

城市空气污染脆弱性评价模型及实证研究

万里洋, 吴和成

引用本文:

万里洋, 吴和成. 城市空气污染脆弱性评价模型及实证研究[J]. 控制与决策, 2020, 35(1): 183–194.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0491>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑风险偏好的污染治理外包合同设计

Outsourcing contract for pollution abatement service with risk preference consideration

控制与决策. 2019, 34(12): 2690–2697 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0350>

基于克莱姆法则的无偏区间灰数预测模型及其应用

Unbiased grey prediction model of interval grey numbers and its application by using Cramer rule

控制与决策. 2018, 33(12): 2258–2262 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1150>

不确定条件下速度时变VRPTW问题

Uncertain time-dependent vehicle routing problem with time window

控制与决策. 2017, 32(5): 804–810 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0453>

基于全概率更新的改进RANSAC算法

Improved RANSAC algorithm based on total probability updating

控制与决策. 2017, 32(3): 427–434 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.1510>

变体飞行器的非脆弱有限时间鲁棒控制器设计

Non-fragile finite-time robust controller design for morphing aircraft

控制与决策. 2017, 32(11): 1933–1940 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.1087>

基于灰色理论的小样本振荡序列区间预测建模方法

Modeling method of interval prediction for oscillation sequence with poor samples based on grey theory

控制与决策. 2016, 31(7): 1311–1316 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0765>

基于后悔理论的多目标灰靶决策方法

Multi-objective grey target decision model based on regret theory

控制与决策. 2015(9): 1635–1640 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1038>

基于T-S模糊模型的网络控制系统非脆弱 ∞ 跟踪控制

Non-fragile ∞ tracking control for networked control systems based on T-S fuzzy model

控制与决策. 2015(1): 110–116 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2013.1264>

城市空气污染脆弱性评价模型及实证研究

万里洋[†], 吴和成

(南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106)

摘要: 利用中国 74 个样本城市的微观监测数据, 通过构建概率模型和分解模型, 以三阶段可行广义最小二乘法估计的参数测度城市空气污染脆弱性. 研究发现: 超过 80% 的样本城市具有空气污染脆弱性, 且呈地域性特征; 脆弱性不仅在相邻两级之间转移, 还存在跨级间突变. 空气污染的差异性表现为近 20% 的样本城市中度及以上空气污染可能性较高, 46% 的城市发生空气轻度污染是大概率事件, 仅有 12% 的城市无污染脆弱性; 而由于“污染避难所”效应的存在, 空气污染“热点”城市趋向于欠发达地区. 根据实证结果, 对城市空气污染程度分类并提出了差异化的应对措施, 以期有关部门空气治理政策的制定提供科学依据, 从而达到突出重点、分类指导、多管齐下、科学施策的目的.

关键词: 城市空气污染; 脆弱性; 概率模型; 分解模型; 差异化治理

中图分类号: F062.2; X51

文献标志码: A

Evaluation model of urban air pollution vulnerability and an empirical study

WAN Li-yang[†], WU He-cheng

(School of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Based on micro-monitoring data of 74 sample cities in China, this paper studies the vulnerability of urban air pollution by constructing a probability model and a decomposition model. The parameters estimated by the three-stage feasible generalized least squares method are used to measure the vulnerability of cities at different degrees of air pollution. The study shows that more than 80% of the sample cities have air pollution vulnerability, which present regional characteristics. Moreover, the vulnerability not only transfers between two adjacent levels, but also has a cross-level shift. The difference of air pollution among cities is obvious, which is manifested as that nearly 20% of the sample cities are more likely to suffer from moderate or higher air pollution, slight air pollution is a high probability event in 46% of the sample cities, and only 12% of the sample cities have no pollution vulnerability during the evaluation period. Meanwhile, due to the existence of “pollution shelter” effect, the cities with serious air pollution tend to migrate to undeveloped areas. According to the empirical results, the air pollution degree in the sample cities is classified, and the differentiated countermeasures are proposed in the hope of providing a basis for the government and relevant departments to formulate scientific governance policy of urban air pollution, thus achieving the purpose of highlighting key cities, classification guidance, multi-pronged approach, implementing scientific policy.

Keywords: urban air pollution; vulnerability; probability model; decomposition model; differentiated countermeasures

0 引言

2016 年世界卫生组织最新的“全球城市污染数据库”显示, 在全球 103 个国家和地区 3 000 多个空气质量监测城市中, 80% 以上的城市 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度超过世界卫生组织标准^[1]. 同年, 第 2 届联合国环境大会发布的一份报告表明, 每年因环境恶化而过早死亡的人数比冲突致死的人数要多 234 倍, 其中空气污染导致全球每年约 700 万人死亡^[2]. 作为全球普

遍的“城市病”, 空气污染不仅威胁城市居民和动植物的健康^[3-7], 也影响城市居民日常生活^[8-9] 和经济生产活动^[10-11], 从而不利于地区社会、经济的可持续发展. 如今, 城市空气污染不仅是环境问题^[12-15], 还是经济问题^[16-19], 更是民生问题^[20-22], 因而成为全球关注的焦点.

中国是全球最大发展中国家, 近年经济和社会的发展卓有成效, 城市化进程稳步推进, 工业化程度不

收稿日期: 2018-04-19; 修回日期: 2018-05-22.

基金项目: 国家社会科学基金项目(16BGL033); 江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX19_0145).

责任编辑: 李登峰.

[†]通讯作者. E-mail: 396721653@qq.com.

断提高,人民生活水平得到全面改善和提升.然而,历史累积遗留的空气污染问题日益凸显,成为制约中国可持续发展的关键因素^[23-24]. Asian development bank 曾在一份中文版报告中指出,全球空气污染最严重的10个城市有7个位于中国;而中国500个大型城市中达到世卫组织空气质量标准的不足1%,城市空气质量状况前景堪忧^[25].为摆脱空气污染困境,中国政府一直积极运用财政和行政手段治理大气污染,《环境保护税法》已在2018年正式施行;国内学者也分别从空间分布^[26-27]、减排措施^[28-29]、影响因素^[30-31]、发展模式^[32-33]以及监测技术^[34-35]等方面对城市空气污染问题展开研究,并提出相应的改善和解决措施.然而,由于巨大的环境压力,中国城市空气污染整体形势不容乐观,在城市空气质量整体改善方面尚有许多艰巨的任务.

空气质量不仅反映一个城市居民生活的健康环境,也能体现一个地区社会、经济可持续发展的能力.居民关注城市空气是否遭受污染以及污染程度,而环保部门不仅关注城市空气污染现状,更想了解未来城市空气质量状况,以便有针对性地进行防治.因此,研究城市空气污染不仅要分析城市空气污染现状,还要提供未来城市空气污染信息,从而提出有针对性的防治和应对举措.回顾已有研究,发现大多以特定时间节点静态分析城市空气污染问题是一种事后研究,不能反映未来空气污染状态,也不能反映污染程度的演化情况,缺乏更全面的城市空气污染信息,导致空气污染治理措施的制定存在局限性.因此,借鉴 Azeem 等^[36]的思想,本文将脆弱性概念引入城市空气污染研究中,并将城市空气污染脆弱性定义为未来城市空气质量指数高于污染基准线的概率.由此可见,脆弱性不仅能够度量城市未来遭受空气污染的可能性,还能反映未来空气质量恶化信息,为空气污染防治和预警提供帮助.

本文从脆弱性视角探究城市空气污染问题,为城市空气污染研究提供一种新的思路和方法,以期弥补现有文献事后研究的不足.利用中国74个样本城市的微观监测数据进行实证研究.首先,构建概率模型,并采用三阶段的可行广义最小二乘法(3FGLS)对模型参数进行估计;其次,在污染基准线下度量城市空气污染脆弱性,并分析其演变趋势及转移情况;最后,构建脆弱性分解模型对空气污染脆弱性进一步分解,根据脆弱性程度确定城市的空气污染类型,并以此为依据提出应对不同污染类型城市的措施,以期为中国城市空气污染的差异化治理提供借鉴.

1 变量描述、数据来源与阈值设定

1.1 研究范围

74个样本城市包含京津冀、长三角、珠三角区域城市、直辖市、省会城市以及计划单列市.其中,京津冀、长三角和珠三角区域是我国城市发展到成熟阶段的最高空间组织形式,引领了东部乃至全国的经济发展,带动了全国的人财物向其流动;直辖市、省会城市是地区政治、经济、科教、文化和交通中心;计划单列城市则是其他地区的重要城市.上述城市遍布中国各地,在一定程度上反映出中国现阶段社会、经济的发展水平.因此,将这74个样本城市作为研究范围,从脆弱性的视角探究中国城市空气污染情况.

1.2 变量描述

空气质量指数(AQI)是定量描述城市空气质量状况的无量纲化指数,其数值越大,说明空气污染程度越严重,对城市居民健康的危害越大.所以,在城市空气污染脆弱性研究中,将AQI作为被解释变量.空气质量受空气污染物影响,主要有一氧化碳(CO)、二氧化氮(NO₂)、臭氧(O₃)、二氧化硫(SO₂)和颗粒物(PM)等.一氧化碳是一种无色、无味、无臭的易燃有毒气体,是含碳燃料不完全燃烧的产物.二氧化氮是一氧化氮被氧化的产物,吸入人体可损害呼吸道,是空气污染的主要因素之一.臭氧在平流层有防辐射作用,但在城市低空中却对人体有害.二氧化硫易溶于水且具有腐蚀作用,能够导致人体中毒.颗粒物可以附着有毒金属、致癌物质和致病菌等,因此其危害更大.空气中的颗粒物主要有PM 2.5和PM 10,能随人体呼吸深入肺部产生毒害.综上,本文将CO、O₃、NO₂、SO₂、PM 2.5以及PM 10六种有害物质视为影响空气质量的主要因素,在脆弱性分析模型中把它们在空气中的浓度作为解释变量.

1.3 数据来源

本文研究所用数据来源于中华人民共和国环境保护部城市空气质量状况月度报告、AQI日监测数据以及各省份环保局官网信息公开数据,且各变量数据均以月平均数据形式收集整理.采取月平均数据,一方面,由于空气成分浓度监测数据工作的复杂性、多样性以及监测技术等原因,各地区环保部门不能对每天数据进行有效监测并呈现,会导致部分数据缺失;另一方面,由于时间跨度大,采用年度平均数据会丧失许多有价值的信息,不利于本研究目标的实现.由于2016年12月份数据缺失,目前可用的月度数据为2014年12月到2017年5月等29个月的数据;本文收集整理74个城市29个月的CO、O₃、NO₂、SO₂、PM

2.5以及PM10月平均浓度数据。AQI只报告日数据,为与其余6个变量时间上保持一致,本文收集74个城市29个月每天的AQI值,并计算出月平均值。最终,本文所用数据为74个城市29个月7个指标共15022次微观监测数据。

1.4 脆弱性阈值

以往脆弱性研究中,脆弱性阈值主要由研究者根据自身知识储备主观确定,通常以0.5作为阈值,并将脆弱性划分为低、高度脆弱性^[37-38]。根据空气污染的特点,为区分空气污染脆弱性程度,在相关研究的基础上,本文将脆弱性等级进一步细分如表1所示。

表1 脆弱性阈值及等级划分

脆弱性等级	无	低度	中度	高度	极度	完全
阈值区间	0	(0,0.25)	[0.25,0.5)	[0.5,0.75)	[0.75,1)	1

这里将脆弱性划分为6个等级,一方面是要与AQI技术规定中空气污染等级标准(4个污染等级)保持对应性;另一方面,脆弱性值为0和1分别代表城市完全摆脱空气污染的可能性和遭受空气污染的必然性(或城市空气质量进一步恶化,污染程度加重),具有特殊的现实意义,需要单独列出。脆弱性等级的进一步划分可以更为详细区分城市空气污染脆弱性程度,从而为空气污染城市分类提供依据。因此,本文将脆弱性阈值定义为0、0.25、0.5、0.75、1,从而将脆弱性划分为无脆弱性、低度脆弱性、中度脆弱性、高度脆弱性、极度脆弱性以及完全脆弱性。

2 模型构建

2.1 脆弱性概率模型及参数估计

根据本文脆弱性的定义,构建概率模型来测度城市空气污染脆弱性。其基本形式为

$$V_{i,t} = P(Y_{i,t+1} > F). \quad (1)$$

其中: $Y_{i,t+1}$ 表示第*i*个城市*t*+1时期空气质量水平,用空气质量指数度量; F 表示污染基准线。

可见, $V_{i,t}$ 表示第*i*个城市*t*+1时期的空气质量水平超过污染基准线的概率。

未来城市空气质量水平主要由当期可观测到的有害物浓度 X_i 及不可观测的冲击因素 ε_i 所决定,即未来城市空气质量水平可表示为

$$Y_{i,t+1} = f(X_i, \beta_t, \varepsilon_i), \quad (2)$$

其中 β_t 为*t*时期有害物浓度状况的参数向量。将式(2)代入(1)中,有

$$V_{i,t} = P(Y_{i,t+1} = f(X_i, \beta_t, \varepsilon_i) > F). \quad (3)$$

为测度各有害物浓度对空气质量指数的影响,构

建如下对数线性回归模型:

$$\ln Y_{i,t} = \beta_{1t} \ln X_{1it} + \beta_{2t} \ln X_{2it} + \cdots + \beta_{kt} \ln X_{kit} + \varepsilon_{it}. \quad (4)$$

其中: $\ln Y_{i,t}$ 为所观察的第*i*个城市空气质量指数的对数, X_{kit} 为第*i*个城市*t*时期影响空气质量的第*k*个空气污染物的浓度, β_{kt} 为*t*时期空气质量指数对第*k*个空气污染物浓度的偏弹性系数, ε_{it} 为误差项。

这里选择解释变量的对数形式,一方面可以减少异方差;另一方面,对数解释变量前的系数具有经济学上的弹性含义,便于解释。

由于截面数据往往会导致异方差性,采用OLS估计模型(4)中的参数将降低估计的有效性。在方差函数正确设定的情况下,WLS是处理异方差最常用的方法。误差项的条件方差一般形式为

$$\text{var}(\varepsilon_i | X_i) = \sigma^2 h(X_i) = \sigma^2 h_i. \quad (5)$$

其中: $h(X_i)$ 是取值为正的解解释变量函数; σ^2 为误差项的方差未知但可以通过样本估计,即

$$E\left[\left(\frac{\varepsilon_{it}}{\sqrt{h_{it}}}\right)^2\right] = \frac{E[\varepsilon_{it}^2]}{h_{it}} = \frac{\sigma_{it}^2 h_{it}}{h_{it}} = \sigma_{it}^2. \quad (6)$$

由于本研究异方差的确切形式 $h(X)$ 未知,本文在WLS的基础上,采用三阶段的可行广义最小二乘法(3FGLS)进行估计。具体步骤如下。

Step 1: 假设

$$\text{var}(\varepsilon_{it} | \ln X_{it}) = \sigma_{it}^2 \exp(\varphi_{1t} \ln X_{1it} + \varphi_{2t} \ln X_{2it} + \cdots + \varphi_{kt} \ln X_{kit}) v_{it}, \quad (7)$$

即

$$h(X_{it}) = \exp(\varphi_{1t} \ln X_{1it} + \varphi_{2t} \ln X_{2it} + \cdots + \varphi_{kt} \ln X_{kit}) v_{it},$$

采用指数形式是为了保证方差估计值均为正^[39]。在假设(7)下,有 $E[v_{it} | \ln X_{1it}, \ln X_{2it}, \cdots, \ln X_{kit}]$,从而

$$\ln \varepsilon_{it}^2 = \alpha_{0it} + \varphi_{1t} \ln X_{1it} + \varphi_{2t} \ln X_{2it} + \cdots + \varphi_{kt} \ln X_{kit} + \ln v_{it}, \quad (8)$$

并用方程(4)中参数的OLS估计得到的残差 $\hat{\varepsilon}_{it}$ 代替 ε_{it} 。

Step 2: 由

$$\ln \hat{\varepsilon}_{it}^2 = \varphi_{1t} \ln X_{1it} + \varphi_{2t} \ln X_{2it} + \cdots + \varphi_{kt} \ln X_{kit} + \delta_{it} \quad (9)$$

得到拟合值 \hat{g}_{it} ,从而得到 $h_{it} = h(X_{it})$ 的估计值 $\hat{h}_{it} = \exp(\hat{g}_{it})$ 。

Step 3: 以 $1/\sqrt{\hat{h}_{it}}$ 为权重,采用WLS估计模型(4)即可得到消除异方差后的估计值 $\ln \hat{Y}_{it}$ 。这里需要注

意的是,在模型(9)的估计结果中如果存在 φ_{kt} 在统计上不显著,则说明模型(4)中异方差性不明显,则可接受同方差假设。

由模型(4)和(9)的参数估计值可以得到第*i*个城市空气质量指数对数的期望值及其方差的估计值,分别为

$$\hat{E}[\ln Y_{i,t} | X_{1it}, X_{2it}, \dots, X_{kit}] = \hat{\beta}_{1t} \ln X_{1it} + \hat{\beta}_{2t} \ln X_{2it} + \dots + \hat{\beta}_{kt} \ln X_{kit}, \quad (10)$$

$$\hat{\text{Var}} = [\ln Y_{i,t} | X_{1it}, X_{2it}, \dots, X_{kit}] = \hat{\sigma}_{\varepsilon, it}^2 = \exp(\hat{\varphi}_{1t} \ln X_{1it} + \hat{\varphi}_{2t} \ln X_{2it} + \dots + \hat{\varphi}_{kt} \ln X_{kit}). \quad (11)$$

由于空气质量指数服从对数正态分布(本文以AQI服从对数正态分布为假设条件,并在下文通过两种检验方法得到验证),由式(3)可得

$$\begin{aligned} V_{i,t} &= P(\ln Y_{i,t+1} > \ln F) = \\ &1 - \Phi \left[\frac{\ln F - \hat{\mu}_{\ln Y_{i,t+1}}}{\hat{\sigma}_{\ln Y_{i,t+1}}} \right] = \\ &1 - \Phi \left[\frac{\ln F - \sum_{k=1}^k \hat{\beta}_{kt} \ln X_{kit}}{\sqrt{\exp \left(\sum_{k=1}^k \hat{\varphi}_{kt} \ln X_{kit} \right)}} \right]. \quad (12) \end{aligned}$$

其中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态随机变量的分布函数, $\hat{\mu}_{\ln Y_{i,t+1}}$ 为未来城市空气质量指数对数的期望, $\ln Y_{i,t+1}$ 为未来城市空气质量指数对数的标准差。

2.2 脆弱性分解模型

根据中国空气质量指数等级标准,空气污染程度可以根据空气质量指数划分为4个等级:101~150(轻度污染)、151~200(中度污染)、201~300(重度污染)、大于300(严重污染)。在脆弱性概率模型的基础上,脆弱性分解模型构建如下:

$$\begin{aligned} V_{i,t,r} &= P(\ln F_{rl} < \ln(Y_{i,t+l}) < \ln F_{rh}) = \\ &\Phi \left[\frac{\ln F_{rh} - \hat{\mu}_{\ln Y_{i,t+l}}}{\hat{\sigma}_{\ln Y_{i,t+l}}} \right] - \Phi \left[\frac{\ln F_{rl} - \hat{\mu}_{\ln Y_{i,t+l}}}{\hat{\sigma}_{\ln Y_{i,t+l}}} \right] = \\ &\Phi \left[\frac{\ln F_{rh} - (\hat{\beta}_{1t} \ln X_{1it} + \dots + \hat{\beta}_{kt} \ln X_{kit})}{\sqrt{\exp(\hat{\varphi}_{1t} \ln X_{1it} + \dots + \hat{\varphi}_{kt} \ln X_{kit})}} \right] - \\ &\Phi \left[\frac{\ln F_{rl} - (\hat{\beta}_{1t} \ln X_{1it} + \dots + \hat{\beta}_{kt} \ln X_{kit})}{\sqrt{\exp(\hat{\varphi}_{1t} \ln X_{1it} + \dots + \hat{\varphi}_{kt} \ln X_{kit})}} \right]. \quad (13) \end{aligned}$$

其中: $V_{i,t,r}$ 为第*i*个城市*t*时期处于第*r*污染等级空气污染的脆弱性, $\ln F_{rl}$ 为第*r*污染等级基准线下限, $\ln F_{rh}$ 为其上限。

3 时间范围与相关检验

3.1 时间范围

因数据量庞大,脆弱性度量会异常繁琐,而且

AQI观测值并不都满足对数正态分布假设,无法进行实证研究。为避免不必要的计算,需要对研究时间范围进行选择。将74个城市作为整体,并计算2014~2017年间连续30个月的总体月平均AQI,形成其趋势如图1所示。

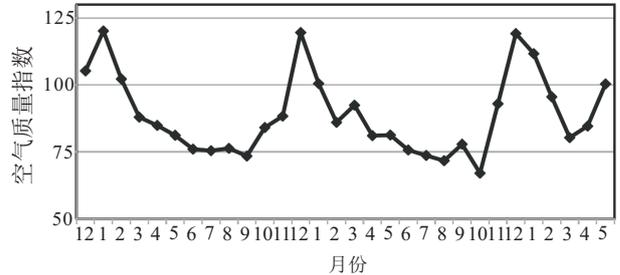


图1 中国城市30个月整体AQI趋势

由图1可看出,在30个月里,74个城市整体AQI波动明显,并伴有显著周期性特征。每年12月份至次年第1季度AQI达到峰值,随后下滑,并在每年第3季度与第4季度初期达到最低值。从AQI数值来看,2014年12月,2015年1月、2月、12月,2016年1月、12月以及2017年1月、5月均超过100;对照国家空气质量等级划分标准,以上月份属空气污染范畴。这也再次印证了城市空气污染冬季最为严重^[40-42]。鉴于数据的可获取性,本文最终选择2014年12月,2015年1月、2月、12月,2016年1月以及2017年1月作为研究时间范围。选择以上6个月,一方面可以避免季节因素对本研究的影响,另一方面可以满足AQI服从对数正态分布的假设。事实上,针对空气污染最严重月份,从脆弱性视角进行分析,期望获得深入研究结果。

3.2 正态检验与异方差检验

为检验模型的设定性,需要对模型(4)误差项的正态性和同方差进行检验。本文采用Jarque Bera和非参数Kolmogorov Smirnov法对AQI对数进行正态性检验,见表2。其中a为检验统计量值,b为当原假设为真时极端结果出现的概率。采用两种方法是为了避免单方法的片面性,使结果更有说服力。在显著水平5%下,Jarque Bera检验和非参数Kolmogorov Smirnov检验的*P*值均大于0.05,说明不能拒绝原假设,即接受正态分布的假设。

利用Breusch-Pagan-Godfrey检验和white检验来考察异方差问题(表3)。结果显示,除了2014年12月份外,其他5个月份两种检验的*P*值均小于0.05,也就是说,在显著性5%的情况下,2014年12月截面数据的估计结果满足同方差假设,而其余5个月则具有异方差性,需要采用3FGLS进行异方差修正估计。

表2 AQI对数正态分布检验

方法	时间范围											
	2014-12		2015-01		2015-02		2015-12		2016-01		2017-01	
	St. ^a	Prob. ^b	St.	Prob.								
J-B Text	0.225	0.894	0.416	0.812	0.057	0.972	2.696	0.260	0.927	0.629	4.367	0.113
K-S Text	0.690	0.728	0.790	0.561	0.524	0.946	1.102	0.176	1.089	0.186	1.073	0.200

表3 异方差检验

方法	时间范围											
	2014-12		2015-01		2015-02		2015-12		2016-01		2017-01	
	St. ^a	Prob. ^b	St.	Prob.								
B-P Text	11.62	0.071	17.91	0.007	15.97	0.014	17.40	0.008	20.73	0.002	9.36	0.154
WhiteText	9.92	0.128	14.24	0.027	13.45	0.036	14.87	0.021	15.86	0.015	6.76	0.344

4 实证结果与分析

4.1 脆弱性度量

在污染基准线100(轻度污染)的标准下度量城市空气污染脆弱性。根据结果,一方面可以根据脆弱性程度对城市分类,从而更清晰地判断城市遭受空气污染的可能性;另一方面,可以从总体上了解中国城市空气污染脆弱性的变化趋势,深入分析城市空气污染脆弱性的转移情况。

根据脆弱性将城市划分为以下5种类型。保定等22个城市为A类城市,空气污染处于完全脆弱性和极度脆弱性。从脆弱性定义来看,这些城市发生空气污染是必然事件。合肥等9个城市为B类城市,空气污染脆弱性呈现上升趋势,且最终达到极度脆弱性甚至完全脆弱性,表明这些城市遭受空气污染的可能性不断增大。北京等15个城市为C类城市,空气污染脆弱性波动明显,介于完全脆弱性与无脆弱性之间。反映出这类城市的空气质量极不稳定,随时都有可能发生空气污染。常州等13个城市为D类城市,空气污染由极度和高度脆弱性逐渐向低度脆弱性和无脆弱性演变。表明这类城市空气质量有好转趋势,即逐步摆脱空气污染的可能性。东莞等15个城市,空气污染为低度脆弱性和无脆弱性。这类城市空气质量处于良好状态,基本没有污染的可能性。

对脆弱性结果进一步整理可得城市空气污染脆弱性水平演变情况。如表4显示,空气污染脆弱性两极分化严重,完全脆弱性和无脆弱性的城市占比较多,其中2015年1月和2015年12月空气污染为完全脆弱性的城市超过样本城市数的50%。由演化趋势(图2)来看,完全脆弱性和极度、高度和低脆弱性变动具有周期性,并且趋势相反。无脆弱性城市占比呈现上升趋势,中度脆弱性城市占比则表现下滑态势。这

一结果可以理解为空气污染完全脆弱性城市与极度和高度脆弱性城市之间相互转移,空气污染无脆弱性城市与中度脆弱性城市之间存在转化关系。另外,低度脆弱性城市可能由于空气质量改善而转化为无脆弱性城市;相反,也可能由于空气质量恶化,渐变成为完全脆弱性。分析演化趋势,发现城市空气污染脆弱性不仅存在相邻两级之间的转移,还存在跨级之间的突变。

表4 城市空气污染脆弱性水平 %

脆弱性等级	时间范围					
	2014-12	2015-01	2015-02	2015-12	2016-01	2017-01
完全	25.7	55	22	55	22	28.4
极度	27	11	19	9.5	27	15
高度	6.8	1	4	3	7	5
中度	5.4	7	7	0	1	1.3
低度	13.5	8	20	1.4	9	20.3
无	21.6	18	28	31.1	34	30

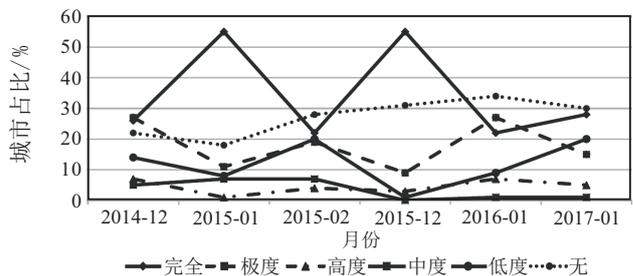


图2 城市空气污染脆弱性演变趋势

通过对城市空气污染脆弱性(轻度污染基准线)的度量推断,目前中国有超过80%的城市具有空气污染脆弱性,20%以上的城市空气污染是必然事件,且这一比例甚至会超过50%。随着脆弱性种类的划分,南北方城市空气污染脆弱性的差异也逐渐显现,即北方城市空气污染可能性普遍大于南方城市。究其原因,一方面是政策原因。北方城市冬季供暖仍采

用传统燃料,不可避免地产生大量空气污染物;相反,南方城市则更多地使用清洁能源.另一方面是季节原因.北方城市冬季气候干燥,地表覆盖率低,水土固着力差,沙尘、扬尘多于南方城市;而且北方入冬早,逆温天气较多,降水也少于南方,从而空气污染物在北方城市滞留时间更长,更容易积累.另外,演变趋势呈现出的城市空气污染脆弱性,变动幅度都较为明显,且存在跨等级转移现象,反映现阶段中国城市空气污染存在以下问题:1)对空气污染源没有进行持续有效的监督和控制,空气污染物阶段性的大量排放导致污染脆弱性的突变;而且,地理环境、人口、经济以及社会等不确定因素所产生的不可控空气污染物,也是脆弱性跨级突变的重要原因.2)空气污染的防治措施没有达到预期效果.从无脆弱性演变趋势可以充分证明,在城市遭受空气污染时,治理效果具有即时性和临时性,空气污染仍会再次发生.换言之,如果没有高效的空气污染治理技术,空气污染防治措施只具短期效应,无法从根本上解决污染源问题.因而,探寻长效治理措施是必要的.

4.2 脆弱性分解

以轻度污染基准线为标准度量城市空气污染脆弱性,只能获得城市遭受空气污染的可能性,未能根据脆弱性来精确判断城市空气污染的等级.另外,在研究过程中发现完全脆弱性具有两层含义:1)表示该城市发生空气污染是必然事件;2)说明该城市空气质量可能进一步恶化,具有一定概率发生更严重的

空气污染.因此,为深入探究不同空气污染等级下的脆弱性程度,需将城市空气污染脆弱性进一步分解,进而根据城市不同空气污染等级中的脆弱性程度对城市进行分类,从而更明确地掌握未来城市最可能遭受何种程度的空气污染,并采取相应措施.城市空气污染类型划分详见表5~表9.

表5是重度-严重污染型城市及其脆弱性分解结果.可以看出,在研究的6个月期间,这类城市多次发生空气重度污染,且重度污染脆弱性程度大多在中度以上,说明该类城市发生空气重度污染是大概率事件或必然事件.如不及时采取措施,此类城市的空气质量将很有可能进一步恶化,像保定、石家庄两个城市已经出现严重空气污染的脆弱性.因此,将这8个重度-严重污染型城市作为空气污染最严重的城市在这里呈现,以期政府或有关部门将它们作为重点治理对象,及时采取措施,以遏制空气质量进一步恶化.

表6中呈现的是中度-重度污染型城市及其脆弱性分解结果.这类城市空气污染脆弱性主要集中在轻度和中度污染,但中度污染的脆弱性程度已达到高度和极度,说明这些城市发生空气中度污染的可能性极大.另外,从污染程度来看,济南和唐山逐渐显现重度空气污染,虽然其脆弱性程度不高,但也具备了重度污染的可能性.相比空气轻度污染,公众更担忧城市空气质量进一步恶化.因此,将这7个空气污染较为严重的城市划分为中度-重度污染型城市,希望引起相关部门的重点关注.

表5 重度-严重污染型城市及其脆弱性分解

城市	2014-12		2015-01		2015-02		2015-12		2016-01		2017-01	
	污染程度	脆弱性										
保定	重度	1.000	重度	1.000	中度	0.177	重度	0.998	中度	0.843	中度	0.017
					重度	0.823	严重	0.002	重度	0.157	重度	0.983
石家庄	轻度	0.007	中度	0.611	中度	0.434	中度	0.247	轻度	0.996	重度	0.999
	中度	0.993	重度	0.389	重度	0.566	重度	0.753	中度	0.003	严重	0.001
衡水	轻度	0.029	中度	0.588	轻度	0.036	重度	1.000	轻度	0.009	中度	0.315
	中度	0.971	重度	0.412	中度	0.964			中度	0.991	重度	0.685
邯郸	轻度	0.013	中度	0.407	轻度	0.322	中度	0.003	轻度	0.346	中度	0.023
	中度	0.987	重度	0.593	中度	0.678	重度	0.997	中度	0.654	重度	0.977
邢台	轻度	0.074	中度	0.031	中度	0.827	重度	1.000	轻度	0.064	中度	0.004
	中度	0.926	重度	0.969	重度	0.173			中度	0.936	重度	0.996
乌鲁木齐	轻度	0.065	轻度	0.979	轻度	0.303	中度	0.994	中度	0.503	中度	0.007
	中度	0.935	中度	0.021	中度	0.697	重度	0.006	重度	0.497	重度	0.993
西安	轻度	0.515	轻度	0.999	轻度	0.473	轻度	0.069	轻度	0.291	中度	0.009
			中度	0.001			中度	0.931	中度	0.709	重度	0.991
郑州	轻度	0.875	中度	0.180	中度	0.989	中度	0.811	中度	0.650	中度	0.642
	中度	0.125	重度	0.820	重度	0.003	重度	0.189	重度	0.350	重度	0.358

表6 中度-重度污染型城市及其脆弱性分解

城市	2014-12		2015-01		2015-02		2015-12		2016-01		2017-01	
	污染程度	脆弱性										
哈尔滨	轻度	0.979	轻度	0.224	轻度	0.249	轻度	0.002	轻度	0.999	轻度	0.454
	中度	0.021	中度	0.776	中度	0.751	中度	0.998			中度	0.546
济南	轻度	0.999	轻度	0.144	轻度	0.841	中度	0.610	轻度	0.031	中度	0.983
	中度	0.001	中度	0.856	中度	0.159	重度	0.390	中度	0.969	重度	0.010
唐山	轻度	0.695	轻度	0.656	轻度	0.908	中度	0.996	轻度	0.996	轻度	0.363
	中度	0.305	中度	0.344	中度	0.092	重度	0.004			中度	0.637
太原	轻度	1.000	轻度	1.000	轻度	0.305	轻度	0.998	轻度	0.007	中度	0.983
							中度	0.002			重度	0.007
成都	轻度	1.000	轻度	0.004	轻度	1.000	轻度	1.000	轻度	1.000	中度	0.968
			中度	0.996							重度	0.030
廊坊	轻度	0.996	轻度	0.998	轻度	0.998	中度	0.741	轻度	1.000	轻度	0.097
	中度	0.004	中度	0.002	中度	0.002	重度	0.259			中度	0.902
沧州	轻度	0.924	轻度	1.000	轻度	0.999	轻度	0.011	轻度	0.998	轻度	0.358
	中度	0.076					中度	0.989			中度	0.642

表7 轻度-中度污染型城市及其脆弱性分解

城市	2014-12		2015-01		2015-02		2015-12		2016-01		2017-01	
	污染程度	脆弱性										
北京	无	0.000	轻度	1.000	轻度	0.999	中度	0.993	轻度	0.061	轻度	0.892
							重	0.007			中度	0.108
常州	轻度	0.885	轻度	0.763	轻度	0.970	轻度	0.953	轻度	0.996	轻度	0.094
			中度	0.237			中度	0.047				
合肥	轻度	0.003	轻度	1.000	轻度	0.513	轻度	0.973	轻度	0.966	轻度	0.923
							中度	0.027				
杭州	轻度	0.890	轻度	1.000	轻度	0.102	轻度	1.000	轻度	1.000	轻度	0.041
呼和浩特	轻度	0.845	轻度	0.006	轻度	0.003	轻度	0.961	轻度	0.01	轻度	0.841
							中度	0.039				
湖州	轻度	0.830	轻度	0.999	轻度	0.058	轻度	0.997	轻度	0.714	轻度	0.001
			中度	0.001								
淮安	轻度	1.000	轻度	1.000	轻度	0.996	轻度	0.993	轻度	0.996	轻度	0.722
							中度	0.007				
嘉兴	轻度	0.911	轻度	1.000	轻度	0.049	轻度	1.000	轻度	0.812	无	0.000
金华	轻度	0.758	轻度	0.999	无	0.000	轻度	0.963	轻度	0.081	轻度	0.003
			中度	0.001								
兰州	轻度	0.999	轻度	0.254	轻度	0.009	轻度	1.000	轻度	0.743	轻度	0.942
											中度	0.058
连云港	轻度	1.000	轻度	1.000	轻度	0.936	轻度	0.990	轻度	1.000	轻度	0.145
							中度	0.010				
南京	轻度	0.273	轻度	0.990	轻度	0.850	轻度	0.984	轻度	0.999	轻度	0.052
			中度	0.001			中度	0.016				
南通	轻度	0.976	轻度	0.998	轻度	0.641	轻度	1.000	轻度	0.822	无	0.000
			中度	0.002								
秦皇岛	轻度	0.120	轻度	0.936	轻度	0.957	轻度	0.704	无	0.000	轻度	0.802
青岛	轻度	0.866	轻度	0.984	轻度	0.881	轻度	0.929	轻度	0.995	轻度	0.711
							中度	0.071				
上海	轻度	0.657	轻度	0.981	轻度	0.021	轻度	0.997	轻度	0.604	无	0.000
绍兴	轻度	0.979	轻度	1.000	轻度	0.001	轻度	1.000	轻度	0.900	轻度	0.015

表7 (续)

沈阳	轻度	1.000	轻度 中度	0.414 0.586	轻度 中度	0.541 0.459	轻度 中度	0.990 0.010	轻度	0.919	轻度	0.999
苏州	轻度	0.943	轻度	1.000	轻度	0.435	轻度	1.000	轻度	0.901	无	0.000
泰州	轻度	0.989	轻度	0.999	轻度	0.559	轻度	1.000	轻度	0.999	轻度	0.561
天津	轻度 中度	0.902 0.098	轻度 中度	0.991 0.009	轻度	0.995	轻度 中度	0.007 0.773	轻度	0.860	轻度 中度	0.965 0.035
无锡	轻度	0.995	轻度 中度	0.984 0.016	轻度	0.766	轻度 中度	0.981 0.019	轻度	0.998	轻度	0.020
武汉	轻度	0.999	轻度 中度	0.015 0.985	轻度 中度	0.963 0.037	轻度 中度	0.908 0.092	轻度 中度	0.966 0.034	轻度	0.966
西宁	轻度	0.050	轻度	0.034	轻度	0.116	轻度	0.993	轻度	0.06	轻度	0.990
宿迁	轻度	0.323	轻度	1.000	轻度	0.959	轻度 中度	0.919 0.081	轻度 中度	0.998 0.002	轻度	0.961
徐州	轻度	1.000	轻度 中度	0.888 0.122	轻度 中度	0.992 0.008	轻度 中度	0.984 0.016	轻度 中度	0.970 0.030	轻度 中度	0.632 0.368
盐城	轻度	0.929	轻度	0.999	轻度	0.816	轻度	1.000	轻度	0.954	轻度	0.037
扬州	轻度	0.394	轻度	1.000	轻度	0.440	轻度	1.000	轻度	0.858	轻度	0.861
银川	轻度	0.779	轻度	1.000	轻度	0.020	轻度	0.998	轻度	0.725	轻度 中度	0.924 0.076
长春	轻度	0.948	轻度 中度	0.945 0.055	轻度	1.000	轻度 中度	0.997 0.003	轻度	0.644	轻度	0.992
长沙	轻度	0.673	轻度 中度	0.571 0.429	轻度	0.992	轻度	0.534	轻度	0.837	轻度 中度	0.999 0.001
镇江	轻度	0.673	轻度	1.000	轻度	0.101	轻度 中度	0.998 0.002	轻度	0.997	轻度	0.529
重庆	轻度	0.988	轻度 中度	0.153 0.847	轻度	0.974	无	0.000	轻度	0.063	轻度	0.986
宁波	轻度	0.902	轻度	0.999	轻度	0.006	轻度	1.000	轻度	0.497	无	0.000

表8 无-轻度污染型城市及其脆弱性分解

城市	2014-12		2015-01		2015-02		2015-12		2016-01		2017-01	
	污染程度	脆弱性										
承德	无	0.000	无	0.000	轻度	0.032	轻度	0.895	无	0.000	轻度	0.070
大连	无	0.000	无	0.000	轻度	0.035	轻度	0.989	无	0.000	无	0.000
东莞	无	0.000	轻度	0.035	无	0.000	无	0.000	无	0.000	无	0.000
佛山	轻度	0.001	轻度	0.001	无	0.000	无	0.000	无	0.000	轻度	0.420
广州	无	0.000	轻度	0.002	无	0.000	无	0.000	无	0.000	轻度	0.002
贵阳	轻度	0.327	轻度	0.310	无	0.000	无	0.000	无	0.000	无	0.000
江门	轻度	0.569	轻度	0.335	轻度	0.006	无	0.000	无	0.000	轻度	0.046
丽水	轻度	0.061	轻度	0.567	无	0.000	无	0.000	无	0.000	无	0.000
南昌	无	0.000	轻度	0.258	无	0.000	轻度	0.241	轻度	0.006	轻度	0.816
南宁	轻度	0.908	轻度	0.896	轻度	0.376	无	0.000	无	0.000	轻度	0.008
衢州	轻度	0.016	轻度	0.390	无	0.000	无	0.000	无	0.00	0 无	0.000
台州	轻度	0.006	轻度	0.783	无	0.000	无	0.000	无	0.000	无	0.000
温州	轻度	0.070	轻度	0.977	无	0.000	无	0.000	无	0.000	无	0.000
肇庆	无	0.000	轻度	0.005	轻度	0.029	无	0.000	无	0.000	轻度	0.005
中山	轻度	0.003	无	0.000								
珠海	轻度	0.002	无	0.000								

表9 无污染型城市

城市	无脆弱性								
	福州	海口	惠州	昆明	拉萨	厦门	深圳	张家口	舟山

表7所列34个城市为轻度-中度污染型城市. 该类城市的空气污染脆弱性主要出现在轻度污染等级, 且多次出现极度脆弱性和完全脆弱性, 说明该类城市空气轻度污染已是常态. 另外, 从污染程度发现, 空气中度污染脆弱性在常州、合肥等城市开始闪现, 但其值均很微小, 表明这些城市的空气质量尚未止步于轻度污染, 已经显现出恶化迹象, 并伴有中度污染的可能性. 其中, 像北京、天津等城市, 虽然中间闪过中度污染极度脆弱性, 但在随后期间并没有再出现, 且从样本时间上来看, 空气污染脆弱性仍以轻度污染为主, 因此将它们归于轻度-中度污染型城市.

表8中的16个城市为无-轻度污染型城市. 从空气污染程度来看, 这类城市空气质量相对较好, 主要集中在无污染和轻度污染. 从脆弱性的角度来说, 轻度污染的脆弱性主要集中在低度和中度, 偶尔会伴有高度和极度脆弱性. 说明这类城市良好的空气质量并未持续, 发生空气轻度污染的可能性依然存在. 此外, 可以看到, 在极度脆弱性出现之前, 轻度污染的脆弱性就已经显现, 虽然数值很小, 但也表明小概率发生空气轻度污染是大概率的前兆. 也就是说, 城市一旦出现空气轻度污染迹象, 就需引起足够重视, 及时采取必要措施, 避免低度脆弱性向高度、极度甚至是完全脆弱性发展.

表9中的9个城市在评价的6个月期间, 均未出现空气污染脆弱性, 属于无污染性城市, 这些城市完全没有空气污染的可能性, 空气质量好且稳定.

分解城市空气污染脆弱性显示, 绝大多数城市在评价期内出现过空气污染脆弱性, 其中大约20%的样本城市极有可能遭受中度及以上空气污染, 接近46%的城市发生轻度空气污染是大概率事件, 只有12%的城市在评价期内无污染脆弱性. 从城市污染类型划分结果中发现, 北方城市普遍比中部和南方严重, 其中空气污染最严重城市主要集中在京津冀经济圈以及中西部内陆地区, 而北京、天津等城市空气质量逐渐好转. 究其原因, 一方面中国存在“污染避难所”效应, 污染密集型企业由于环保技术创新能力不足, 无法承担环境管制所带来的环境成本, 逐渐向环境管制薄弱的欠发达地区迁移; 这也带动城市空气污染脆弱性的转移, 导致污染程度加重. 另一方面, 哈尔滨、济南、郑州等作为传统工业型城市, “二高”企

业依然存在, 环保技术的不配套, 无法从根源上消除污染源; 地区政府迫于经济增长目标的压力, 可能以降低环境管制标准为代价吸引投资项目, 致使城市空气质量状况雪上加霜. 空气轻度污染型城市主要集聚在长三角及东部沿海地区. 长三角地区是我国综合实力最强的经济中心, 也是全球重要的先进制造业基地, 城市空气污染呈现多污染源并存、多污染物耦合、重复污染的特征. 在工业集中的部分城市, 空气污染有加重趋势, 但从整体来看, 长三角城市群空气质量有所改善. 这主要得益于过去地区环境管制力度的加大, 治理措施的实地落实以及大规模治污基础设施的投入; 但一系列防治手段推行的同时, 城市空气污染物的减排边际效应却逐渐下降, 难以彻底遏制空气污染脆弱性. 在沿海城市中, 工业企业密度较小且海面无遮挡, 依靠强海风作用, 空气流通快, 空气污染物能在短时间内扩散; 而且海水具有空气净化能力, 能够吸附部分空气中的杂质, 从而使得沿海城市空气质量优于内陆城市. 作为我国高新技术产业集聚地, 珠三角地区仍有超过半数城市存在轻度污染脆弱性, 空气污染已从传统煤炭型污染转变为复合型污染. 独特地形条件形成的中尺度地方风系不利于该地区空气污染物的扩散; 天气潮湿及海风作用, 又促使空气污染物以“污染雾”形式向该区域上风向移动; 空气污染物不断积累和输送, 导致珠三角地区由局部城市空气污染发展成为区域性城市空气污染.

5 结论与政策建议

5.1 主要结论

本文从脆弱性这样一个新的视角探究了城市空气污染问题. 构建的分析模型不仅能反映当前城市空气污染的状况, 更重要的是能预测城市面对未来不确定性时遭受不同程度空气污染的概率. 基于中国74个样本城市的微观监测数据, 对城市空气污染脆弱性进行实证研究, 得到如下结论:

1) 中国城市空气污染在冬季已然成为普遍现象. 超过80%的样本城市具有空气污染脆弱性, 20%以上城市中空气污染是必然事件, 这个比例甚至会超过50%. 从污染程度来看, 很可能遭受中度及以上空气污染的城市约占20%, 以大概率发生轻度空气污染的城市接近46%, 只有12%的城市在评价期内无污染脆弱性.

2) 中国城市空气污染脆弱性不仅在相邻两级之间转移, 还存在跨级突变. 地区空气污染源没有得到持续有效的监督和控制, 空气污染物存在阶段性大量

排放现象;城市自身地理环境、人口、经济以及社会等不确定因素会产生不可控的空气污染物;空气污染治理效果具有即时性和临时性,也就是说,缺乏高效的空气污染治理技术,空气污染防治措施只具短期效应,无法从根本上解决污染源问题。

3) 中国城市空气污染脆弱性和空气污染程度均呈地域性特征。从脆弱性来看,北方城市空气污染脆弱性明显高于南方城市,而且北方城市空气质量恶化的可能性也远远大于南方城市。从污染程度来看,北方城市空气污染普遍比中部和南方城市严重,内陆城市比沿海城市严重。空气污染最严重城市主要聚集在京津冀经济圈;轻度污染型城市主要分布在长江流域及东部沿海地区;珠三角地区空气质量相对较好,但也仍有超过一半城市可能遭受空气轻度污染。

4) 中国存在“污染避难所”效应,市场规模小且环境管制力薄弱的欠发达地区对污染密集型企业更具吸引力,而且无论在环保理念方面还是在空气污染治理方面中国城市均表现出明显差异。有些城市发展绿色经济,注重环保,长期致力于改善空气质量,空气污染脆弱性逐渐下降;而更多的城市仍重发展轻环保,环境管制力度的降低以及阶段性的空气污染治理,致使城市空气污染脆弱性极不稳定,从而引起空气质量进一步恶化。

5.2 政策建议

改善城市空气质量是一项复杂的系统工程,需要付出长期艰苦不懈的努力。由于当前城市空气污染情况存在较大差异,中国政府应对城市污染进行差异化治理,以突出重点、分类指导、多管齐下、科学施策为基本原则,探寻治理污染的长效机制,以回归一个有利于人们身心健康、有利于社会经济可持续发展的自然环境。具体差异化应对策略如下。

重度-严重污染型城市,空气质量差,已经对人们的身体健康和日常生活构成威胁。因此,这类城市应作为治理的重点对象,采取如下应急措施:

1) 在城市空气污染严重期间,对城市交通流量大的道路增加清扫和冲洗频率,以减少交通扬尘污染。

2) 限制城市工程施工土石方开挖规模,建筑拆除必须在有效覆盖或洒水等条件下进行,以控制扬尘产生。

3) 工作日高峰期间进行区域交通管制,在车辆限行的基础上,严格禁止国I和国II排放标准轻型汽油车上路行驶。

4) 根据国家或地区大气污染物排放标准,对于大

气污染物排放浓度超标企业,严格实施停产限产措施。

中度-重度污染型城市,空气质量污染较为严重且具有进一步恶化趋势。这类城市应采取的污染治理措施:

1) 取代燃煤小锅炉;重点行业建设完成脱硫、脱硝、除尘改造工程;清除老旧车辆,根植绿色交通观念,研发和使用新能源汽车。

2) 有关部门必须严格限制高耗能,高排放行业的新增产能,坚决消除落后产能,以清洁能源代替煤炭,加速改变能源结构,降低煤炭消费比例。

3) 促进企业技术革新,培养科技创新能力。以循环、绿色经济为出发点,大力发展节能环保产业,加强环保技术、产品的研发与应用。

4) 提高投资项目准入门槛,严格遵守节能环保准则,禁止在污染脆弱性高的地区建设“两高”项目;借助市场调节机制,建立完善的价格、税收相关政策,促使民间和社会资本融入空气污染治理领域。

5) 健全空气污染相关法律法规,严格依法进行持久有效的监督管理。国家应定期公布空气污染严重城市名单,对重点污染型企业的环境信息采取强制公开制度。此外,运行区域合作机制,统筹区域间空气污染治理。

6) 明确各方责任。各级政府和相关部门需进行年度考核,对空气污染严重地区或企业进行责任追究;同时,要提高全社会环保意识,动员全民参与治理,共同改善城市空气质量。

对于轻度-中度污染和无-轻度污染两类型城市来说,空气质量状况相对较好,主要遭受轻度空气污染。在实现经济稳步发展的同时,防止空气质量恶化是该类城市的重点任务。控制空气污染物,必须在调查并明确污染源的基础上,借助技术、经济、法律以及其他手段和措施进行,起到有的放矢的作用。首先,采用无污染和低污染能源替代煤炭、燃料油等高污染能源;此外,通过预处理尽可能降低能源使用中产生的空气污染物。其次,从燃烧技术和设备入手,提高燃烧效率,研发并优先采用无污染和少污染的清洁生产流程。利用净化设备去除烟尘和各种工业粉尘;利用物理、化学方法净化尾气中的有害成分。再次,合理对能源定价和分配,通过经济杠杆助力空气污染治理的长效机制。最后,充分利用植物净化空气的能力,持续采用植树造林等城市绿化方式吸收空气污染物,以达到对城市空气质量的控制作用。

对于无污染型城市而言,在保持良好空气质量基础上,要防患于未然。首先,认真贯彻实施《中华人民共和国大气污染防治法》及其配套细则。各地区应严格按照《大气污染防治法》的要求,根据当地实际情况,制订相关政策、法规并加以完善,把《大气污染防治法》落到实处。其次,遏制污染型企业入驻,严禁在城市新、改、扩建和技改项目中使用陈旧落后的工艺和设备,从根本上杜绝污染源。最后,明确各地政府在预防空气污染过程中的责任,加大持久监管力度,提高公众环保意识,严禁空气污染物违法排放行为的发生。

参考文献(References)

- [1] World Health Organization (WHO). WHO global urban ambient air pollution database[EB/OL]. (2016-09-06). <https://www.who.int/>.
- [2] The Second Session of the United Nations Environment Assembly(UNEA2). Healthy environment, healthy people[EB/OL]. (2016-05-23). <https://reliefweb.int/report/world/healthy-environment-healthy-people>.
- [3] Chen X, Zhang L W, Huang J J, et al. Long-term exposure to urban air pollution and lung cancer mortality: A 12-year cohort study in Northern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 571: 855-861.
- [4] Casas L, Simons K, Nawrot T S, et al. Respiratory medication sales and urban air pollution in Brussels (2005 to 2011)[J]. *Environment International*, 2016, 94: 576-582.
- [5] Gouveia N, Junger W L. Effects of air pollution on infant and children respiratory mortality in four large Latin-American cities[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 232: 385-391.
- [6] Mishra S. Is smog innocuous? Air pollution and cardiovascular disease[J]. *Indian Heart Journal*, 2017, 69(4): 425-429.
- [7] Nenna R, Evangelisti M, Frassanito A, et al. Respiratory syncytial virus bronchiolitis, weather conditions and air pollution in an Italian urban area: An observational study[J]. *Environmental Research*, 2017, 158: 188-193.
- [8] Andersen Z J, de Nazelle A, Mendez M A, et al. A study of the combined effects of physical activity and air pollution on mortality in elderly urban residents: The Danish Diet, Cancer, and Health Cohort[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2015, 123: 557-563.
- [9] 郑思齐, 张晓楠, 宋志达, 等. 空气污染对城市居民户外活动的影响机制: 利用点评网外出就餐数据的实证研究[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2016, 56(1): 89-96.
(Zheng S Q, Zhang X N, Song Z D, et al. Influence of air pollution on urban residents' outdoor activity: Empirical study based on dining-out data from the Dianping website[J]. *J of Tsinghua University*, 2016, 56(1): 89-96.)
- [10] Suleimanov I F, Mavrin G V, Kharlyamov D A, et al. Assessment of urban air pollution caused by motor vehicle complex and industrial facilities[J]. *Research J of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 2015, 6(1): 1605-1609.
- [11] Azarov V, Sergina N, Kondratenko T. Problems of protection of urban ambient air pollution from industrial dust emissions[C]. *MATEC Web of Conferences*. St Petersburg: EDP Sciences, 2017: 106.
- [12] Knibbs L D, Barnett A G. Assessing environmental inequalities in ambient air pollution across urban Australia[J]. *Spatial and Spatio-temporal Epidemiology*, 2015, 13: 1-6.
- [13] Baralis E, Cerquitelli T, Chiusano S, et al. Analyzing air pollution on the urban environment[C]. *The 39th Int Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics*. Opatija: IEEE, 2016: 1464-1469.
- [14] Borge R, Narros A, Artínano B, et al. Assessment of microscale spatio-temporal variation of air pollution at an urban hotspot in Madrid (Spain) through an extensive field campaign[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 140: 432-445.
- [15] Amegah A K, Agyei-Mensah S. Urban air pollution in Sub-Saharan Africa: Time for action[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 220: 738-743.
- [16] Azarov V, Barikaeva N, Solovyeva T. Monitoring of fine particulate air pollution as a factor in urban planning decisions[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 150: 2001-2007.
- [17] Rodríguez M C, Dupont-Courtade L, Oueslati W. Air pollution and urban structure linkages: Evidence from European cities[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53: 1-9.
- [18] Ambarwati L, Verhaeghe R, van Arem B, et al. The influence of integrated space-transport development strategies on air pollution in urban areas[J]. *Transportation Research Part D*, 2016, 44: 134-146.
- [19] Zhang X, Ou X M, Yang X, et al. Socioeconomic burden of air pollution in China: Province-level analysis based on energy economic model[J]. *Energy Economics*, 2017, 68: 478-489.
- [20] Miguel J P M, de Blas C S, Sipols A E G. A forecast air pollution model applied to a hypothetical urban road pricing scheme: An empirical study in Madrid[J]. *Transportation Research Part D*, 2017, 55: 21-38.
- [21] Cariolet J M, Colombert M, Vuillet M, et al. Assessing

- the resilience of urban areas to traffic-related air pollution: Application in Greater Paris[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 615: 588-596.
- [22] Ban J, Zhou L, Zhang Y, et al. The health policy implications of individual adaptive behavior responses to smog pollution in urban China[J]. *Environment International*, 2017, 106: 144-152.
- [23] Becken S, Jin X, Zhang C, et al. Urban air pollution in China: Destination image and risk perceptions[J]. *J of Sustainable Tourism*, 2017, 25(1): 130-147.
- [24] Zhao D, Sing T F. Air pollution, economic spillovers, and urban growth in China[J]. *Annals of Regional Science*, 2017, 58(2): 321-340.
- [25] 亚洲开发银行. 《迈向环境可持续的未来: 中华人民共和国国家环境分析》中文版报告 [EB/OL]. (2013-01-14). <http://www.doc88.com/p-4935458826718.html>. (Asian Development Bank. *Toward an environmentally sustainable future: Country environmental analysis of the people's republic of China*[EB/OL]. (2013-01-14). <http://www.doc88.com/p-4935458826718.html>.)
- [26] Zheng W, Li X, Yin L, et al. Spatiotemporal heterogeneity of urban air pollution in China based on spatial analysis[J]. *Rendiconti Lincei*, 2016, 27(2): 351-356.
- [27] 潘竟虎, 张文, 王春娟. 2011-2013年中国雾霾易发生期间API的分布格局[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(3): 1340-1348.
(Pan J H, Zhang W, Wang C J. Spatial pattern of urban air pollution during large-scale range haze based on fractal net evolution approach and GIS in China[J]. *Chinese J of Environmental Engineering*, 2016, 10(3): 1340-1348.)
- [28] Sun Y, Zhang J, Pan Y, et al. Observations of air quality on the outskirts of an urban agglomeration during the implementation of pollution reduction measures[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2014, 5(4): 789-795.
- [29] Wang Y, Liu H, Mao G, et al. Inter-regional and sectoral linkage analysis of air pollution in Beijing - Tianjin - Hebei (Jing-Jin-Ji) urban agglomeration of China[J]. *J of Cleaner Production*, 2017, 165: 1436-1444.
- [30] Han L, Zhou W, Li W, et al. Meteorological and urban landscape factors on severe air pollution in Beijing[J]. *J of the Air and Waste Management Association*, 2015, 65(7): 782-787.
- [31] Li S K, Feng K S, Li M X. Identifying the main contributors of air pollution in Beijing[J]. *J of Cleaner Production*, 2017, 163: S359-S365.
- [32] Liu H, Ma W, Qia J, et al. Effect of urbanization on the urban meteorology and air pollution in Hangzhou[J]. *J of Meteorological Research*, 2015, 29(6): 950-965.
- [33] He C, Pan F, Yan Y. Is economic transition harmful to China's urban environment? Evidence from industrial air pollution in Chinese cities[J]. *Urban Studies*, 2012, 49(8): 1767-1790.
- [34] Cheng J, Du W. Application of Mie lidar in an urban air pollution detection[J]. *Lasers in Engineering*, 2012, 24(3/4): 261-268.
- [35] Zha Y, Gao J, Jiang J, et al. Normalized difference haze index: A new spectral index for monitoring urban air pollution[J]. *Int J of Remote Sensing*, 2012, 33(1): 309-321.
- [36] Azeem M M, Muger A W, Schilizzi S. Living on the edge: Household vulnerability to food-insecurity in the Punjab, Pakistan[J]. *Food Policy*, 2016, 64: 1-13.
- [37] 樊丽明, 解垚. 公共转移支付减少了贫困脆弱性吗?[J]. *经济研究*, 2014(8): 67-78.
(Fan L M, Xie E. Do public transfers reduce vulnerability?[J]. *Economic Research Journal*, 2014(8): 67-78.)
- [38] 杨龙, 汪三贵. 贫困地区农户脆弱性及其影响因素分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(10): 150-156.
(Yang L, Wang S G. Households' vulnerability and determinants analysis in poor areas[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(10): 150-156.)
- [39] Wooldridge J M. *Introductory econometrics: A modern approach*[M]. 4th ed. Boston: South-Western Cengage Learning, 2008: 1-926.
- [40] Gong J P, Hu Y M, Liu M, et al. Characterization of air pollution index and its affecting factors in industrial urban areas in Northeastern China[J]. *Polish J of Environmental Studies*, 2015, 24(4): 1579-1592.
- [41] Anttila P, Stefanovska A, Nestorovska-Krsteska A, et al. Characterisation of extreme air pollution episodes in an urban valley in the Balkan Peninsula[J]. *Air Quality Atmosphere and Health*, 2016, 9(2): 129-141.
- [42] Pahlavani P, Sheikhan H, Bigdeli B. Assessment of an air pollution monitoring network to generate urban air pollution maps using Shannon information index, fuzzy overlay, and Dempster-Shafer theory, A case study: Tehran, Iran[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 167: 254-269.

作者简介

万里洋(1990—),男,博士生,从事评价理论与应用的研究, E-mail: 396721653@qq.com;

吴和成(1963—),男,教授,博士生导师,从事数量经济与技术经济等研究, E-mail: wlyboy2012@163.com.

(责任编辑: 孙艺红)