

DOI: 10.5846/stxb201801060038

别同, 韩立建, 何亮, 田淑芳, 周伟奇, 李伟峰, 钱雨果. 城市空气污染对周边区域空气质量的定量影响研究. 生态学报, 2018, 38(12): - .  
Bie T, Han L J, He L, Tian S F, Zhou W Q, Li W F, Qian Y G. Impact of urban air pollution on surrounding areas in Beijing, Tianjin, and Hebei Provinces. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): - .

## 城市空气污染对周边区域空气质量的定量影响研究

别同<sup>1,2</sup>, 韩立建<sup>1,\*</sup>, 何亮<sup>1,2,3</sup>, 田淑芳<sup>2</sup>, 周伟奇<sup>1</sup>, 李伟峰<sup>1</sup>, 钱雨果<sup>1</sup>

1 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 10085

2 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083

3 中国人民武装警察部队武警黄金第八支队, 乌鲁木齐 830026

**摘要:** 京津冀地区是全球以 PM<sub>2.5</sub> 为首要污染物的空气污染最严重的区域之一, 并已严重制约区域发展。大区域尺度上(例全国尺度)开展城市与其周边区域的 PM<sub>2.5</sub> 的研究通常直接比较二者的浓度差异, 以定量地评估城市 PM<sub>2.5</sub> 污染对周边区域的影响, 但这种方法在小区域较难精细地刻画城市对周边区域的影响的方向性和距离性差异。因此, 本研究利用京津冀地区 13 个城市 2000 年, 2005 年, 2010 年, 2015 年 PM<sub>2.5</sub> 浓度和土地覆盖类型数据, 以城市重心到城市边界的平均距离为基本距离, 建立每个城市的一级(一倍基本距离)和二级(二倍基本距离)缓冲区, 然后将缓冲区分成 8 个象限, 以定量分析城市 PM<sub>2.5</sub> 污染对周边区域影响的方向性和距离差异。结果发现: (1) 2000—2015 年, 京津冀城市群各地级市与周边区域空气质量时空分布分为以下两种模式: 第一种模式是城区浓度高, 周边区域低; 第二种模式是城区浓度低, 周边区域高且浓度差异很小。(2) 各地级市对周边区域影响程度和范围呈上升趋势, 并且这种影响具体表现在距离性和方向性两方面: ①大部分城市距离城区越远, 受城市 PM<sub>2.5</sub> 污染的潜在影响越大。②2000—2015 年, 除天津、廊坊、衡水和沧州, 其余城市空气污染对周边影响的方向性特征差异显著。本研究通过建立了城市空气污染对周边区域量化方法并在京津冀开展实证研究, 拓展了城市空气污染对周边区域空气质量影响研究的方法体系, 为定量地开展城市化的生态环境效应研究提供了方法和实证拓展。

**关键词:** PM<sub>2.5</sub>; 京津冀; 方向; 距离

## Impact of urban air pollution on surrounding areas in Beijing, Tianjin, and Hebei Provinces

BIE Tong<sup>1,2</sup>, HAN Lijian<sup>1,\*</sup>, HE Liang<sup>1,2,3</sup>, TIAN Shufang<sup>2</sup>, ZHOU Weiqi<sup>1</sup>, LI Weifeng<sup>1</sup>, QIAN Yuguo<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Earth Science and Resources Institute, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

3 Chinese People's Armed Police Corps Golden Eighth Detachment, Urumqi 830026, China

**Abstract:** The Beijing-Tianjin-Hebei region is one of the most air-polluted areas in the world where PM<sub>2.5</sub> has been identified as the major air pollutant that has become the most restrictive factor in regional development. The study of PM<sub>2.5</sub> in cities and surrounding areas on a large regional scale (e.g., national scale) usually directly compares concentration differences and evaluates the impact of urban PM<sub>2.5</sub> pollution on the surrounding areas simply and quantitatively. This method of assessment of cities and surrounding areas is difficult to apply to small areas to quantify and analyze differences in pollutant direction and distances. Based on the data of PM<sub>2.5</sub> concentrations and land cover types of 13 cities in Beijing, Tianjin, and Hebei Provinces in 2000, 2005, 2010, and 2015, the average distance from the city center to the urban

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41590841, 41771201); 国家重点研发计划(2016YFC0503004); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDB-SSW-DQC034-2)

收稿日期: 2018-01-06; 修订日期: 2018-05-07

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ljhan@rcees.ac.cn

border was used as the basic distance reference, first- (one-time basic distance) and second-level (two-times basic distance) buffer analyses were performed for each urban area, which was then divided into eight quadrants to quantitatively analyze the impact of urban  $PM_{2.5}$  pollution on the surrounding area to determine differences in pollutant direction and distance. The results are as follows: (1) the spatial-temporal distribution of air quality in all prefecture-level cities and surrounding areas in Beijing, Tianjin, and Hebei in 2000—2015 was divided into the following modes: first, high concentrations in urban areas and low concentrations in the surrounding areas; second, low concentrations in urban areas, high concentrations in surrounding areas, and the difference of concentrations is small; (2) the impact and scope of the surrounding cities on the surrounding areas is increasing, and is manifested in two aspects: distance and direction: ① the farther the majority of the cities are from the urban area, the greater the potential impact of cities on the surrounding areas; ② in 2000—2015, except for Tianjin, Langfang, Hengshui, and Cangzhou, the other cities had significant differences in the directional characteristics of air pollution. In this study, a quantitative method was established to analyze the impact of urban  $PM_{2.5}$  pollution on the surrounding area in Beijing, Tianjin, and Hebei Provinces, and expand the methodology for studying the impact of urban air pollution on the air quality in the surrounding areas. Research on environmental effects provides methodological and empirical methods to quantitatively analyze urban ecology.

**Key Words:**  $PM_{2.5}$ ; Beijing-Tianjin-Hebei; direction; distance

近年来,由于快速城市化引起的城市扩张、人口增加、以及能源消耗的不断上升等,导致了我国空气污染问题愈发严重<sup>[1-5]</sup>,波及范围越来越广<sup>[6]</sup>,持续时间越来越长。而这种污染通常呈现一种综合性污染,主要包括本地源污染和外来污染,本地源污染会归结为城市内部剧烈的污染排放,例如机动车、燃煤和工业扬尘等,而外来污染受气象因素影响,具有区域扩散性<sup>[7-9]</sup>。因此对空气污染的空间溢出效应也越来越得到学者的重视,大多集中于对  $SO_2$ ,  $PM_{10}$  以及  $PM_{2.5}$  等在不同省市之间的空间溢出效应<sup>[10-14]</sup>,一个地区的  $PM_{2.5}$  污染受周围其他(省、市)的影响,并且在重点城市之间空间溢出效应也较强<sup>[15-16]</sup>。空气污染溢出效应研究主要以监测点数据为主,考虑省市之间较大范围,就缺乏城市空气污染对周边区域较近距离的影响,并且以往研究发现城市是  $PM_{2.5}$  污染的主要源头<sup>[17]</sup>,同时因  $PM_{2.5}$  粒径小,大气留存时间较长,会在气象条件和污染浓度差异的作用下,由上风向下风向,由高浓度向低浓度区域扩散,进而对城市周边区域产生影响,所以会随着污染物浓度的升高以城市为单核心的空气污染也会造成区域性即城市周边区域的严重污染。

在基于大区域尺度空间上城市对周边区域影响研究通常会比较城市与周边  $PM_{2.5}$  的浓度差异,而在城市群尺度上运用此方法就缺乏空间细致性特征,较难定量地分析城市  $PM_{2.5}$  对周边区域的方向性和距离性差异。为此,本研究建立了适用于城市群尺度上城市空气污染对周边区域影响的模型,并且以京津冀地区为例进行实证研究。

## 1 评估方法

为探究小区域尺度上城市空气污染对周边区域的影响,可建立以下模型,即以城市重心到城市边界的平均距离为基本距离参考,利用 ArcGIS 对每个城市区域进行一级(一倍距离)、二级(二倍距离)…… $i$ 级( $i$ 倍距离)缓冲区分析,然后对缓冲区进行  $j$  个象限分割,定量分析城市  $PM_{2.5}$  污染对周边区域影响的方向性和距离差异。

$$\Delta p_{ij} = \frac{p_{0j} - p_{ij}}{p_{0j}}$$

式中,  $\Delta p_{ij}$ : 城区对周边区域的影响比率,  $p_{0j}$ : 城区在  $j$  方向上的浓度,  $p_{ij}$ : 第  $i$  级缓冲区  $j$  方向上的浓度

本研究(图 1)选取  $i=2, j=8$ ; 即对每个城市进行一、二级缓冲区分析,然后对缓冲区进行 8 个象限分割,利用以上公式计算每个方向上城市对周边区域的影响比率,从而定量探究小区域上城市空气污染对周边区域

的影响,也力求验证此模型的可行性。

## 2 典型研究区选择与数据预处理

京津冀城市群(图2)是目前以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物的全球空气污染最为严重的区域之一,作为中国的“首都圈”,又是中国北方经济的重要核心区,包括北京市、天津市以及河北省的保定、唐山、廊坊、石家庄、秦皇岛、张家口、承德、沧州、邯郸、邢台、衡水共13个地级市。在2016中国环境状况公报中显示,京津冀城市群2016年 $PM_{2.5}$ 的平均浓度为 $71 \mu g/m^3$ ,相比2015年有所降低,但距离世界卫生组织的第一阶段空气质量标准 $35 \mu g/m^3$ 仍有较大的差距。

### 2.1 $PM_{2.5}$ 数据

$PM_{2.5}$ 数据来源于达尔豪斯大学大气成分分析组(Atmospheric Composition Analysis Group at Dalhousie University)(数据编号V4.GL.02)。该数据是基于CEOS-Chem化学传输模型的模拟,利用中等分辨率成像光谱仪(MODIS)和多角度成像光谱仪(MISR)反演的气溶胶光学深度数据(AOD)与气溶胶垂直剖面 and 散射特性的结合估算而得到的数据集,结合地理加权回归模型在全球范围内与地面监测数据交互验证,具有较好的精度( $r^2=0.81$ ;  $slope=0.68$ ),可在全球、国家和区域等多尺度开展应用研究<sup>[18]</sup>。本研究所选用的是2000、2005、2010、2015年京津冀城市群 $PM_{2.5}$ 数据,其空间分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ ,在京津冀地区约为 $1 km \times 1 km$ 。

### 2.2 土地覆盖分类数据

本研究选取由中国科学院遥感与数字地球研究所提供的2000、2005、2010、2015年Landsat5、Landsat7、Landsat8遥感影像数据,利用eCognition软件对京津冀城市群地区进行遥感分类得到土地覆盖分类数据,空间分辨率为 $30 m \times 30 m$ ,分类总体精度达到80%以上。

## 3 主要结果与讨论

### 3.1 各地级市城区与周边区域空气质量时空分布

京津冀城市群各地级市城市区域与周边区域空气质量时空分布(图3)所示,可直观反映区域大气环境质量的变化。北京和天津作为京津冀城市群的核心功能区,城市化发展程度较高,所以它们区域大气质量变化较明显。

2000年,北京、石家庄、保定等城市区域 $PM_{2.5}$ 浓度高于一二级缓冲区浓度且差异较大;衡水、沧州和廊坊城市区域 $PM_{2.5}$ 也高于一二级缓冲区浓度,但差异很小,近似相等;而天津城区 $PM_{2.5}$ 浓度低于一二级缓冲区浓度,差异也很小。从一二级缓冲区浓度看,除天津、秦皇岛和承德外,其余城市及其周边区域距离城区越远, $PM_{2.5}$ 浓度越低。

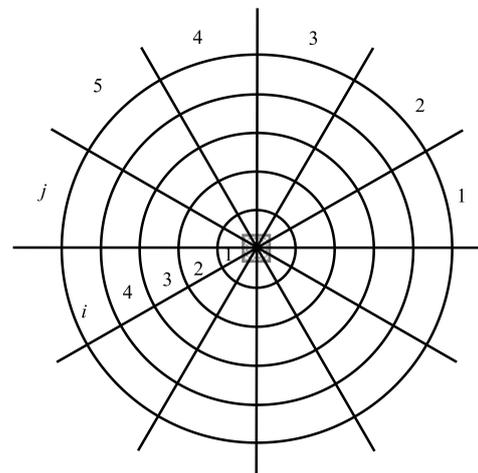


图1 评估模型

Fig.1 Evaluation model

图中,0—i表示不同缓冲区的等级,其中0代表城区,即中心阴影区域;1—j表示不同方向

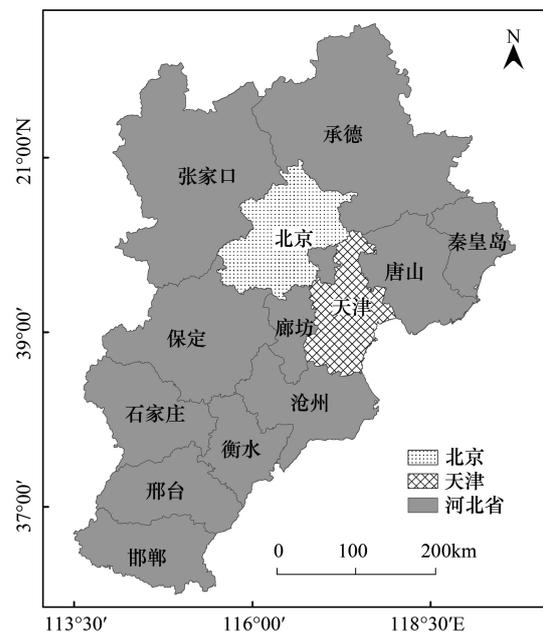


图2 京津冀地区图

Fig.2 The reigon of Beijing-Tianjin-Hebei

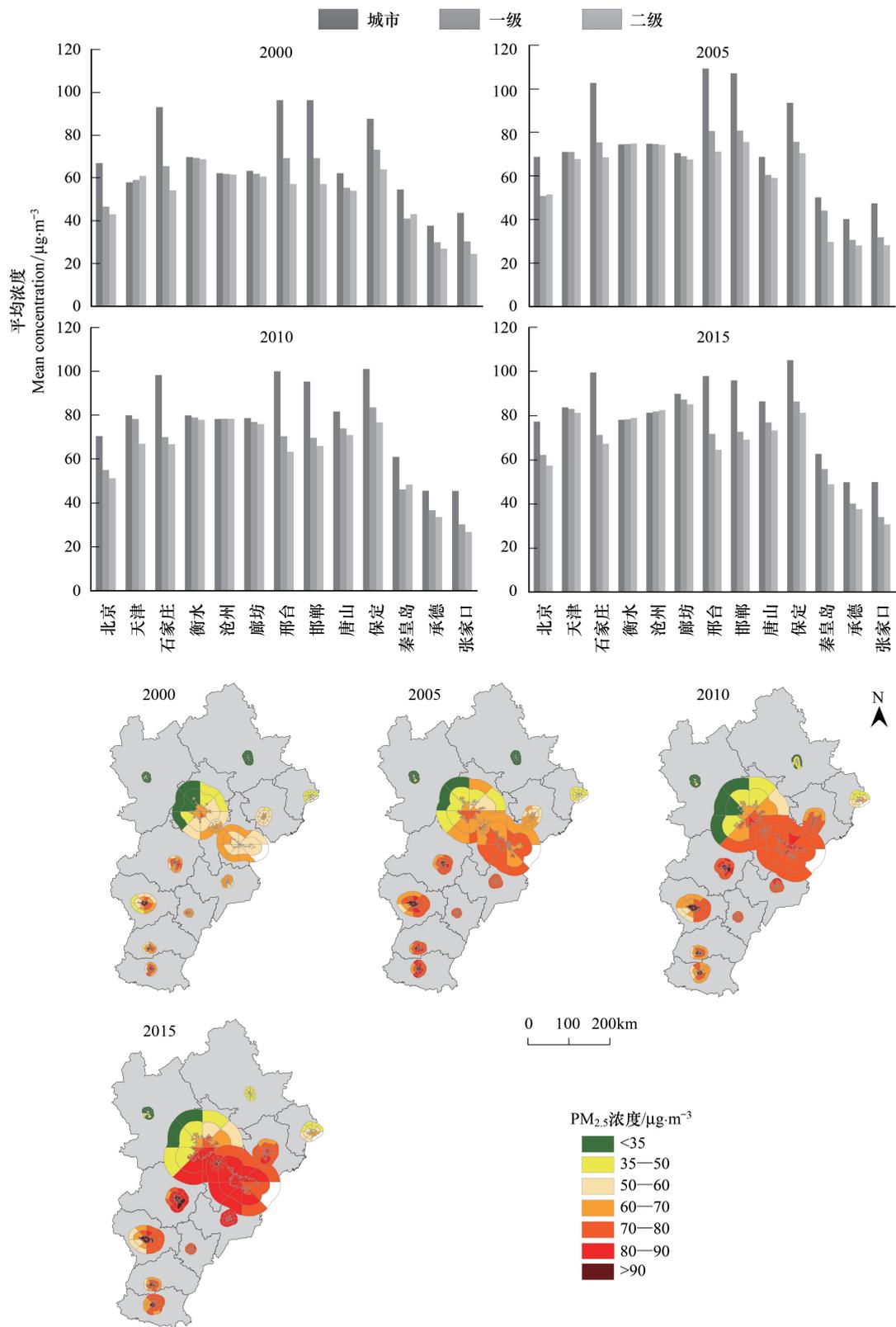


图3 城市与周边 PM<sub>2.5</sub>分布图

Fig.3 The PM<sub>2.5</sub> distribution map of city and the surrounding area

2005年,北京、石家庄、保定等城市区域 PM<sub>2.5</sub>浓度高于一二级缓冲区浓度且差异较大;天津、沧州和廊坊

城市区域  $PM_{2.5}$  也高于一二级缓冲区浓度,但差异很小;而衡水城区  $PM_{2.5}$  浓度低于一二级缓冲区浓度,差异也很小。从一二级缓冲区浓度看,除北京外,其余城市及其周边区域距离城区越远, $PM_{2.5}$  浓度越低。

2010 年,北京、石家庄、保定等城市区域  $PM_{2.5}$  浓度高于一二级缓冲区浓度且差异较大;天津、衡水和廊坊城市区域  $PM_{2.5}$  也高于一二级缓冲区浓度,但差异很小;而沧州城区  $PM_{2.5}$  浓度低于一二级缓冲区浓度,差异也很小。从一二级缓冲区浓度看,除秦皇岛外,其余城市及其周边区域距离城区越远, $PM_{2.5}$  浓度越低。

2015 年,北京、石家庄、保定等城市区域  $PM_{2.5}$  浓度高于一二级缓冲区浓度且差异较大;天津和廊坊城市区域  $PM_{2.5}$  也高于一二级缓冲区浓度,但差异很小;而衡水和沧州城区  $PM_{2.5}$  浓度低于一二级缓冲区浓度,差异也很小。从一二级缓冲区浓度看,除衡水外,其余城市及其周边区域距离城区越远, $PM_{2.5}$  浓度越低。

2000—2015 年,总的变化来看,京津冀城市群各地级市城市与周边区域空气质量时空分布分为以下两种模式:

第一种模式是城区  $PM_{2.5}$  浓度高,周边区域低,具体表现在北京、石家庄、保定等这类重污染型城市和承德、张家口等这类轻污染型城市。北京、石家庄等城区人口密度高,居住用地密集,机动车流量大等,城市化程度相较于城区周边高,这种模式较符合  $PM_{2.5}$  是城市的主要来源。

第二种模式是城区  $PM_{2.5}$  浓度低,周边区域浓度高,且浓度相比差异很小,具体表现在天津、廊坊、衡水和沧州。天津和廊坊形成这种模式,主要是与地理位置和气象因素(风向、风速等)有关,廊坊地处北京天津两大城市之间,廊坊城区及其周边  $PM_{2.5}$  浓度会受北京及天津区域传输的影响,而天津城区周边的西北部地区与北京周边的东南部地区也是相互影响;衡水和沧州形成这种模式主要与本地的产业结构布局有关,城区周边一般都分布较多重工业,而工业排放也被认为是  $PM_{2.5}$  污染源之一,所以周边区域  $PM_{2.5}$  浓度也较高。

大部分城市与其周边区域浓度距离城区越远,浓度表现越低,并且在每个方向上浓度差异较显著。在不同时间段,具有不同的特征,具体表现如下:

1) 2000—2005 年,北京、石家庄、保定等城市区域  $PM_{2.5}$  浓度高于一二级缓冲区浓度,并且城区浓度呈增长趋势,周边区域一级缓冲区普遍比二级缓冲区浓度高,且浓度在每个方向上差异较大,而天津和衡水城市区域  $PM_{2.5}$  浓度低于一二级缓冲区浓度。

2) 2005—2010 年和 2010—2015 年,同样表现为北京、石家庄、保定等城区  $PM_{2.5}$  浓度高于一二级缓冲区浓度,且浓度在周边区域每个方向上存在差异,而衡水和沧州表现为城区  $PM_{2.5}$  浓度低于周边区域浓度。

### 3.2 定量化分析各城市区域对周边区域的影响

总体上大部分城市对周边区域产生影响,少数城市表现为周边区域对城市产生影响,但是京津冀城市群各地级市城市区域对周边区域的影响在每个方向上差异显著,且不同年份方向性特征不同(图 4)。具体表现为:

1) 2000 年,北京和邢台在方向 3、4、5 上城市对周边区域影响较大,且北京城区对

周边区域影响比率在方向 4 上达到最高,为 63%,其他城市在方向上都不具有相似特征;石家庄表现在方向 4、5、6 上影响比率较高,保定表现在方向 3、5 上影响比率较高,唐山在方向 2 上影响比率较高,邯郸在方向 4、5 上影响比率较高,秦皇岛在方向 2、5 上影响比率较高,承德、张家口分别在方向 4、方向 2 上影响比率较高,而天津、廊坊、衡水和沧州每个方向上城市对周边区域影响比率很低,接近于 0 或者小于 0,可以认为是周边区域对城市本身会产生较大影响;

2) 2005 年,北京和邢台在方向 3、4、5 上城市对周边区域影响比率较高,其他城市

在方向上不具有相似性特征;石家庄表现在方向 4、5、6 上影响比率较高,保定在方向 3、5 上影响比率较高,唐山方向 2 上影响比率较高,邯郸在方向 4、5 上影响比率较高,秦皇岛在方向 2、5 上影响比率较高,承德在方向 4、5 上影响比率较高,张家口在方向 3、4 上影响比率较高,而天津、廊坊、衡水和沧州这四个城市影响比率都较小,在每个方向上接近于 0 或者小于 0,说明周边区域对城市本身影响较大;

3) 2010 年,北京在方向 3、4、5 上城市对周边区域影响比率较高,石家庄在方向 5

上影响比率较高,邢台在方向 4、5 上影响比率较高,保定在方向 3、4、5 上影响比率较高,唐山在方向 2 上影响比率较高,邯郸在方向 4、5 上影响比率较高,秦皇岛在方向 2、4 上影响比率较高,承德和张家口分别在方向 4、方向 1 上影响比率较高,而天津、廊坊、衡水和沧州这四个城市影响比率都较小,说明周边区域对城市本身影响较大;

4)2015 年,北京和邢台在方向 3、4、5 上城市对周边区域影响比率较高,石家庄在

方向 5、6 上影响比率较高,保定在方向 3、4 上影响比率较高,唐山在方向 2 上影响比率较高,邯郸在方向 4、5 上影响比率较高,秦皇岛和张家口分别在方向 4、方向 1 上影响比率较高,承德在方向 4、5、6 上影响比率较高,而天津、廊坊、衡水和沧州这 4 个城市影响比率都较小,在每个方向上接近于 0 或者小于 0,说明周边区域对城市本身影响较大。

京津冀城市群各地级市城市区域对周边区域影响不仅在不同年份具有不同的方向性特征,而且在不同时间段方向性特征也会发生相应变化,具体表现为:

1)2000—2015 年,北京城区对周边区域的影响一直保持在方向 3、4、5 影响较大,即在北京的西北部地区城市对周边潜在影响较大;唐山和邯郸对周边区域影响的方向性特征也始终不变;天津、廊坊、衡水和沧州这四个城市在每个方向城区对周边影响存在一种相对平衡稳定分布的一个状态,所以方向性特征不明显,而且每个方向上影响都很小,甚至为负,可以认为是周边区域对城区本身有很大的潜在影响;其余各地级市都存在方向上变化,分析原因首先是跟风向因素相关,然后是与产业结构地理位置、重工业分布相关。

2)2000—2005 年,除天津、廊坊、衡水和沧州外,大部分城市对周边区域影响的方向性特征都没变化,北京和邢台对周边区域一直在方向 3、4、5 上影响较大,石家庄也保持在方向 4、5、6 上影响较大,保定、唐山、邯郸和秦皇岛的方向性特征也同样没变化,而承德由在方向 4 上增加为在方向 4、5 上影响较大,张家口由方向 2 变为在方向 3、4 上影响较大;

3)2005—2010 年,除天津、廊坊、衡水和沧州外,北京、唐山和邯郸的方向性特征都没变化,其他城市对周边区域影响都存在方向上变化,石家庄由在方向 4、5、6 上减少为在方向 5 上影响较大,张家口在方向 3、4 上变为在方向 1 上影响较大等;

4)2010—2015 年,除天津、廊坊、衡水和沧州外,北京、唐山、邯郸和张家口城市对周边区域影响方向性特征没有变化,其他城市都发生相应变化,石家庄在方向 5 上变为在方向 5、6 上影响较大,承德在方向 4 上变为在方向 4、5、6 上影响较大等。

京津冀城市群中北京、石家庄、邢台、邯郸、承德和张家口这些城市对周边区域影响比率都较高,大部分处于 30%—45%,而天津、唐山等城市影响比率都较小,大部分都接近于 0,但这种潜在影响并不能反映实际影响大小。北京的方向性特征表现在方向 3、4、5 上,即在西北部地区城市对周边区域影响较大,则西北部周边区域  $PM_{2.5}$  浓度应该较高,而在实际中西北部地区受到气象、地形因素影响,西北部  $PM_{2.5}$  浓度一直较低,空气质量最好;天津和唐山城市  $PM_{2.5}$  对周边区域影响较小,则周边区域浓度应该较低,但是天津和唐山分布较多重工业,而且天津周边受北京和廊坊影响, $PM_{2.5}$  浓度在城区和郊区都很高。所以本研究中城市对周边区域的潜在影响大小,与实际产生的影响是有差异的,潜在影响大可能意味着真实影响小,潜在影响小也可能意味着真实影响大。本研究主要关注的是在年际尺度的变化,缺少了气象因素(风向、风速等)的考虑,京津冀城市群属于季风控制区,冬春和夏秋季风方向相反,气象因素对本研究的影响结果是有贡献的,所以需要进一步开展年内的精细尺度与风向因素的研究。在以往的研究中,城市与周边区域的空气污染是存在相互影响,有很多是采用污染扩散追踪<sup>[19-20]</sup>等方法探究周边的污染源对城市的影响范围及影响途径,较少地分析城市对周边造成影响,本研究通过建立城市空气污染对周边区域空气质量影响的定量方法,以京津冀地区为例探究这种影响的方向性和距离性差异,表明京津冀地区各地级市距离周边越远,这种影响越大,并且这种影响具有方向性和距离性等方面的特征,有力地论证了方法的有效性,但是这种定量方法对于深入研究城市对周边影响依旧有待改进。空气污染来源复杂,影响因素多<sup>[21]</sup>,从污染的来源上分析,城市的复合景观格局特征及其生

态环境效应对污染的影响具有举足轻重的作用,有研究表明建筑用地和林地作为城市下垫面的两种重要表现形式,建筑用地对  $PM_{2.5}$  是有贡献作用,而林地对  $PM_{2.5}$  是有消除作用,同时不同城市功能区的建筑用地对  $PM_{2.5}$  污染的贡献差异显著,这恰恰体现了城市复合景观格局对空气污染物的“源汇”贡献关系<sup>[22]</sup>,因此,建议进一步加强探讨城市与区域复合景观格局对空气污染的源汇效应解析,以进一步评估城市与区域空气质量的相互影响效应。另外,本文中选用的  $PM_{2.5}$  数据,受分辨率影响,会存在极高和极低值被区域忽略的问题,在今后的相关研究中,应该加强更高时空分辨率  $PM_{2.5}$  浓度数据的获取,以更准确解析梯度差异和城市  $PM_{2.5}$  对周边区域的定量影响。

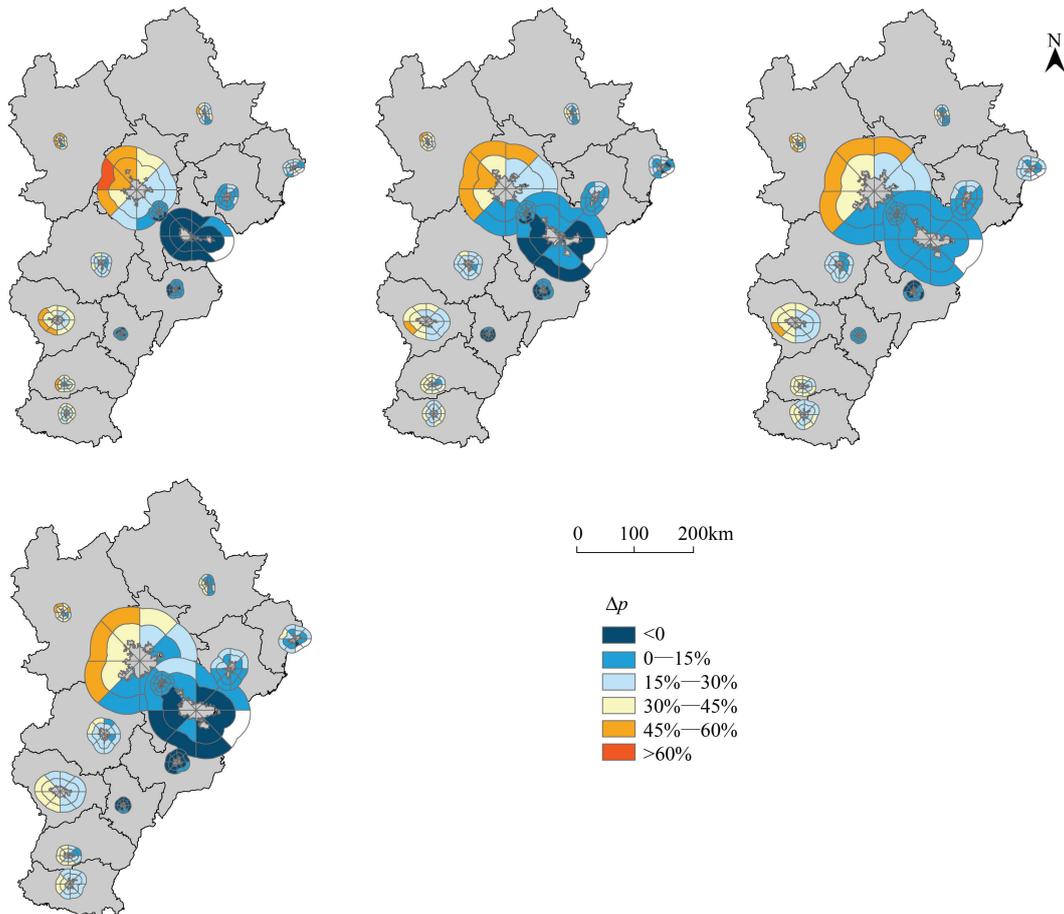


图 4 城市  $PM_{2.5}$  对周边影响分布图

Fig.4 The distribution map of impact of urban air pollution on its surrounding areas

#### 4 结论与政策

为有效评估城市空气污染对周边区域影响,建立了城市空气污染对周边影响的定量方法,并以京津冀区域开展实证研究,利用 2000、2005、2010、2015 年的  $PM_{2.5}$  数据、土地覆盖类型数据验证模型的可行性,进而得到以下结论:

(1) 2000—2015 年,京津冀城市群各地级市与周边区域空气质量时空分布分为以下两种模式:第一种模式是城区浓度高,周边区域低;第二种模式是城区浓度低,周边区域高且浓度差异很小。

(2) 各地级市对周边区域影响程度和范围呈上升趋势,并且这种影响具体表现在距离性和方向性两方面:①大部分城市距离城区越远,城市  $PM_{2.5}$  对周边区域的影响越大。②2000—2015 年,除天津、廊坊、衡水和沧州,其余城市空气污染对周边影响的方向性特征差异明显。例如:北京城市区域对周边区域影响大一直保

持在西北部地区;而天津、沧州、衡水、廊坊对周边区域影响很小,方向性特征不明显。

在科学研究方面,本文建立了小区域尺度上城市空气污染对周边区域影响的评估模型可以有效地定量解析城市对周边区域潜在影响的方向性和距离性差异,为定量地开展城市化的生态环境效应研究提供了方法和实证拓展。

在污染治理措施方面,需要更为严格的城市空气污染防控策略,建立城市与周边区域污染水平差异指标,以动态评估城市空气污染对周边区域的影响程度,其中天津、衡水、沧州和廊坊由于方向性特征不明显,并且 $PM_{2.5}$ 浓度都较高,要限制周边整个区域的污染,而北京、石家庄、邢台、邯郸和保定等城市则要加强城市内部污染的管控;同时要增加建设城市周边区域距离城市不同距离、不同方向位置的空气污染监测点,为监测评估提供实证案例,增强本研究的说服力。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 王浩,高健,李慧,王涵,李轶,王淑兰,柴发合. 2007—2014年北京地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化特征. 环境科学研究, 2016, 29(6): 783-790.
- [ 2 ] Zhang H, Xie B, Zhao S Y, Chen Q.  $PM_{2.5}$  and tropospheric  $O_3$  in China and an analysis of the impact of pollutant emission control. *Advances in Climate Change Research*, 2014, 5(3): 136-141.
- [ 3 ] 毛宁,李益祺. 基于主成分分析的全国主要城市空气质量评价. 现代商贸工业, 2014, 26(10): 49-50.
- [ 4 ] Han L J, Zhou W Q, Li W F, Li L. Impact of urbanization level on urban air quality: a case of fine particles ( $PM_{2.5}$ ) in Chinese cities. *Environmental Pollution*, 2014, 194: 163-170.
- [ 5 ] Han L J, Zhou W Q, Li W F. Increasing impact of urban fine particles ( $PM_{2.5}$ ) on areas surrounding Chinese cities. *Scientific Reports*, 2015, 5: 12467.
- [ 6 ] 白建辉,吴翼美,柴文海,王普才,王庚辰. 华北大气本底微量气体与颗粒物的长期变化. 地球科学前沿, 2015, 5(3): 248-263.
- [ 7 ] 吴虹.  $PM_{2.5}$ 区域污染特征及其背景评估方法研究[D]. 天津:南开大学, 2015.
- [ 8 ] 马锋敏,高庆先,周锁铨,苏福庆,康娜,孙杰. 北京及周边地区一次典型大气污染过程的模拟分析. 环境科学研究, 2008, 21(1): 30-36.
- [ 9 ] 刘世俊,李涂斌,林佳钰,于华明. 北京周边城市大气污染物对其空气质量的影响. 自然科学, 2016, 4(3): 284-291.
- [ 10 ] 孙晓雨,刘金平,杨贺. 中国城市大气污染区域影响空间溢出效应研究. 统计与信息论坛, 2015, 30(5): 87-92.
- [ 11 ] 梁伟,杨明,张延伟,等. 城镇化率的提升必然加剧雾霾污染吗——兼论城镇化与雾霾污染的空间溢出效应. 地理研究, 2017, 36(10): 1947-1958.
- [ 12 ] 马黎,梁伟. 中国城市空气污染的空间特征与影响因素研究——来自地级市的经验证据. 山东社会科学, 2017, (10): 138-145.
- [ 13 ] 向堃,宋德勇. 中国省域 $PM_{2.5}$ 污染的空间实证研究. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(9): 153-159.
- [ 14 ] 王一辰,沈映春. 京津冀雾霾空间关联特征及其影响因素溢出效应分析. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(S1): 41-44.
- [ 15 ] 刘晓红,江可申. 我国雾霾污染影响因素的空间效应——基于 $PM_{2.5}$ 的实证分析. 科技管理研究, 2017, 37(12): 247-252.
- [ 16 ] Gong Z Z, Zhang X P. Assessment of urban air pollution and spatial spillover effects in China: cases of 113 key environmental protection cities. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(6): 584-594.
- [ 17 ] Han L J, Zhou W Q, Li W F. City as a major source area of fine particulate ( $PM_{2.5}$ ) in China. *Environmental Pollution*, 2015, 206: 183-187.
- [ 18 ] Van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, Hsu N C, Kahn R A, Levy R C, Lyapustin A, Sayer A M, Winker D M. Global estimates of fine particulate matter using a combined geophysical-statistical method with information from satellites, models, and monitors. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(7): 3762-3772.
- [ 19 ] 孟伟,高庆先,张小玲,康娜. 周边污染源对北京大气颗粒物的影响研究//中国气象学会 2007年年会大气成分观测、研究与预报分会场论文集. 广州:中国气象学会, 2007.
- [ 20 ] 徐祥德,周丽,周秀骥,颜鹏,翁永辉,陶树旺,毛节泰,丁国安,卞林根. 城市大气环境重污染过程周边源影响域//推进气象科技创新加快气象事业发展——中国气象学会 2004年年会论文集(下册). 北京:中国气象学会, 2004.
- [ 21 ] 王淑兰,张远航,钟流举,李金龙,于群. 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.
- [ 22 ] 苏维,赖新云,赖胜男,古新仁,张志坚,张帅珺,黄国贤,刘苑秋. 南昌市城市空气 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 时空变异特征及其与景观格局的关系. 环境科学学报, 2017, 37(7): 2431-2439.