(12) : 12643-12660.
- [8] Richter A, Burrows J P, Nüss H, *et al.* Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space[J]. *Nature*, 2005, 437(7055) : 129-132.
- [9] 张兴赢,张鹏,张艳,等. 近10a中国对流层NO₂的变化趋势、时空分布特征及其来源解析[J]. 中国科学, 2007, 37(10) : 1409-1416. [Zhang X Y, Zhang P, Zhang Y, *et al.* The tropospheric NO₂ trends, the temporal and spatial distribution characteristics and source apportionment for nearly 10 years in China[J]. *Science in China*, 2007, 37(10) : 1409-1416.]
- [10] Jvd A R, Peters D, Eskes H, *et al.* Detection of the trend and seasonal variation in tropospheric NO₂ over China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D12) : 1-10.
- [11] 李龙,施润和,陈圆圆,等. 基于OMI数据的中国对流层NO₂时空分布与人类影响分析[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(5) : 688-694. [Li L, Shi R H, Chen Y Y, *et al.* Spatio-temporal characteristics of NO₂ in China and the anthropogenic influences analysis based on OMI data[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2013, 15(5) : 688-694.]
- [12] 郑晓霞,李令军,赵文吉,等. 京津冀地区大气NO₂污染特征研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(12) : 1938-1945. [Zheng X X, Li L J, Zhao W J, *et al.* Spatial and temporal characteristics of atmospheric NO₂ in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(12) : 1938-1945.]
- [13] 程念亮,李云婷,张大伟,等. 2013-2014年北京市NO₂时空分布研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(1) : 18-26. [Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Spatial and temporal distribution of NO₂ during 2013-2014 in Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(1) : 18-26.]
- [14] 王占山,张大伟,陈添,等. 2013年北京市NO₂的时空分布[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5) : 1529-1536. [Wang Z S, Zhang D W, Chen T, *et al.* Spatiotemporal characteristics of NO₂ in Beijing in 2013[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(5) : 1529-1536.]
- [15] 王英,李令军,刘阳. 京津冀与长三角区域大气NO₂污染特征[J]. 环境科学, 2012, 33(11) : 3685-3692. [Wang Y, Li L J, Liu Y. Characteristics of atmospheric NO₂ in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the Yangtze River Delta analyzed by satellite and ground observations[J]. *Environmental Sciences*, 2012, 33 (11) : 3685-3692.]
- [16] 丁镭,刘超,黄亚林,等. 湖北省城市环境空气质量时空演化格局及影响因素[J]. 经济地理, 2016, 36(3) : 170-178. [Ding L, Liu C, Huang Y L, *et al.* Spatial and temporal characteristics of urban ambient air quality and its main influence factors in Hubei Province[J]. *Economic Geography*, 2016, 36(3) : 170-178.]

- [17] Shaw D, Pang A, Lin C C, *et al.* Economic growth and air quality in China[J]. *Environmental Economics and Policy Studies*, 2010, 12(3): 79-96.
- [18] 周春艳, 王桥, 厉青, 等. 近10年长江三角洲对流层NO₂柱浓度时空变化及影响因素[J]. 中国环境科学, 2016, 36(7): 1921-1930. [Zhou C Y, Wang Q, Li Q, *et al.* Spatio-temporal change and influencing factors of tropospheric NO₂ column density of Yangtze River Delta in the decade[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(7): 1921-1930.]
- [19] 周春艳, 厉青, 王中挺, 等. 2005年-2014年京津冀对流层NO₂柱浓度时空变化及影响因素[J]. 遥感学报, 2016, 20(3): 468-480. [Zhou C Y, Li Q, Wang Z T, *et al.* Spatio-temporal trend and changing factors of tropospheric NO₂ column density in Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2005 to 2014[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(3): 468-480.]
- [20] 李茜, 宋金平, 张建辉, 等. 中国城市化对环境空气质量影响的演化规律研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(9): 2402-2411. [Li Q, Song J P, Zhang J H, *et al.* Dynamics in the effect of China's urbanization on air quality[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(9): 2402-2411.]
- [21] 王敏, 黄滢. 中国的环境污染与经济增长[J]. 经济学(季刊), 2015, 14(2): 558-578. [Wang M, Huang Y. China's environmental pollution and economic growth[J]. *China Economic Quarterly*, 2015, 14(2): 558-578.]
- [22] Brajer V, Mead R W, Xiao F. Searching for an Environmental Kuznets Curve in China's air pollution[J]. *China Economic Review*, 2011, 22(3): 383-397.
- [23] 周侃, 樊杰. 中国环境污染源的区域差异及其社会经济影响因素-基于339个地级行政单元截面数据的实证分析[J]. 地理学报, 2016, 71(11): 1911-1925. [Zhou K, Fan J. Regional disparity of environmental pollution source and its socio-economic influencing factors: based on the cross-section data of 339 cities at prefecture level or above in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(11): 1911-1925.]
- [24] 中华人民共和国环境保护部. 中国环境年鉴[M]. 北京: 中国环境年鉴社, 2005-2014. [Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. China Environment Yearbook [M]. Beijing: China Forum of Environmental Journalists, 2005-2014.]
- [25] 中华人民共和国环境保护部. 中国环境质量报告[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008-2014. [Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. China Environmental Quality Report [M]. Beijing: China Environment Science Press, 2005-2014.]
- [26] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005-2014. [Department of Urban Surveys National Bureau of Statistics of China. China City Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2005-2014.]
- [27] Anselin L, Kelejian H H. Testing for spatial error autocorrelation in the presence of endogenous regressors[J]. *International Regional Science Review*, 1997, 20(1-2): 153-182.
- [28] 蔺雪芹, 王岱. 中国城市空气质量时空演化特征及社会经济驱动力[J]. 地理学报, 2016, 71(8): 1357-1371. [Lin X Q, Wang D. Spatio-temporal variations and socio-economic driving forces of air quality in Chinese cities[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(8): 1357-1371.]
- [29] Wang S J, Fang C L, Wang Y. Spatiotemporal variations of energy-related CO₂ emissions in China and its influencing factors: an empirical analysis based on provincial panel data[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 55: 505-515.
- [30] 丁镭, 黄亚林, 刘云浪, 等. 1995-2012年中国突发性环境污染事件时空变化特征及影响因素[J]. 地理科学进展, 2015, 34(6): 749-760. [Ding L, Huang Y L, Liu Y L, *et al.* Spatio-temporal variability of sudden environmental pollution incidents and influencing factors in China, 1995-2012[J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(6): 749-760.]
- [31] Shi Y, Xia Y F, Lu B H, *et al.* Emission inventory and trends of NO_x for China, 2000-2020[J]. *Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering)*, 2014, 15(6): 454-464.
- [32] Kang Y Q, Zhao T, Yang Y Y. Environmental Kuznets curve for CO₂ emissions in China: a spatial panel data approach[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 63: 231-239.
- [33] LeSage J P. An introduction to spatial econometrics[J]. *Revue D'économie Industrielle*, 2008, (3): 19-44.
- [34] Elhorst J P. Spatial Econometrics: From Cross-Sectional Data to Spatial Panels [M]. Heidelberg: Springer, 2014.
- [35] Wang T, Nie W, Gao J, *et al.* Air quality during the 2008 Beijing Olympics: secondary pollutants and regional impact[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(16): 7603-7615.
- [36] Wang S, Zhao M, Xing J, *et al.* Quantifying the air pollutants emission reduction during the 2008 Olympic Games in Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(7): 2490-2496.
- [37] Lamsal L N, Martin R V, Parrish D D, *et al.* Scaling relationship for NO₂ pollution and urban population size: a satellite perspective[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(14): 7855-7861.
- [38] 中华人民共和国环境保护部. 全国环境统计公报[EB/OL]. (2015-03-16) [2017-01-09]. http://www.zhb.gov.cn/gzfw_13107/hjtj/qghjtjgb/201605/t20160525_346105.shtml. [Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Environmental Statistics Bulletin in China[EB/OL]. (2015-03-16) [2017-01-09]. http://www.zhb.gov.cn/gzfw_13107/hjtj/qghjtjgb/201605/t20160525_346105.shtml.]

13107/hjtj/qghjtjgb/201605/t20160525_346105.shtml.]

- [39] Ding L, Liu C, Chen K L, *et al.* Atmospheric pollution reduction effect and regional predicament: an empirical analysis based on the Chinese provincial NO_x emissions[J]. *Journal of Environ-*

mental Management, 2017, 196: 178-187.

- [40] Cheng Y, Zheng G, Wei C, *et al.* Reactive nitrogen chemistry in aerosol water as a source of sulfate during haze events in China [J]. *Science Advances*, 2016, 2(12): e1601530.

Spatiotemporal variation in NO₂ concentrations and socioeconomic driving forces in Chinese cities

YAO Yao^{1,2}, LI Jiangfeng^{1,2}, HU Tao³, YANG Yuanyuan⁴, DING Lei⁵

(1. School of Public Administration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Key Laboratory of Legal Assessment Project, Ministry of Land and Resources, Wuhan 430074, China;

3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

4. School of Economics and Management, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

5. School of Industrial and Commercial, Ningbo Polytechnic, Ningbo 315800, China)

Abstract: With China's socioeconomic development and transition, a significant goal of improving urban air quality remains. Using monitoring data for cities at the prefecture level and above from 2004 to 2013, we analyzed temporal and spatial characteristics of NO₂ quality concentration. A dynamical mechanism of socioeconomic influencers on urban NO₂ pollution was constructed based on a Spatial Econometric Model. We found that annual average values in NO₂ concentration varied along a U curve during 10 years in urban areas. P-values changed from 78.1% (214 cities) in 2004 to the lowest at 73.0% (200 cities) in 2013. The control of NO₂ pollution was unstable. The total spatial distribution of NO₂ pollution presented certain change during study period, and there were significant changes in some local zones. The economically developed eastern cities such as Beijing-Tianjin-Hebei, Shandong Peninsula and Yangtze River Delta were the main pollutant regions for NO₂ in China, and there was a significant spatial positive correlation. The socioeconomic driving forces of NO₂ concentration distribution change were analyzed. In the past 10 years, urban economic growth was the main factor affecting NO₂ concentration and variation, and it was characterized by a U curve. The population urbanization level, proportion of secondary production and number of motor vehicles were important factors that increased urban NO₂ concentrations. The spatial autoregressive coefficient is 0.236 659, indicating that the NO₂ concentration in a city depends not only on its own concentration but also on the pollution of neighboring cities. In the future, we need to strengthen the control of NO_x emission reduction and pay attention to prevention and control between cities during the NO₂ governance process.

Key words: NO₂ concentration; spatiotemporal variations; social economy; driving forces; spatial economic model; city; China