

DOI: 10.5846/stxb201706141086

别同, 韩立建, 田淑芳, 周伟奇, 李伟峰, 钱雨果. 人口城市化对空气污染人群暴露贡献的定量方法研究. 生态学报, 2018, 38(13): - .

Bie T, Han L J, Tian S F, Zhou W Q, Li W F, Qian Y G. Method for quantifying the contribution of urbanization on population exposure to air pollution. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): - .

人口城市化对空气污染人群暴露贡献的定量方法研究

别 同^{1,2}, 韩立建^{1*}, 田淑芳², 周伟奇¹, 李伟峰¹, 钱雨果¹

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 100085

2 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要: 短期快速城市化引发一系列生态环境问题, 尤其是近年来以细颗粒物($PM_{2.5}$)为代表的城市与区域空气污染问题。人群的污染暴露一方面是因为污染区范围的扩张, 另外一方面则归因于城市化引发的人口迁移, 目前的研究重点关注于前者的贡献, 而忽略了后者的贡献。因此, 本研究建立了城市化对空气污染人群暴露贡献的定量方法, 并选取我国 $PM_{2.5}$ 污染最为严重的京津冀城市群开展了实证研究, 通过利用 2000、2005、2010、2015 年 $PM_{2.5}$ 浓度和人口栅格数据以及人口自然增长率数据, 定量评估了城市化引发的人口迁移对空气污染人群暴露的贡献。研究结果显示: (1) 京津冀地区受污染影响面积和人口变化显著, 造成大量的人口暴露于 $PM_{2.5}$ 污染。(2) 城市化引发的人口迁移与自然增长贡献率方面: 总体上, 2000—2015 年, 京津冀城市群总的人口迁移贡献率为 48%, 北京市和天津市总的人口迁移贡献率分别为 94% 和 88%, 而河北省污染总的人口迁移贡献率为 -32%。其中在污染保持区, 北京市和天津市的人口迁移贡献率均接近 100%, 而河北省的迁移贡献率为 -26%, 尤其在 2010—2015 年, 河北省衡水市的人口迁移贡献率达到 -6613%; 在污染新增区, 北京市和天津市的人口迁移贡献率分别为 86% 和 84%, 而河北省污染的人口迁移贡献率为 -757%。本研究建立了定量化的方法揭示了城市化在空气污染人群暴露中的定量贡献, 为科学引导城市化发展提供了定量的手段, 为合理规划京津冀城市群地区的人口流动与空气污染奠定了数据基础。

关键词: 城市化; 细颗粒物($PM_{2.5}$); 空气污染人群暴露; 人口迁移贡献率

Method for quantifying the contribution of urbanization on population exposure to air pollution

BIE Tong^{1,2}, HAN Lijian^{1,*}, TIAN Shufang², ZHOU Weiqi¹, LI Weifeng¹, QIAN Yuguo¹

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

Abstract: Rapid urbanization has negative effects on the ecological environment, especially the air pollution in some areas of China, where the air has been widely polluted by the major pollutant known as fine particulate matter ($PM_{2.5}$) in recent decades. The population exposure in the contaminated area is generally due to the expansion of the contaminant's area, but is also highly attributed to the population migration caused by rapid urbanization. In this study, we established a quantitative model for evaluating the contribution of urbanization on the population exposed to air pollution, and selected the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, which has been suffering the most severe $PM_{2.5}$ pollution in China and undergoing rapid urbanization. By using $PM_{2.5}$ concentration, population raster data, and population natural growth rate data from 2000 to 2015, we quantitatively explored the contribution of urbanization on the population exposed to air pollution. The results showed that: (1) the Beijing-Tianjin-Hebei area affected by pollution and population changed significantly, resulting in a

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41590841); 国家自然科学基金面上项目(41771201); 国家重点研发计划资助(2016YFC0503004)

收稿日期: 2017-06-14; **网络出版日期:** 2018-00-00

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

large number of people exposed to $PM_{2.5}$ pollution. (2) Contribution of population migration and natural growth caused by urbanization were varied: in general, the total population migration contribution rate, which is the percentage of migrated population in the total increased population that exposed to $PM_{2.5}$ pollution, of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration was 48%, the total population migration contribution rate of Beijing and Tianjin were 94% and 88% respectively, and that of Hebei Province was -32% from 2000 to 2015. In the continuously polluted area, the contribution rates of population migration in Beijing and Tianjin were close to 100% in 2000—2015, while the contribution rate of migration in Hebei was -26%; in Hengshui City, Hebei Province, the contribution rate of population migration was -6613% in 2010—2015. In the areas into which pollution expanded, the contribution of population migration in Beijing and Tianjin were 86% and 84% respectively, while the contribution rate of population migration in Hebei province was -757% in 2000—2015. This study establishes a quantitative approach to reveal the quantitative contribution of population exposure to air pollution caused by urbanization.

Key Words: urbanization; fine particulate matter ($PM_{2.5}$); population exposure to air pollution; contribution of population migration

我国短期快速的工业化和城市化进程,在改善我们物质生活水平的同时,也给生态环境带来了一定的压力,尤其是近年来凸显的空气污染问题^[1-5]。我国目前的空气污染问题主要是以细颗粒物($PM_{2.5}$)为首要污染物的城市和区域雾霾问题。 $PM_{2.5}$ 是粒径小于 $2.5\ \mu m$ 的颗粒物,主要由于剧烈人为活动而排放的一次污染物在特定条件下形成^[6],它不仅通过改变大气能见度而影响近地表面的能量平衡,同时还会对暴露其中的人群的健康造成潜在的影响^[7-9],因此, $PM_{2.5}$ 污染在我国引起了广泛的关注。区域尺度的研究表明,城市和城市群区域是我国空气污染较为严重的区域,一方面城市及城市群区域的剧烈人为活动排放大量的空气污染物,成为区域的污染源头地,另一方面大量的农村居民受城市的各种资源优势所吸引,不断迁移进入城市,造成了大量的城市居民暴露于空气污染中。相关研究显示,根据世界卫生组织(WHO)颁布的 $PM_{2.5}$ 空气质量准则,在 2010 年,我国有 1% 的易感人群暴露于 AQG ($10\ \mu g/m^3$) 内,有 69% 的易感人群暴露于 $PM_{2.5}$ 重度污染 ($>35\ \mu g/m^3$) 中^[10]。

全球尺度的 $PM_{2.5}$ 人群暴露风险评估中,一般认为污染扩张是更多人口暴露于污染中的主要原因^[11],而在国家尺度的研究发现,我国人口暴露于 $PM_{2.5}$ 污染主要归因于城市化引发的人口迁移^[12]。对于污染较为严重的区域,例如京津冀城市群是全球污染最为严重的地区之一^[13-14],对它进行定量评估空气污染所带来的人群暴露中人口迁移和污染扩张的贡献率则保持空白。因此,本文首先建立了适用于精细的空间单元的人口迁移和污染扩张对人群暴露风险的评估模型,并选取全球污染最为严重,同时城市化发展较为迅速的京津冀城市群区域开展了实证研究。

1 基本假设与评估模型建立

城市及城市群区域人口增长主要来源于本地人口的自然增长与人口迁移,当污染区与城市及城市群区域重叠时,暴露人口的增长也将主要来源于本地人口的自然增长与人口迁移。当污染区变化时,暴露人口的变化将主要取决于本地人口的自然增长、人口迁移与污染区变化 3 个因素,从人口城市化的角度出发,我们可以将人口迁移的部分从污染区及污染变化区定量地获得,进而解析城市化对暴露人口的定量贡献,为此我们建立了假设评估模型(图 1)。

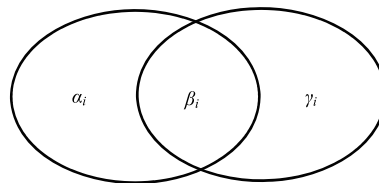


图 1 评估模型

Fig.1 Evaluation model

在针对 $PM_{2.5}$ 污染的实证研究中,根据 WHO 颁布的 $PM_{2.5}$ 空气质量准则:空气质量准则值 AQG ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、第三阶段改善标准 IT-3 ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、第二阶段改善标准 IT-2 ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、第一阶段改善标准 IT-1 ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$),我们把 $PM_{2.5}$ 浓度高于 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的区域设定为污染区,进而从污染保持区 α (一直都为 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、污染减轻区 β ($>35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 变为 $<35 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、污染新增区 γ ($<35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 变为 $>35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 得到迁移贡献率以定量捕捉城市化对人群暴露增加的贡献。同时,此模型方法还可以相应的针对其他大气污染物或者其他面源污染的问题,定量评估人口城市化对人群暴露的贡献。本研究中分别在城市群尺度和地级市尺度开展评估模型工作,力求验证此模型的可行性。

$$M_{\alpha} = \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i - z * \alpha_i}{\alpha_{i+1} - \alpha_i} \quad (1)$$

$$N_{\alpha} = 1 - M_{\alpha} \quad (2)$$

$$M_{\beta} = \frac{\beta_{i+1} - \beta_i - z * \beta_i}{\beta_{i+1} - \beta_i} \quad (3)$$

$$N_{\beta} = 1 - M_{\beta} \quad (4)$$

$$M_{\gamma} = \frac{\gamma_{i+1} - \gamma_i - z * \gamma_i}{\gamma_{i+1} - \gamma_i} \quad (5)$$

$$N_{\gamma} = 1 - M_{\gamma} \quad (6)$$

式中: α_i :污染保持区 i 时期的人口数量, β_i :污染减轻区 i 时期的人口数量, γ_i :污染新增区 i 时期的人口数量, Z :从 i 到 $i+1$ 时期的人口自然增长率, M_{α} :从 i 到 $i+1$ 时期 α 的人口迁移贡献率, M_{β} :从 i 到 $i+1$ 时期 β 的人口迁移贡献率, M_{γ} :从 i 到 $i+1$ 时期 γ 的人口迁移贡献率, N_{α} :从 i 到 $i+1$ 时期 α 的人口自然增长贡献率, N_{β} :从 i 到 $i+1$ 时期 β 的人口自然增长贡献率, N_{γ} :从 i 到 $i+1$ 时期 γ 的人口自然增长贡献率

2 研究区选择与数据预处理

本研究选取京津冀城市群为研究区域(图 2),包括北京、天津以及河北省的石家庄、衡水、沧州、廊坊、邢台、邯郸、唐山、保定、秦皇岛、承德、张家口共 13 个城市,是中国北方经济规模最大、城市化发展最快的地区。同时该区域是全球空气污染最为严重的区域之一,在环境保护部发布的 2016 中国环境状况公报中显示,京津冀地区 13 个地级以上城市空气质量平均达标天数比例为 56.8%,平均超标天数比例为 43.2%,而长三角地区和珠三角地区平均达标天数比例分别为 76.1%,89.5%,并且空气质量相对较差的前 10 位城市中,河北省占据 6 个。

2.1 $PM_{2.5}$ 数据

本研究利用美国国家航天局(NASA)的中等分辨率成像光谱仪(MODIS)、多角度成像光谱仪(MISR)和海洋观测宽视场传感器(SeaWiFS)所反演的气溶胶数据(AOD)与 GEOS-Chem 化学传输模型相结合来定量估算地面年均 $PM_{2.5}$ 浓度数据,并与地面观测 $PM_{2.5}$ 数据结合,利用地理加权回归模型获得全球 1998—2015 逐年平均卫星遥感地表 $PM_{2.5}$ 浓度^[15]。本研究利用我国京津冀边界数据裁剪得到的 2000、2005、2010、2015 年京津冀城市群的年均 $PM_{2.5}$ 数据作为 $PM_{2.5}$ 污染评估的

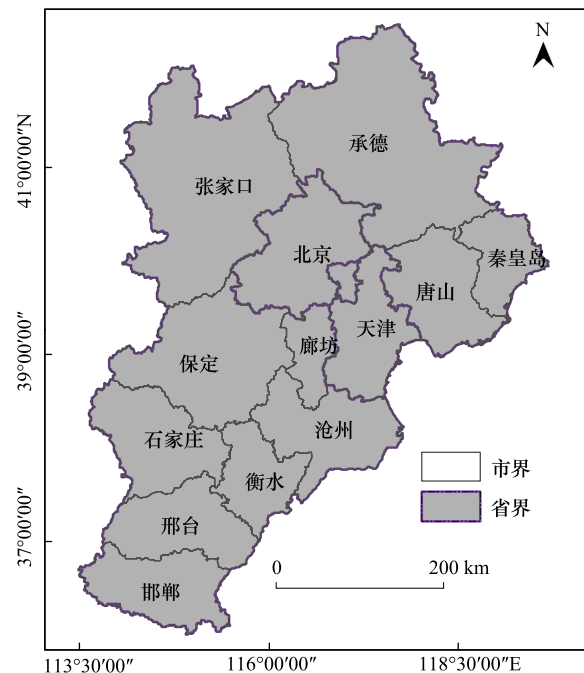


图 2 京津冀地区图

Fig.2 the reigon of Beijing-Tianjin-Hebei

数据源,空间分辨率为 1 度,在中纬度地区约为 $1\text{km}\times 1\text{km}$ 。

2.2 人口栅格数据

为了更好地表现人口的空间分布特征,美国能源部橡树岭国家实验室(ORNL)开发了的空间分辨率为 $1\text{km}\times 1\text{km}$ 的 LandScan 人口栅格数据,能快捷地在空间精细单元上评估和判断人口风险,是全球最为准确、可靠,基于地理位置的人口数据库。该数据与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据具有相同的空间分辨率,因此,本研究利用京津冀边界数据裁剪得到与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度同期 2000、2005、2010、2015 年我国京津冀城市群的人口栅格数据。

2.3 人口自然增长率

《中国城市统计年鉴》中人口自然增长率数据在地级行政级和省级行政级上统计得到,可满足本研究所需的京津冀城市群各城市的人口自然增长率数据。迁移贡献率由 1 减去人口自然增长贡献率得到。

3 主要结果与讨论

3.1 受影响区域面积变化

京津冀城市群 2000、2005、2010、2015 年 4 年的 $\text{PM}_{2.5}$ 分布变化(图 3)显示,京津冀城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度东南地区高,西北地区低,其中承德市、张家口市、秦皇岛市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低,空气质量较好,而北京市、天津市、唐山市、保定市、沧州市等 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高,空气质量较差。

京津冀城市群 2000—2005 年,2005—2010 年,2010—2015 年,2000—2015 年 4 个时段受 $\text{PM}_{2.5}$ 影响面积变化比例从城市群角度(图 4a)分析:污染新增区中,4 个时段河北省污染新增区面积比例较高,都高于 70%;污染保持区中,同样表现为河北省的面积比例较高,都高于 80%。总的来说,这是因为河北省面积在京津冀地区最大,其次它所包含的衡水、沧州、保定这类重污染型城市较多。

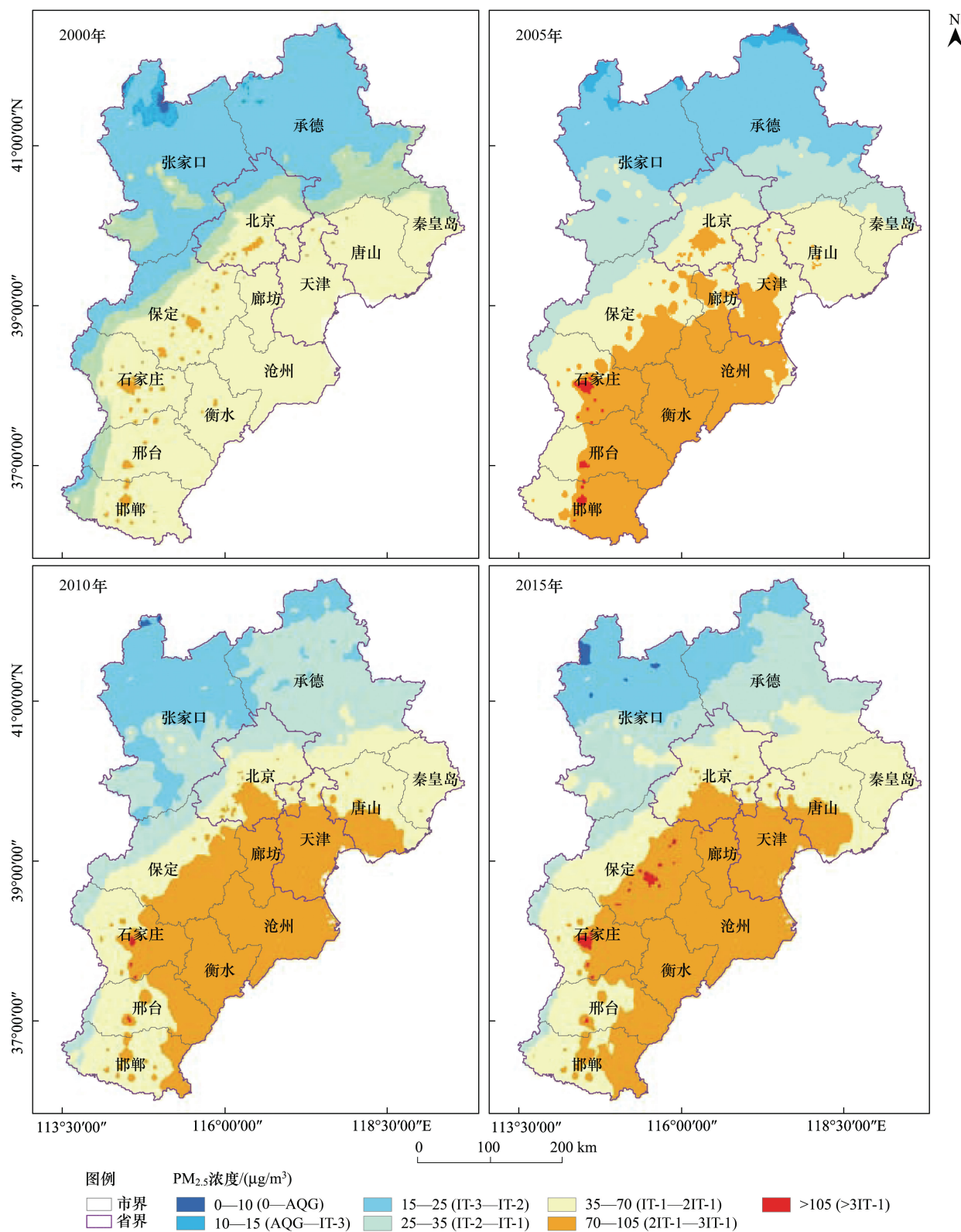
京津冀地区城市化进程明显加快,从各地级市角度(图 4b)分析:2000—2005 年,北京市、石家庄市、邢台市、邯郸市和保定市污染新增区面积比例较高,尤其保定市面积比例最高为 30%,秦皇岛市、承德市和张家口市的污染保持区面积比例较低,接近于 0;2005—2010 年,秦皇岛市和承德市的污染新增区面积比例较高,分别为 33%和 50%,承德市和张家口市的污染保持区面积比例较低,接近于 0;2010—2015 年,北京市、保定市、承德市和张家口市的污染新增区面积比例较高,尤其承德市面积比例最高为 32%,张家口市污染保持区面积比例较低,接近于 0;2000—2015 年,北京市和承德市污染新增区面积比例较高,分别为 22%和 32%,承德市和张家口市的污染保持区面积比例较低,接近于 0。

3.2 受影响人口变动情况

京津冀城市群 2000、2005、2010、2015 年人口时空分布(图 5)显示,京津冀城市群东南地区人口较集中,西北地区较分散。其中承德市、张家口市的人口较少,北京市、天津市和石家庄市的人口较多。

根据 WHO 环境空气质量标准,可将人群暴露在 $\text{PM}_{2.5}$ 分别处于 0—35,35—70,70—105,105—140 的浓度下的潜在影响分为 4 个等级:不受影响、轻度影响、中度影响、重度影响。从城市群角度(图 6a)分析京津冀城市群不同污染程度的人口比例得到:2000—2015 年,不受 $\text{PM}_{2.5}$ 潜在影响的人口比例由 12%下降到 9%,受 $\text{PM}_{2.5}$ 轻度影响的人口比例由 81%下降到 33%,而受 $\text{PM}_{2.5}$ 中度影响的人口比例有 8%上升到 54%,且上升幅度较大。2000 年,受 $\text{PM}_{2.5}$ 轻度影响的人口比例最高,为 81%,而 2005、2010、2015 年受 $\text{PM}_{2.5}$ 中度影响的人口比例均较高,都高于 50%。

从地级市角度(图 6b)分析京津冀城市群各地级市不同污染程度的人口比例,其中每个城市的 4 个数列从左到右分别表示的是 2000、2005、2010、2015 年,得到:2000 年,各地级市除承德市和张家口市,其余城市受 $\text{PM}_{2.5}$ 轻度影响的人口比例均高于 70%;2005 年,除秦皇岛市、承德市和张家口市,其余城市受 $\text{PM}_{2.5}$ 轻度影响和中度影响的人口比例较显著,尤其衡水市和沧州市受 $\text{PM}_{2.5}$ 中度影响的人口比例均高于 90%,而石家庄受 $\text{PM}_{2.5}$ 重度影响的人口比例也较显著,为 23%;2010 年,北京市、天津市、石家庄市和保定市受 $\text{PM}_{2.5}$ 中度影响的人口比例较多,尤其天津市受 $\text{PM}_{2.5}$ 中度影响人口比例高达 93%,而承德市和张家口市分别有 73%和 84%的

图3 京津冀城市群2000、2005、2010、2015年PM_{2.5}分布图Fig.3 the PM_{2.5} distribution map of Beijing-Tianjin-Hebei region in 2000,2005,2010,2015

人口比例不受PM_{2.5}影响;2015年,同样表现为北京市和天津市受PM_{2.5}中度影响的人口比例较多,分别为74%和94%,承德市和张家口市分别有51%和59%的人口比例不受PM_{2.5}影响,而石家庄市和保定市暴露出分

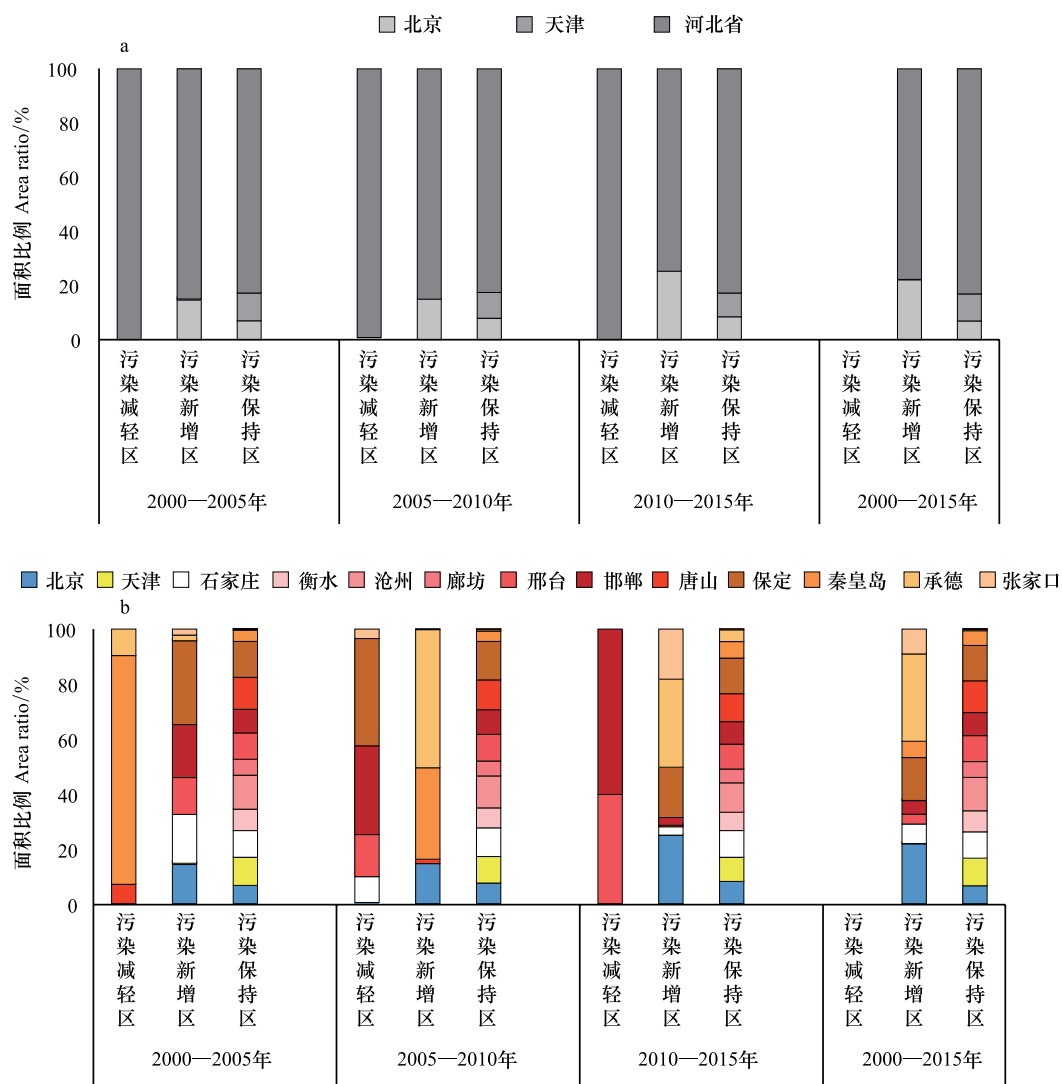


图4 北京市、天津市以及河北省及其各地级市受 $PM_{2.5}$ 影响区域面积变化比例

Fig.4 the proportion of area affected by $PM_{2.5}$ regional changes in Beijing, Tianjin and Hebei Province and its local cities

别有 21% 和 13% 的人口比例受 $PM_{2.5}$ 重度影响。

2000—2005 年石家庄市受 $PM_{2.5}$ 重度影响的人口比例显著增加,由 0 增加到 23%,衡水市人口比例由受 $PM_{2.5}$ 轻度影响全部转化为受 $PM_{2.5}$ 中度影响;2005—2010 年,北京市、天津市和石家庄市受 $PM_{2.5}$ 中度影响的人口比例不断增加,例如北京市由 57% 增加到 65%;2010—2015 年,北京市和天津市伴随总人口的增加受 $PM_{2.5}$ 中度影响的人口比例增加幅度较大。

3.3 人口迁移与自然增长贡献率

3.3.1 污染保持区人口迁移与自然增长贡献率

京津冀城市群地区污染保持区的人口迁移与自然增长贡献率如图 7 所示,2000—2015 年,北京市和天津市的污染保持区人口迁移贡献率最高,分别为 94%、88%,说明北京市和天津市的城市人口迁入较多,而河北省的人口迁移贡献率为 -26%,其中衡水市、沧州市、邢台市、邯郸市、保定市和张家口市污染保持区人口迁移贡献率也均为负值,例如衡水的迁移贡献率为 -239%,说明河北省这些地级市外迁人口较多,这可能与北京市和天津市吸纳大量人口有关。

2000—2005 年,北京市的人口迁移贡献率为 100%,说明北京市此时段污染保持区的人口基本都是由于人口迁移所导致,河北省的人口迁移贡献率较低为 36%,而衡水市和唐山市的人口迁移贡献率为负值,说明

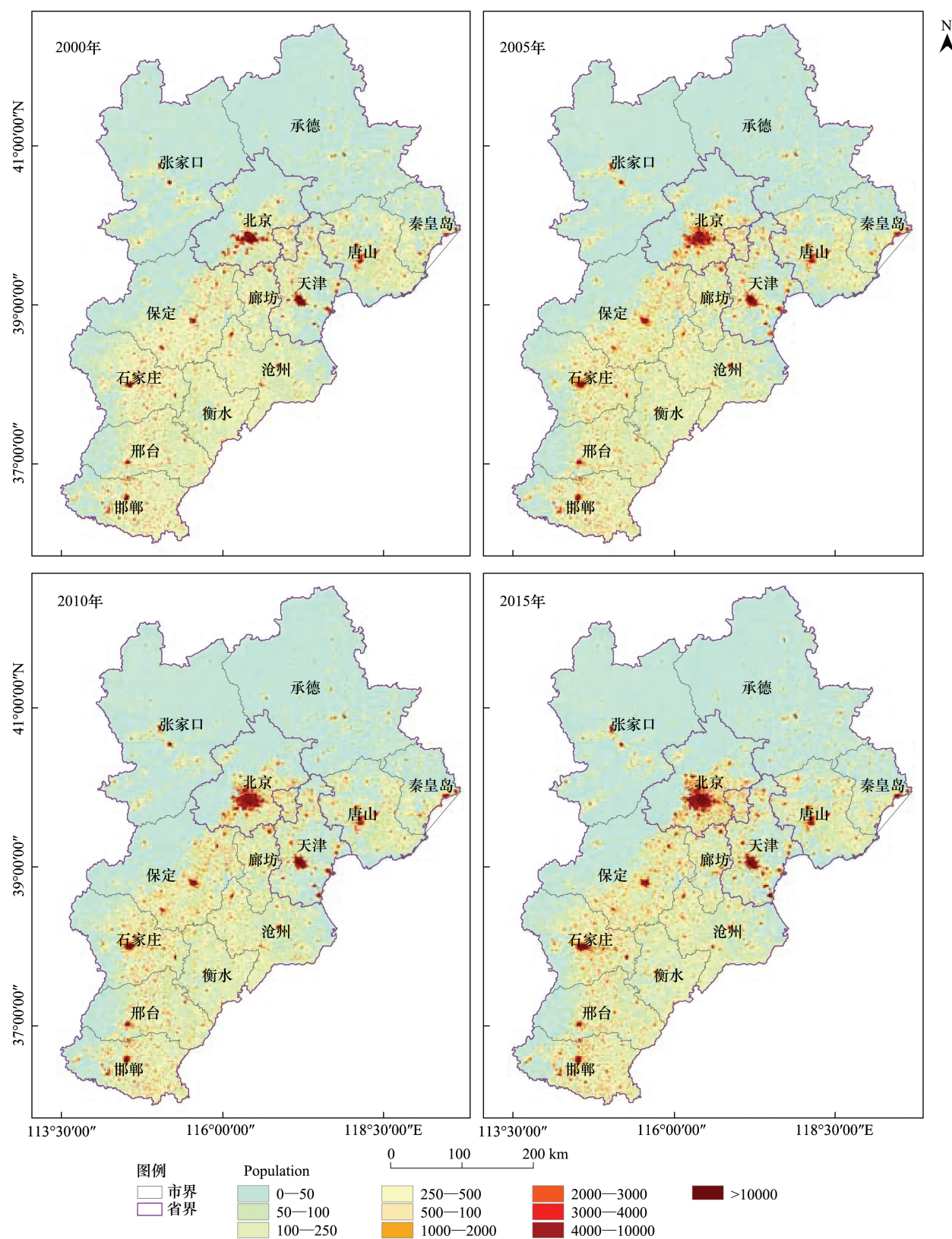


图5 京津冀城市群 2000、2005、2010、2015 年人口分布图

Fig.5 population distribution map of Beijing, Tianjin and Hebei provinces in 2000, 2005, 2010, 2015

这两个地区往外迁出人口远大于迁入人口,侧面反映出城市化的效应。2005—2010 年,北京市的人口迁移贡献率有所下降为 23%,天津市和河北省的人口迁移贡献率均为负值,分别为-10%和-139%,各地级市中,除

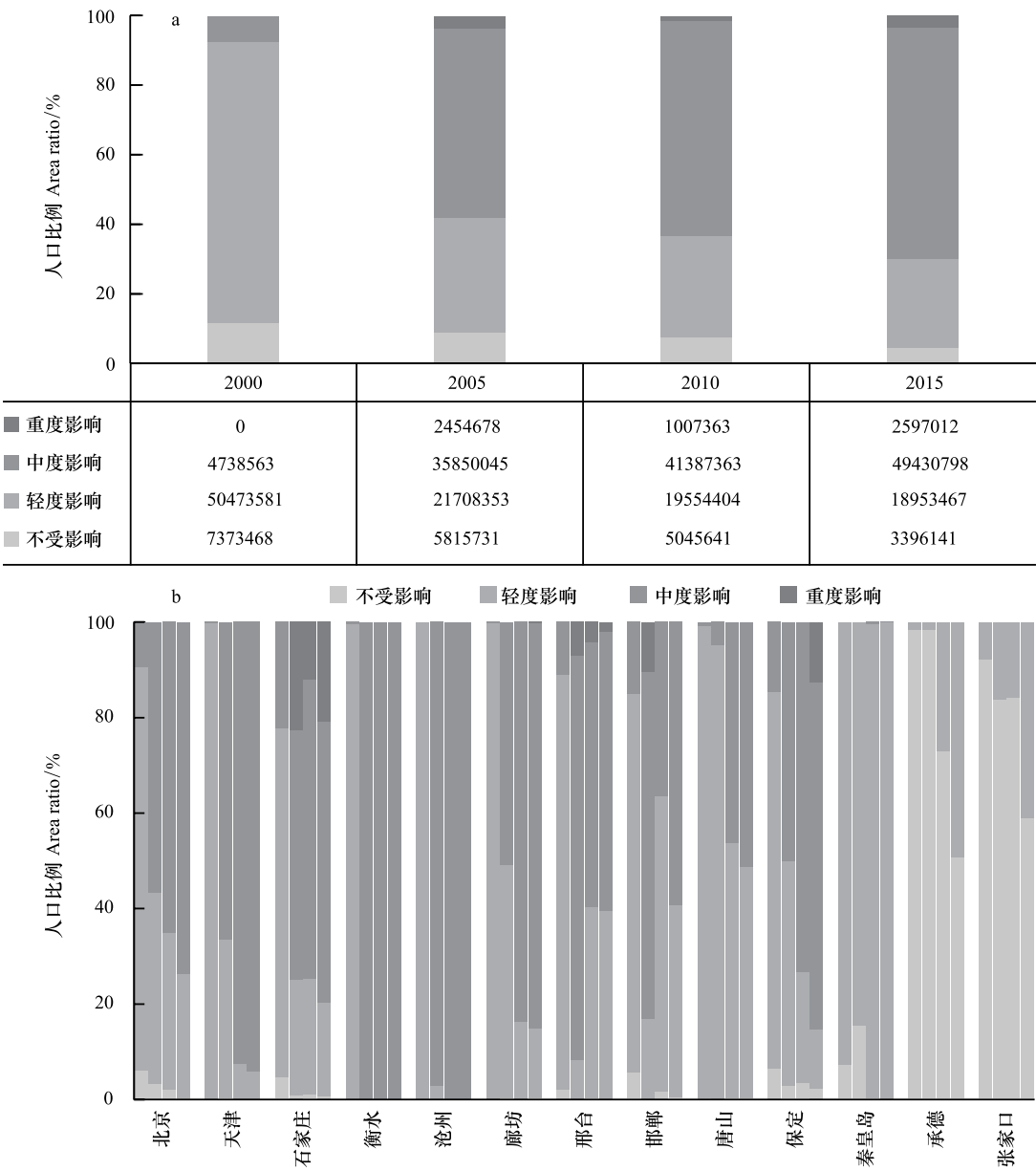


图 6 北京市、天津市以及河北省及其各地级市不同污染程度的人口比例
Fig.6 the population of different pollution levels in Beijing, Tianjin and Hebei Province and its local cities

承德市和张家口市的人口迁移贡献率为正值外,其余各地级市人口迁移贡献率均为负值,也反映出城市化的影响。2010—2015 年,北京市和天津市的人口迁移贡献率较高,分别为 93%和 95%,而河北省的人口迁移贡献率为负值,各地级市中,衡水市的人口迁移贡献率为-6613%,沧州市的人口迁移贡献率为 5861%。

3.3.2 污染新增区人口迁移与自然增长贡献率

京津冀城市群地区污染新增区迁移与自然增长贡献率如图 8 所示:2000—2015 年,北京市和天津市的人口迁移贡献率分别为 86%和 84%,而河北省人口迁移率为负值,说明河北省整体往外迁移人口居多。河北省各地级市中,石家庄市、邢台市、邯郸市和保定市人口迁移贡献率均大于 100%,说明这些地区的污染新增区的迁入人口远高于本地人口,也是城市化所造成的结果。

2000—2005 年,北京市污染新增区的人口迁移贡献率为 100%,说明北京这个时段的污染新增区的人口基本都是由于迁移所导致,河北省的迁移贡献率为 219%,说明河北省污染新增区的外来人口远高于本地人口,而邯郸市的人口迁移贡献率为-87%,往外迁出人口居多。2005—2010 年,北京市污染新增区人口迁移贡

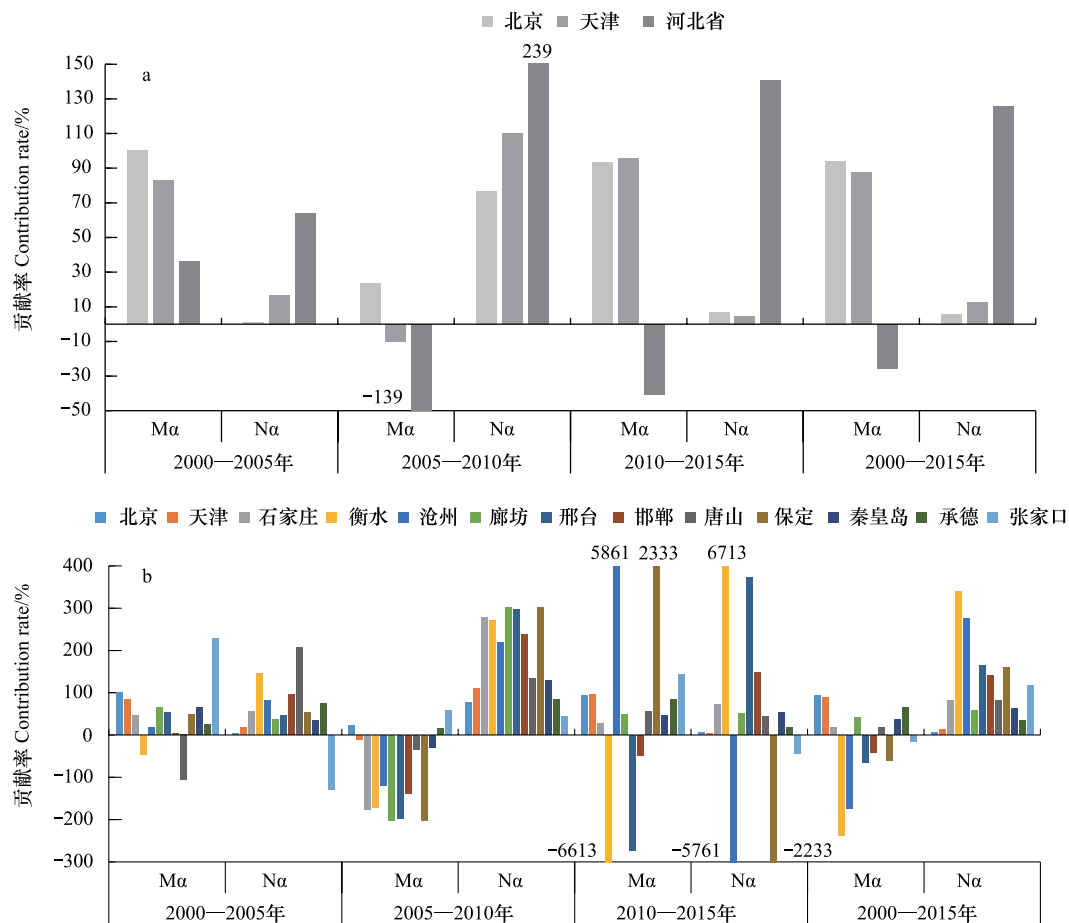


图7 北京市、天津市以及河北省及其各地级市污染保持区人口迁移(M_{α})与自然增长(N_{α})贡献率

Fig.7 Contribution of population migration (M_{α}) and natural growth (N_{α}) to population $PM_{2.5}$ exposure in the pollution conservation area in Beijing, Tianjin and Hebei Province and its local cities

图中: M_{α} :污染保持区的人口迁移贡献率, N_{α} :污染保持区的人口自然增长贡献率

献率为140%,迁入人口成为主力军,相同的情况还有河北省的唐山市和张家口市,人口迁移贡献率均大于100%。2010—2015年,北京市和河北省的污染新增区迁移贡献率分别为-17%和-57%,说明北京市和河北省污染新增区迁出人口较多,而河北省各地级市中石家庄市、邯郸市和保定市人口迁移贡献率均大于100%,这些地区的迁入人口居多,也侧面反映出城市化效应。

3.3.3 污染减轻区人口迁移与自然增长贡献率

京津冀城市群地区污染减轻区的人口迁移与自然增长贡献率如图9所示:2000—2015年,京津冀城市群没有污染减轻区,即在这个时段京津冀地区 $PM_{2.5}$ 浓度没有下降。

2000—2005年,河北省污染减轻区的人口迁移贡献率为377%,其中唐山市和秦皇岛市的人口迁移贡献率分别为138%和152%,这两个地区的迁入人口居多。2005—2010年,北京市和河北省的迁移贡献率分别为103%和197%,其中石家庄市、邯郸市、邢台市和保定市人口迁移贡献率均大于100%,这些地区污染减轻区的人口大部分也都是迁入所致。2010—2015年,河北省的人口迁移贡献率为27%,其中邢台市的人口迁移贡献率最高为97%。

3.3.4 总的人口迁移与自然增长贡献率

京津冀城市群总的人口迁移与自然增长贡献率如图10所示:2000—2015年,京津冀城市群总的人口迁移贡献率为48%,自然增长贡献率为52%,北京市和天津市的总的人口迁移贡献率分别为94%和88%,而河

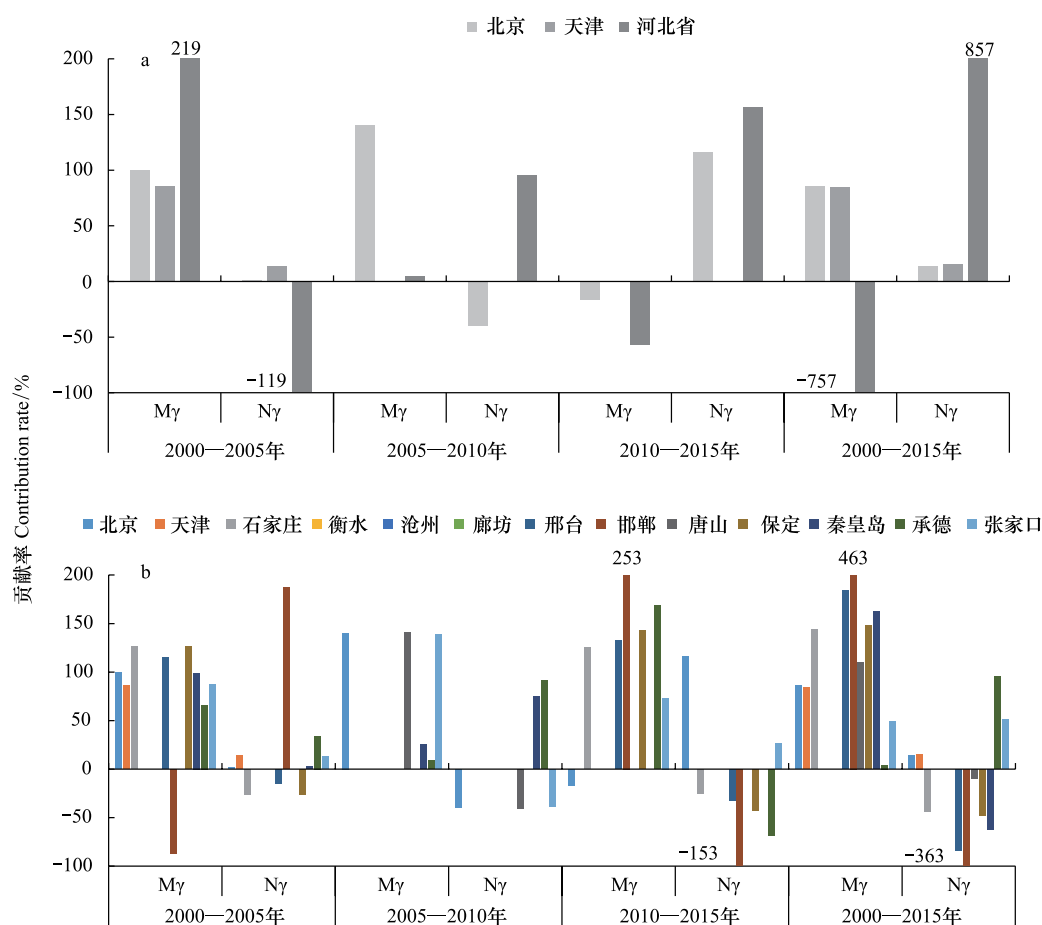


图8 北京市、天津市以及河北省及其各地级市污染新增区人口迁移(M_γ)与自然增长(N_γ)贡献率

Fig.8 Contribution of population migration (M_γ) and natural growth (N_γ) to population $PM_{2.5}$ exposure in the new district of pollution in Beijing, Tianjin and Hebei Province and its local cities

图中: M_γ :污染新增区的人口迁移贡献率, N_γ :污染新增区的人口自然增长贡献率

北省的人口迁移贡献率为负值,说明河北省外迁人口居多,是城市化所导致,其中衡水市和沧州市总的人口迁移贡献率也为负值,说明这些地区外迁人口居多,迁入人口较少。

2000—2005年,京津冀城市群地区总的人口迁移贡献率为67%,北京市和天津市总的人口迁移贡献率最高,分别为100%和83%,河北省总的迁移贡献率最低为33%。2005—2010年,京津冀城市群地区总的迁移贡献率为-96%,而北京市总的迁移贡献率为21%,天津市和河北省总的迁移贡献率均为负值,其中河北省的石家庄市、衡水市、沧州市和廊坊市等城市总的迁移贡献率也为负值,例如保定市总的迁移贡献率为-202%。2010—2015年,京津冀城市群地区总的迁移贡献率为62%,北京市和天津市总的迁移贡献率最高,分别为93%和95%,而河北省的迁移贡献率为负值,其中衡水市总的迁移贡献率达到-6613%,说明此时段衡水市往外迁出人口很多,与之相反的是沧州市和保定市,它们的迁移贡献率分别为5861%和1474%,这两个地区人口很大比例都是迁入人口所贡献的。

短期快速的城市化在促进经济发展的同时,对人群污染暴露造成一定影响,包括因污染加重和人口迁移导致导致的人群污染暴露,通常对前者的研究较易捕捉,可以从污染物绝对浓度的角度直接判定,而对于后者的研究关注较少。在空气污染方面,不同大洲,不同国家大型城市的 $PM_{2.5}$ 浓度差异较明显,且不同城市人口规模对 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献是不同的,具体表现为欧洲和北美洲的大城市 $PM_{2.5}$ 浓度均小于IT-1($35 \mu g/m^3$),而亚洲48.7%的大城市 $PM_{2.5}$ 浓度均高于IT-1($35 \mu g/m^3$),发达国家大城市空气质量要优于发展中国家;中国和

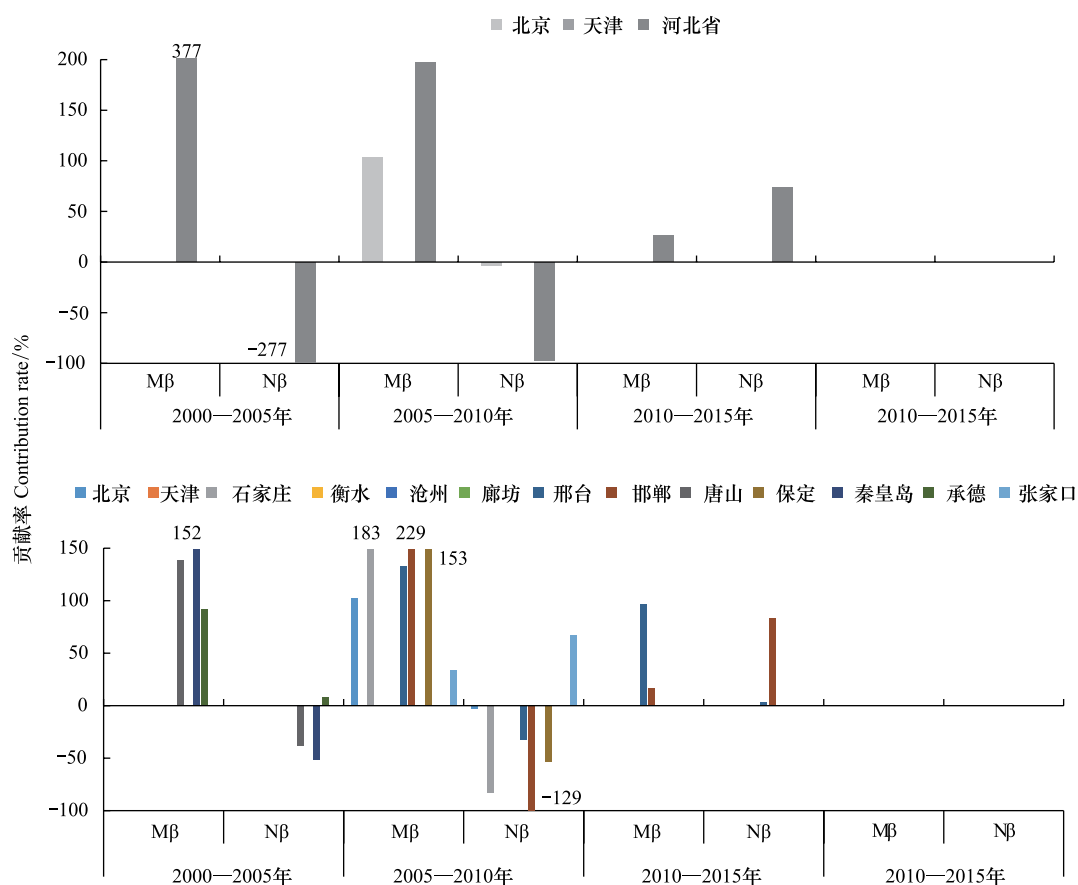


图9 北京市、天津市以及河北省及其各地级市污染减轻区人口迁移(M_{β})与自然增长(N_{β})贡献率

Fig.9 Contribution of population migration (M_{β}) and natural growth (N_{β}) to population $PM_{2.5}$ exposure in the pollution reduction area in Beijing, Tianjin and Hebei Province and its local cities

图中: M_{β} :污染减轻区的人口迁移贡献率, N_{β} :污染减轻区的人口自然增长贡献率

印度大城市人口对 $PM_{2.5}$ 浓度的潜在贡献较高,其他发达国家大城市则较低,主要原因是发达国家大力发展使用清洁能源技术以及控制污染减排等措施^[16]。在人口迁移方面,有研究显示,城乡迁移是导致大城市空气污染的重要因素^[17],但定量化的评估模型和案例分析较为有限,也较容易被忽略。因此本文建立的评估模型为开展城市化剧烈人为活动导致的生态环境问题评价提供了定量的评估案例,但是由于研究中仅从人口迁移的角度考虑,没有考虑城市化引起的污染浓度加重的情况,因此其评估结果在本案例区一定程度上低估了城市化对人群 $PM_{2.5}$ 污染暴露的贡献。研究采用多尺度研究,以像元为基础,在地级行政级和省级行政级研究尺度上选择年际尺度为 2000、2005、2010、2015 年这 4 年来开展城市化对人群暴露贡献的定量研究,进而可说明大区域 $PM_{2.5}$ 与人口变化的空间异质性特征,因此,可为在城市群尺度和地级市尺度上对城市化与空气污染关系的研究中提供思路,为空气格局与城市发展战略决策提供生态环境变化的科学依据。

本研究在受影响区域面积变化中,分析了 $PM_{2.5}$ 空间和年变化特征,未考虑 $PM_{2.5}$ 浓度季变化或者月变化特征。有些研究表明北京地区秋冬季 $PM_{2.5}$ 浓度高于春夏季,主要受采暖燃煤影响^[18-19];而有些研究从不同站点考虑得到北京市交通站 $PM_{2.5}$ 浓度最高,其次是城区站和郊区站^[20]。在定量分析人群暴露贡献中,选择的人口自然增长率数据是以地级市为单元,没有考虑到其空间异质性,例城区、郊区和农村区域人口自然增长率会有较大差异。

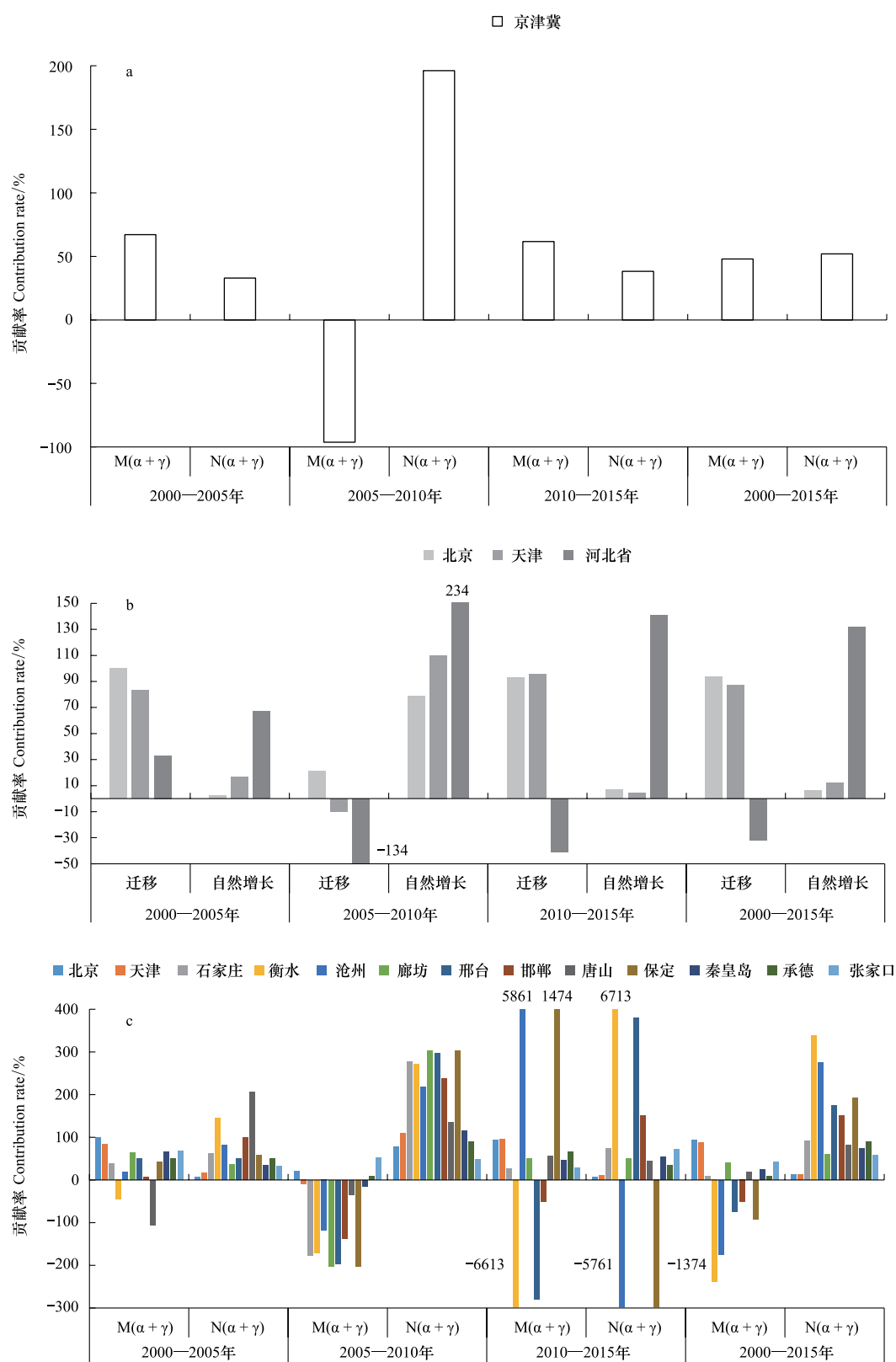


图 10 北京市、天津市以及河北省及其各地级市京津冀各地级市总人口迁移 ($M_{(\alpha+\gamma)}$) 与自然增长 ($N_{(\alpha+\gamma)}$) 贡献率

Fig.10 Contribution of total population migration ($M_{(\alpha+\gamma)}$) and natural growth ($N_{(\alpha+\gamma)}$) to population $PM_{2.5}$ exposure contribution rate in Beijing, Tianjin and Hebei Province and its local cities

图中: $M_{(\alpha+\gamma)}$: 污染减轻区的人口迁移贡献率, $N_{(\alpha+\gamma)}$: 污染减轻区的人口自然增长贡献率

4 结论

为有效评估城市化对空气污染人群暴露贡献,我们建立了城市化对空气污染人群暴露贡献的定量方法,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、人口栅格数据验证模型的可行性,进而得到以下结论:

(1)研究所建立的评估模型具有可行性:城市化对人群污染暴露评估模型可以有效地定量解析城市人口自然增长和迁移对人口污染暴露的定量贡献,为开展城市化引起人群环境污染暴露提供了量化的评估方法。

(2)京津冀城市群人口迁移和污染变化较大,造成其 $PM_{2.5}$ 污染保持区、污染新增区的人口迁移与自然增长对 $PM_{2.5}$ 暴露总人口的贡献率空间差异显著。具体表现为:

1) 污染保持区中,2000—2015 年,北京市和天津市的人口迁移贡献率分别为 94% 和 88%,而河北省的人口迁移贡献率为-26%,其中衡水市、沧州市、邢台市、邯郸市、保定市和张家口市人口迁移贡献率也均为负值,说明这些地区往外迁出人口较多,这都是由城市化导致的。

2) 污染新增区中,2000—2015 年,北京市和天津市的人口迁移贡献率分别为 86% 和 84%,而河北省人口迁移率为-757%,其中石家庄市、邢台市、邯郸市和保定市迁移贡献率均大于 100%,说明这些地区的污染新增区的迁入人口远高于本地人口,也是城市化所造成的结果。

3) 总的迁移贡献率中,2000—2015 年,京津冀城市群总的人口迁移贡献率为 48%,北京市和天津市总的人口迁移贡献率分别为 94%、88%,河北省总的人口迁移贡献率为-32%,其中衡水市和沧州市总的人口迁移贡献率也为负值,说明这些地区外迁人口居多,迁入人口较少。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 莫莉,余新晓,赵阳,孙丰宾,莫楠,夏洪磊.北京市区域城市化程度与颗粒物污染的相关性分析. *生态环境学报*, 2014, 23(5): 806-811.
- [4] 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, (10): 49-50.
- [5] Xu D D, Dan M, Song Y, Chai Z F, Zhuang G S. Concentration characteristics of extractable organohalogens in $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Beijing, China. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(22): 4119-4128.
- [6] 孙玉伟,周学华,袁琦,马强,周声圳,徐政,马玉洁.济南市秋末冬初大气颗粒物和气体污染物污染水平及来源. *环境科学研究*, 2012, 25(3): 245-252.
- [7] 石华东.室内空气 $PM_{2.5}$ 污染的国内研究现状及综合防控措施. *环境科学与管理*, 2012, 37(6): 111-114.
- [8] Cao J J, Xu H M, Xu Q, Chen B H, Kan H D. Fine particulate matter constituents and cardiopulmonary mortality in a heavily polluted Chinese city. *Environmental Health Perspectives*, 2012, 120(3): 373-378.
- [9] Tie X X, Wu D, Brasseur G. Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guangzhou, China. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(14): 2375-2377.
- [10] 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.
- [11] vanDonkelaar A, Martin R V, Brauer M, Boys B L. Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter. *Environmental Health Perspectives*, 2015, 123(2): 135-143.
- [12] He C Y, Han L J, Zhang R Q. More than 500 million Chinese urban residents (14% of the global urban population) are imperiled by fine particulate hazard. *Environmental Pollution*, 2016, 218: 558-562.
- [13] 王跃思,张军科,王莉莉,胡波,唐贵谦,刘子锐,孙扬,吉东生.京津冀区域大气霾污染研究意义、现状及展望. *地球科学进展*, 2014, 29(3): 388-396.
- [14] 王庚辰,王普才.中国 $PM_{2.5}$ 污染现状及其对人体健康的危害. *科技导报*, 2014, 32(26): 72-78.

- [15] 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.
- [16] Han L J, Zhou W Q, Pickett S T A, Li W F, Li L. An optimum city size? The scaling relationship for urban population and fine particulate ($PM_{2.5}$) concentration. *Environmental Pollution*, 2016, 208: 96-101.
- [17] Shen H Z, Tao S, Chen Y L, Ciais P, Güneralp B, Ru M Y, Zhong Q R, Yun X, Zhu X, Huang T B, Tao W, Chen Y C, Li B G, Wang X L, Liu W X, Liu J F, Zhao S Q. Urbanization-induced population migration has reduced ambient $PM_{2.5}$ concentrations in China. *Science Advances*, 2017, 3(7): e1700300.
- [18] 王嫣然, 张学霞, 赵静瑶, 姜群鸥. 2013—2014 年北京地区 $PM_{2.5}$ 时空分布规律及其与植被覆盖度关系的研究. *生态环境学报*, 2016, 25(1): 103-111.
- [19] 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.
- [20] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 2013 年北京市 $PM_{2.5}$ 的时空分布. *地理学报*, 2015, 70(1): 110-120.