

# 北京地区大气污染物源区特征及 与重污染过程的关系

邹青青<sup>1</sup> 蔡旭晖<sup>1,†</sup> 郭梦婷<sup>1</sup> 宋宇<sup>1</sup> 张小玲<sup>2</sup>

1. 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京大学环境科学与工程学院环境科学系, 北京 100871;

2. 京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089; † 通信作者, E-mail: xhcai@pku.edu.cn

**摘要** 探讨影响北京市区的大气污染潜在源区(印痕)。采用 WRF 气象模式, 对北京地区的气象场进行 15 年(2000—2014 年)长期模拟分析。利用印痕模式, 计算 15 年的逐时印痕分布, 统计分析污染物源区的多年平均特性和季节变化。根据空气污染指数 API, 筛选 13 年(2000—2012 年)秋冬季的实际重污染事例, 统计分析其与污染物源区的关系。结果表明: 1) 逐日平均印痕的形态和分布变化极大, 说明影响北京的污染物源区是随时间而动态变化的; 2) 多年平均的污染物源区大致呈三角形分布, 偏西南的一角最强, 另外一角偏东, 一角大致偏北, 北京处于三角形中心以北的位置; 3) 源区多年的平均形态和分布随季节变化, 夏秋季(7 月和 10 月)偏南和西南方向的源区范围扩大; 4) 根据局地风向频率来判断污染物来源方向是不可靠的, 印痕模式包含污染物累积等过程和机制, 可以获得合理的污染物源区; 5) 实际重污染过程与其平均印痕的关系显示, 西南方向从石家庄到北京, 再往东到唐山这一宽阔山前弧形地带是影响北京大气的最重要污染物源区。

**关键词** 污染物源区; 印痕; 多年平均; 重污染; 北京

**中图分类号** X131; X16

## Long-term Mean Footprint and Its Relationship to Heavy Air Pollution Episodes in Beijing

ZOU Qingqing<sup>1</sup>, CAI Xuhui<sup>1,†</sup>, GUO Mengting<sup>1</sup>, SONG Yu<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoling<sup>2</sup>

1. State Joint Key Lab of Environmental Simulation and Pollution Control, Department of Environmental Sciences, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871; 2. Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing 100089; † Corresponding author, E-mail: xhcai@pku.edu.cn

**Abstract** Potential source area (footprint) related to air pollution of Beijing is investigated. Long-term modeling of meteorological fields is carried out by WRF model, from 2000 to 2014. A backward dispersion footprint model is used to derive hourly footprint using these meteorological data. Long-term mean source area is obtained as well as its seasonal variation. Heavy air pollution episodes in winter and autumn are selected from air pollution index (API) data in the period from 2000 to 2012. Relationship between air pollution and its potential source area is discussed. Results show that daily mean footprint varies both by its pattern and direction, indicating strong temporal variation of the source areas for Beijing. Long-term mean source area for Beijing is shaped like a triangle, and the southwest branch is the strongest, the other two are in the east and north. Beijing locates in the middle to norther position of the triangle. Seasonal variation of the mean source area show enhancement in the southwest and south in summer (July) and autumn (October). Local wind frequency may mislead assessment of source area, in comparison to the footprint derived by the backward dispersion model. By handling all dispersion processes, such as accumulation of air borne materials, the footprint model provides reasonable information of source area. Mean

北京科学技术委员会首都蓝天行动培育专项(Z141100001014013)、国家科技支撑计划(2014BAC06B02)、国家自然科学基金(41421064, 41575007, 91544216)和环境保护公益性行业科研专项(201509001, 201409001)资助

收稿日期: 2016-12-31; 修回日期: 2017-03-15; 网络出版日期: 2017-07-28

footprint of all heavy air pollution episodes reveals that a wide arc zone in front of the mountains is the most significant source area to air pollution of Beijing. This zone starts approximately from Shijiazhuang in the southwest to Beijing, and then turning to Tangshan in the east.

**Key words** source area; footprint; long-term mean; heavy air pollution; Beijing

近年来,京津冀地区多次发生重污染事件,如 2013 年 1 月影响广泛的污染过程<sup>[1]</sup>,2014 年 2 月北京连续多日的空气污染橙色预警<sup>[2]</sup>,以及 2015 年 12 月北京的首次空气污染红色预警。许多学者对该区域大气传统污染物(如 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub>)的特征及变化进行了分析<sup>[3-6]</sup>,一些研究注意到气象条件在重污染天气的形成、持续与减弱等过程中的作用<sup>[7-9]</sup>,另一些研究试图探讨气候变化、大气边界层过程和区域污染输送等因素对大气污染的影响<sup>[10-12]</sup>。

在针对大气污染过程的研究中,对污染物源区/源地的分析非常重要。由于大气的流动性,污染过程不仅与当地的源排放有关,而且与远处的污染源有关。北京地处华北平原北端,其南部平原地区城市和人口密集;西部和北部为太行山脉和燕山山脉,人类活动的影响相对较小。这种地理格局也决定了污染源的分布。相对而言,气象条件的变化更为复杂,使得大气污染的来源区域也在不断变化中。这里的“来源区域”一词存在两种语义:一是潜在影响源区(即 footprint, 印痕区域);二是潜在影响源区内的实际排放源,正是这些排放源对污染浓度有实际的贡献<sup>[13]</sup>。由于实际排放源的位置相对固定,原则上只需要找出印痕区域,就可以判断影响当地污染物浓度的源区范围。本文以下所称“源区”皆指潜在影响源区或印痕区域。

为了获得污染物的源区信息,经常使用反向轨迹方法,应用最广泛的是 HYSPLIT 模式<sup>[14-15]</sup>。在反向轨迹方法的基础上,进一步发展了浓度加权轨迹分析等方法<sup>[16-18]</sup>,但这些方法只能获得定性的结果。印痕法可以从接受点的角度,定量地分析源区贡献<sup>[19]</sup>。根据关心的物理量不同,分为通量印痕法和浓度印痕法。早期的应用研究集中在通量印痕法,与环境问题关系更密切的浓度印痕法的应用研究开展较晚,国际上应用较多的是 FLEXPART 模式<sup>[20-21]</sup>。

北京地区受天气过程和局地中尺度环流影响,污染物的扩散输送有区域性特征,但未见从接受点角度对污染物源区进行过系统分析。本文以北京市区为污染物浓度受体点,使用北京大学自主研发的

印痕分析模式,进行浓度印痕计算,统计分析污染物源区的多年平均特性,并利用实际监测的空气污染指数,分析重污染过程与源区分布的关系。

## 1 研究方法

### 1.1 印痕模式简介

本研究采用北京大学开发的印痕模式<sup>[22-24]</sup>,模拟计算大气污染的潜在影响源区。采用拉格朗日随机粒子反向扩散模式计算印痕函数。对应于北京城区中心的位置、30 m 接收高度和每日逐时的接收时段,释放大量随机粒子,并跟踪它们在过去时间方向上的运动情况(反向扩散),记录每个粒子在近地面的滞留时间,从而获得每日逐时的印痕函数。有关印痕模式计算的原理可参见文献<sup>[13]</sup>。该模式经过严格的理论探讨和验证<sup>[22-23]</sup>,并应用于高原复杂地形、北京地区和淮河流域的大气环境个例分析<sup>[24-26]</sup>。

### 1.2 气象模式

印痕模式的计算需要用区域气象场和大气边界层湍流参数作为驱动。本研究使用 WRF (Weather Research and Forecasting Model) 模式进行模拟分析,以获得所需的气象场。WRF 模式是美国环境预测中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)开发的中尺度气象预报系统,广泛应用于气象与环境过程的研究中。本研究中模式的设置情况如下:水平方向为两层套网格,外层网格数为 130×115,网格距为 15 km,内层网格数为 100×120,网格距为 5 km;内外模式区域的中心经纬度分别为 116.38°E, 38.78°N 和 116.38°E, 39.90°N;垂直方向不等距地分为 28 层(从地面至 100 hPa),其中 2 km 以下的低层大气划分为 9 层,以便充分地反映大气边界层特征。利用 NCEP/FNL 全球格点分析资料,为模式提供初始场和时变的侧边界条件(每 6 小时更新)。内层网格不使用积云对流方案,其他参数配置与外层网格采用同样的物理选项:YSU 边界层方案、Kain-Fritsch 积云方案、GFDL 长波辐射和 Dudhia 短波辐射方案、WSM 6 微物理方案以及 Noah 陆面模式。为了获得长期模拟结果,采用分段作业方式,每段积分时间为 84 小时,其中模式开始运行后的

12 小时作为模式调整时间(spin-up)。每个时段的模拟获得 3 天的逐小时输出结果, 最终获得 2000—2014 年(共 15 年)的逐时模拟结果。印痕计算中用到模式输出的逐网格风速、边界层高度、摩擦速度和 Obukhov 长度。风速用于计算反向扩散粒子的平移运动, 其他物理量用于参数化边界层湍流脉动速度<sup>[27]</sup>, 进而用于计算和分析粒子的湍流扩散运动。

### 1.3 数据资料

本文所用数据资料包括: 1) 美国国家环境预测中心提供的 FNL 全球分析资料, 水平分辨率为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ , 时间间隔为 6 小时, 覆盖整个模拟时段, 该数据为 WRF 模式提供初始条件和边界条件; 2) 中国环境保护部数据中心提供的 2000—2012 年(共 13 年)日均 API 指数资料, 包括逐日空气污染指数、首要

污染物和空气质量级别。

## 2 结果与分析

### 2.1 日平均印痕类型

将逐时印痕结果进行简单平均, 获得日平均印痕, 其物理意义是周围不同地点的单位点源对接受点的全天平均潜在浓度贡献率<sup>[19]</sup>。根据分布方向和形态, 可以将日平均印痕粗略地分为 4 种类型: 偏北分布型、本地中心型、偏南分布型和多方向分布型, 各类型个例见图 1。可以看出, 不同日期的印痕分布变化极大, 充分说明影响北京的污染物源区是随时间动态变化的。对 2005, 2008, 2011 和 2014 年的日平均印痕类型进行人工分析和统计, 结果显示, 上述 4 种印痕出现的频率分别为 11%~

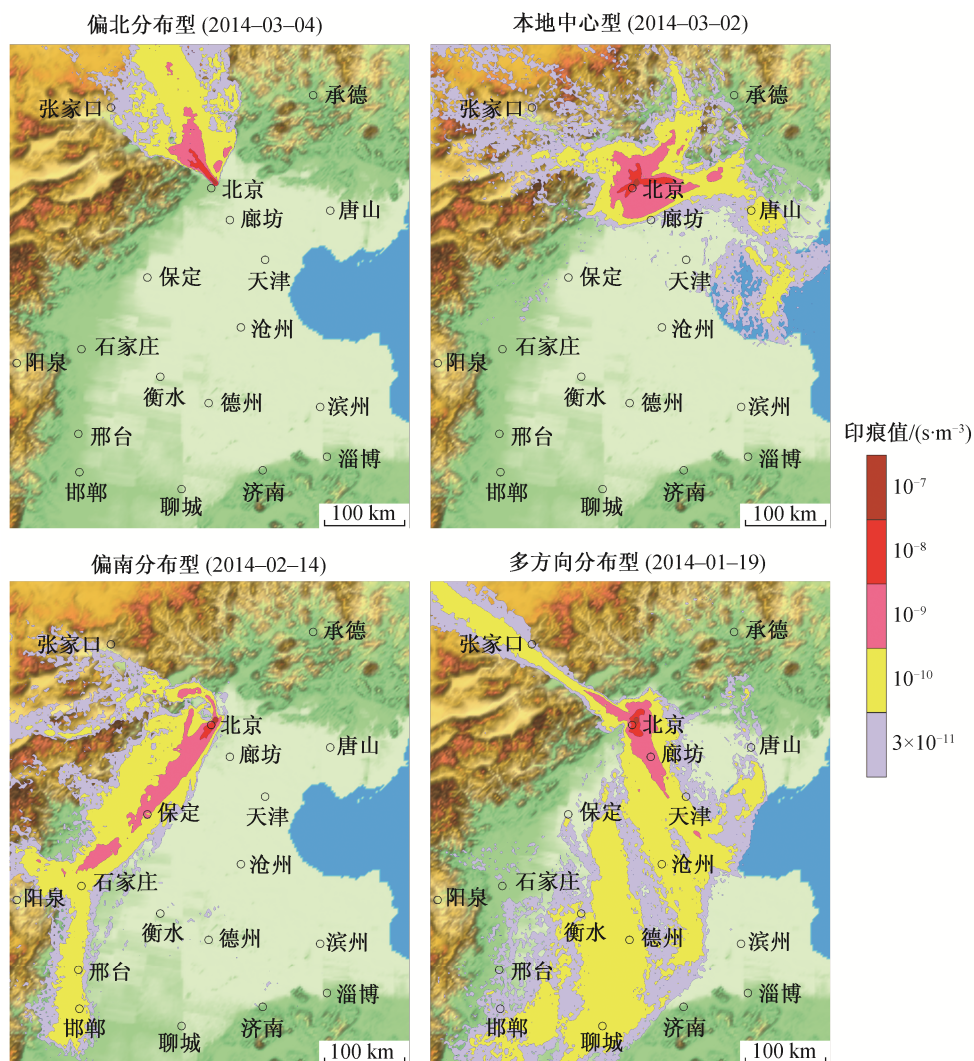


图 1 日平均印痕各类型个例  
Fig. 1 Typical cases of daily mean footprint

25%, 37%~45%, 22%~34%和 8%~25%, 表明不同类型印痕在不同年份的出现频率也有较大的变化。从总体上看, 本地中心型和偏南分布型出现最多。

### 2.2 多年平均印痕及季节变化

将日均印痕按月、年和多年情况进行平均, 获得15年总体平均印痕及各季节代表月份的平均结果, 示于图 2 和 3。

从图 2 可见, 高印痕值范围(印痕值大于  $10^{-9}$   $\text{s}/\text{m}^3$ )以北京为中心, 分布的方向性不强, 可见在多年平均意义上, 北京周边地区对北京污染物的贡献水平相似。从印痕值为  $10^{-10}$  和  $3 \times 10^{-11}$   $\text{s}/\text{m}^3$  的曲线范围来看, 最突出的特点是向西南方向的大幅度延伸, 指向保定和石家庄一带。另一个较突出的延伸方向是东部。北部则大致沿密云、赤城和延庆 3 个

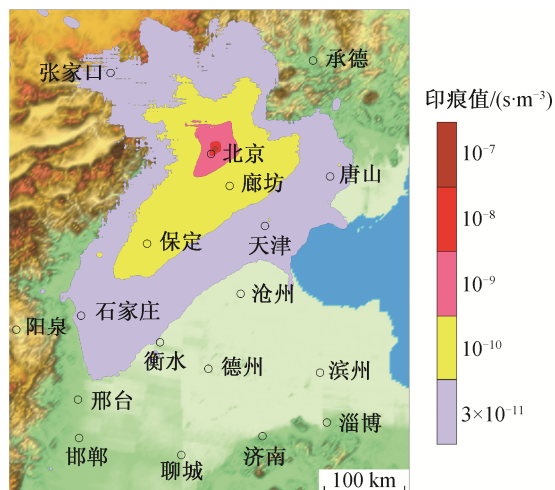


图 2 多年平均印痕分布(2000—2014 年)  
Fig. 2 Annual mean footprint distribution (2000–2014)

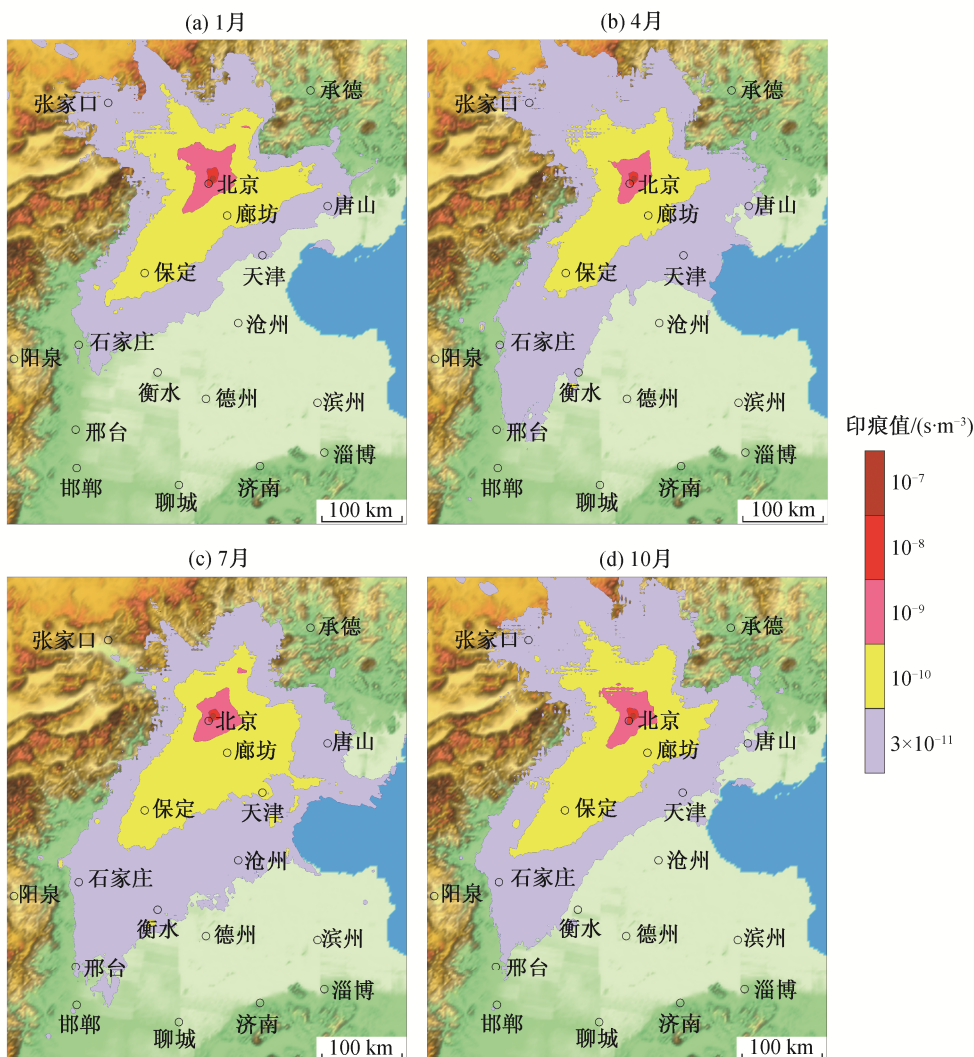


图 3 平均印痕的季节变化(2000—2014 年平均)  
Fig. 3 Seasonal variation of mean footprint (the average from 2000 to 2014)

山口方向形成较弱的延伸路径。总体而言,北京地区的影响源区大致呈不对称的三角形分布,从偏东到西南的两角间构成一个宽阔的影响带,偏北的影响区则较小。可以看到,平均印痕分布与地形走势吻合良好,且大部分影响区域正好落在实际排放源较多的平原地区。这可定性解释北京市大气污染的实际排放来源。

图3显示,各季节平均印痕的分布形态略有调整,但变化不大。冬春季(1月和4月)西南和偏东方向的源区有所收窄,偏北的源区略有扩大。夏季(7月),偏北的源区大幅度缩小,西南方向延伸,东南方向大幅度增宽,印痕值为 $10^{-10}$  s/m<sup>3</sup>的等值线

范围扩展到天津滨海一带。秋季(10月),北面的印痕区域恢复,东南方向的印痕区域宽度减小,但西南方向的印痕区域却有所扩大,使这一方向的源区显得更为集中、突出。

### 2.3 风向频率与平均源区的关系

图2和3显示一个有意思的结果:无论从年平均还是从各季节看,污染源区最重要的特征都是向西南方向的延伸,与北京地区的实际风向频率分布相悖。北京冬季盛行偏北风,夏季盛行偏南风,春季和秋季为过渡季节<sup>[28]</sup>。为考察WRF模式对实际情况的反映能力,提取模拟结果中对应于北京市区格点的逐时风向、风速值进行长年统计,结果见

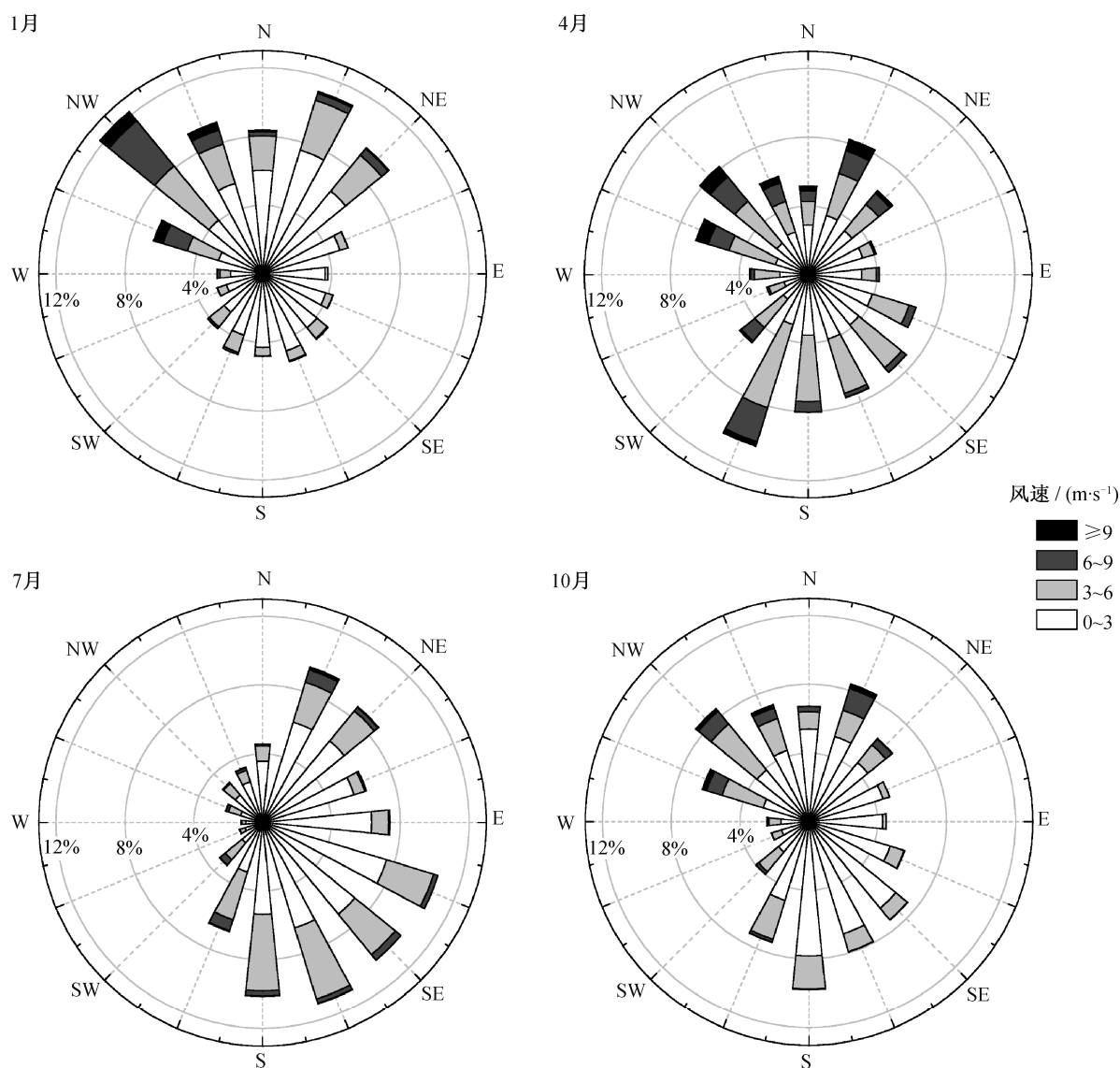


图4 从WRF模式中提取的北京市区风向频率分布(2000—2014年)

Fig. 4 Wind frequency distribution in urban Beijing from WRF model (2000–2014)

图 4。显然, 冬季(1 月)以偏北风为主, 风向 NW-N-NE 的频率在 50% 以上; 夏季(7 月)转为偏南风, 其中偏东南风向频率较高, 风向 SSE-SE-ESE 的频率占 30% 左右。进一步地, 将 WRF 模拟的风速和风向频率月均值与测站的实际气候统计值相比较, 二者一致性良好(图略), 说明 WRF 模拟结果很好地反映了北京地区的风向、风速气候特征。

图 4 中风向频率与印痕分布不一致, 反映了局地气象资料在分析大气污染过程中的局限性。因为大气污染物的输送扩散过程实质上是时空变化的拉格朗日过程, 不仅与当地风向、风速等气象条件有关, 还取决于其输送扩散路径上不同时刻的气象条件。分析 1 月印痕和风向频率的分布可以看出, 图 3(a)中向北伸展的印痕区域与图 4(a)中高频率的偏北风是一致的。但是, 北京地区冬季偏北风往往受北方冷空气天气系统的影响, 风速较大, 扩散条件好, 反映在印痕分布上则是向北的伸展范围有限, 表示北方远处的污染物源区对北京的影响小。相反, 图 4(a)显示从偏东到西南各方向的风向频率数值都较小, 且变化不大, 印痕分布却出现偏东和西南两个优势延伸方向。这表明, 偏东和西南两个方向的污染物排放进入空气后, 在输送到北京的途中气象条件有利于浓度累积, 从而对北京有更大的浓度贡献。这一结果从侧面说明本文印痕分析工作的重要意义。

### 2.4 重污染天气的源区特征

对北京市 2000—2012 年的空气污染指数 API 进行分析, 发现秋冬季重污染事件发生频率较高。由于从 API 值定义的重污染事件可能存在偏差<sup>[29]</sup>, 本文统一取每年秋冬半年(9—12 月和 1—2 月)API 值最高的 10% 日期(共 18 天)作为重污染事件日(将一年中秋冬半年的 API 值从大到小排序, 取前 18 天)。考虑到污染持续时间越长, 往往对应污染程度越重, 进一步将这些重污染日划分为持续 1, 2, ..., 5 天的事件。有关这些事件的统计特征见图 5 和 6, 这些事件的总体特征如下。

1) 持续日数越长, 重污染个例数越少。如 13 年中持续 1 和 2 天的个例分别为 86 和 39 组(共 164 天), 持续 3~5 天的有 19 组(共 70 天)。

2) 各年重污染的时间持续性变化很大。有些年份主要为持续 1 天的情况, 如 2000 和 2012 年。一般年份持续 2 天的重污染大约出现 3~4 组; 持续 3 天以上的个例较少, 每年最多出现 1~2 组; 持续 5 天的重污染仅 2 组, 出现在 2001 和 2005 年。

3) 平均 API 值随污染持续日数的增加而明显增加。

对持续 1~5 天的重污染事件, 分别求其平均印痕, 结果见图 7。可以看出, 持续 1~3 天的源区, 其西南分支都是最宽的; 随着持续时间增加, 偏北的源区总体缩小, 但是偏东方向明显扩大, 使  $10^{-10}$

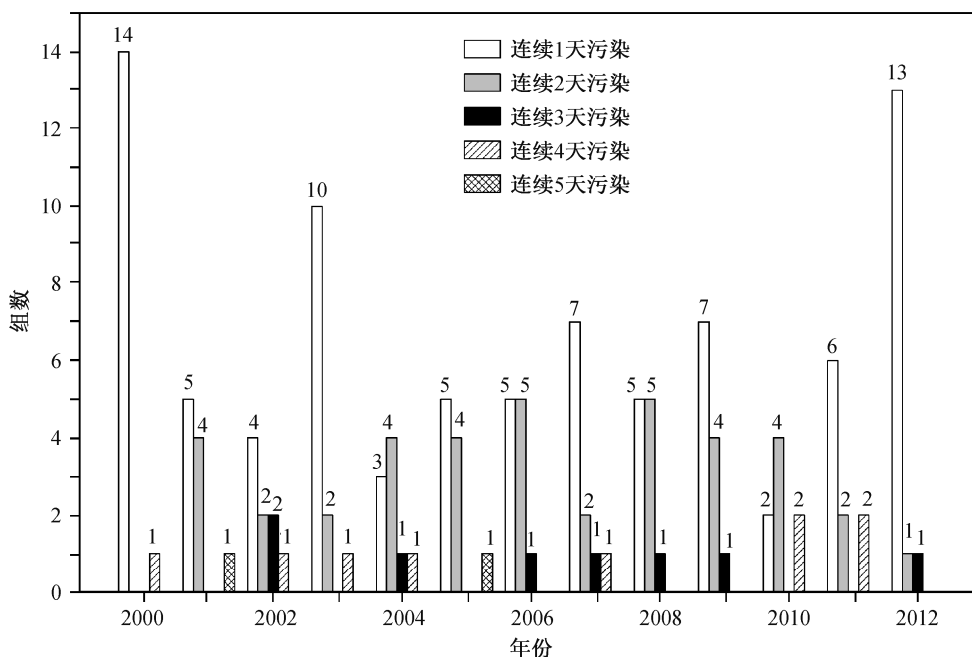


图 5 2000—2012 年连续重污染组数统计

Fig. 5 Heavy air pollution episodes in different consecutive days from 2000 to 2012

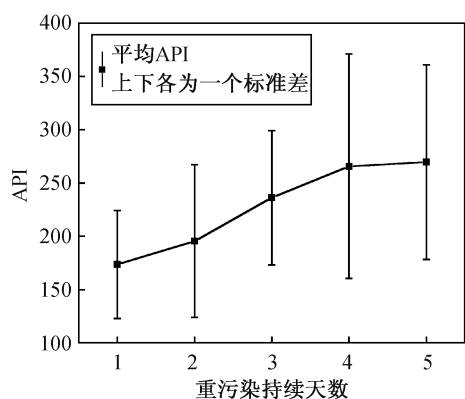


图 6 不同连续天数重污染事件的平均 API 值与标准差  
Fig. 6 Average API and standard deviation for heavy air pollution episodes with different consecutive days

$s/m^3$  印痕范围越过唐山一带(图 7(c)); 另外, 持续 3 天的重污染事件显示为  $10^{-9} s/m^3$  的印痕范围明显增大, 说明气象条件更有利于污染物的累积。持续 4 天和 5 天的严重污染类型, 其源区形态有进一步的变化, 偏北方向的影响减弱, 西南方向的分支伸长, 有越过石家庄向邢台和邯郸延伸的趋势。当然, 由于持续 5 天的重污染事件个个数较少, 进行统计平均后, 图中印痕区域的形状相对不规则。

将图 7 与长期平均印痕(图 2)进行比较, 可见重污染对应的印痕区域向西南方向的延伸更远、更宽, 并且越是持续的重污染, 其印痕范围越是向西南方向伸展。另一方面, 印痕的数值也相对较大, 说明大气的污染累积作用更强。这一结果令人鼓

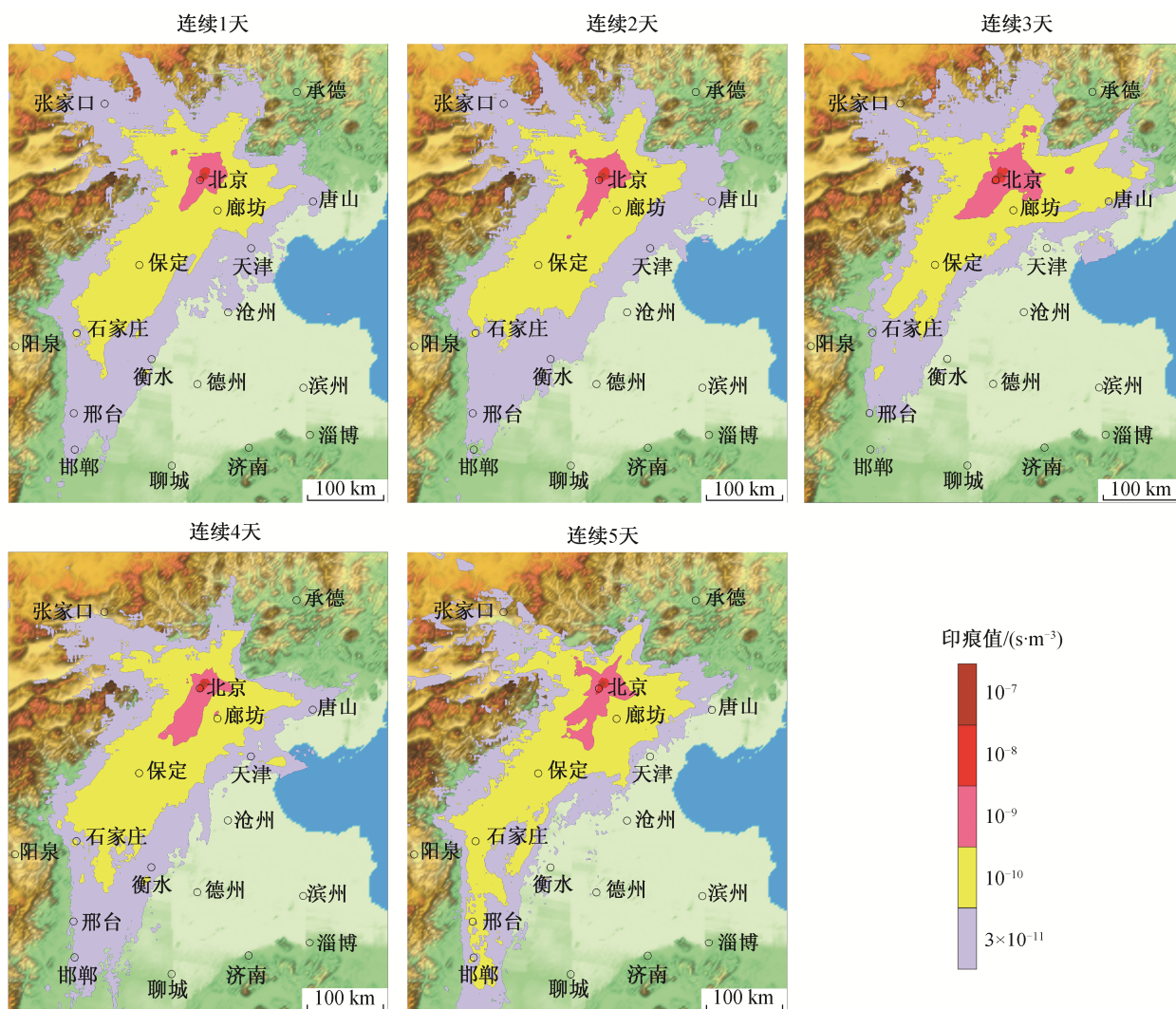


图 7 连续 1~5 天的重污染类型平均印痕分布(2000—2012 年)  
Fig. 7 Mean footprint distribution of heavy air pollution episodes with 1 to 5 consecutive days (2000–2012)

舞。前面对长期平均印痕分布形态的分析只说明西南方向可能对北京的污染浓度有重要贡献(潜在源区),然而,此处实际重污染事例对应的印痕则证实这些区域的确对北京的污染有重要影响。此前,有关北京地区重污染的个例分析已显示西南方向源区的重要性<sup>[25]</sup>,并推测这一情况可能具有普遍性。由于图 7 反映的是 13 年间所有重污染个例的统计平均值,因此证实了这种普遍性。

如前所述,分析实际污染事例的潜在源区,实际影响源区也包含其中。联系到该地区山地-平原的分布格局以及污染物排放平原地区较多、山地较少的事实,可以认为北京地区重污染的实际影响源区大致分布于从西南方向的石家庄-衡水,经保定到北京-廊坊,再往东指向唐山这样一个宽阔的山前弧形地带。

### 3 总结与结论

本文探讨北京市区大气污染潜在源区(印痕)的多年平均分布和季节变化特征,并结合长期监测的空气污染指数 API,分析重污染过程与源区分布的关系。使用 WRF 气象模式,模拟分析研究区 2000—2014 年的逐时气象场,用自主开发的印痕模式计算逐时印痕分布。对 15 年的印痕结果进行统计平均,筛选 2000—2012 年秋冬季的重污染事例,统计其与污染源区的关系。主要结论如下。

1) 逐日平均印痕的形态和分布变化极大,说明影响北京的污染物源区是随时间动态变化的。

2) 15 年长期平均的污染影响源区以北京为中心,大致呈三角形分布,一角偏东,一角大致偏北,偏西南的一角最强。平均源区的形态和分布随季节有所变化,夏秋季(7 月和 10 月)偏南和西南方向的源区扩大。

3) 印痕计算的源区分布与根据局地风向频率直观判断的结果不一致。冬季偏北风向频率远高于其他风向,但西南和偏东仍然是主要源区方向。说明污染过程不仅受到局地气象条件影响,也与源区到受体点的输送扩散路径和过程(污染累积等)密切相关。

4) 13 年(2000—2012 年)实际重污染事件对应的平均印痕突显了西南和偏东方向的源区分布。结合实际污染源分布特点,可以判断西南方向从石家庄到北京,再往东到唐山的这一宽阔山前弧形地带是影响北京大气最重要的污染物源区。

### 参考文献

- [1] 王跃思,姚利,刘子锐,等. 京津冀大气霾污染及控制策略思考. 中国科学院院刊, 2013, 28(3): 353-363
- [2] 许万智,赵凤生,张寅超,等. 北京市区秋季气溶胶粒子浓度与特性参数的观测研究. 安全与环境学报, 2014, 14(1): 267-272
- [3] 郑晓霞,李令军,赵文吉,等. 京津冀地区大气 NO<sub>2</sub> 污染特征研究. 生态环境学报, 2014, 23(12): 1938-1945
- [4] 邹宇飞,吴其重,王自发,等. 河北工业面源更新及其对奥运会期间京津冀区域空气质量模拟的影响. 气候与环境研究, 2010, 15(5): 624-635
- [5] Li Y, An J, Min M, et al. Impacts of HONO sources on the air quality in Beijing, Tianjin and Hebei Province of China. Atmospheric Environment, 2011, 45(27): 4735-4744
- [6] Li Y, An J, Kajino M, et al. Impacts of additional HONO sources on concentrations and deposition of NO<sub>y</sub> in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China // EGU General Assembly Conference Abstracts. Vienna, 2015, 17: 36-42
- [7] 张小曳,孙俊英,王亚强,等. 我国雾-霾成因及其治理的思考. 科学通报, 2013, 58(13): 1178-1187
- [8] Wang C. Weather characteristics of regional air pollution during heating period in Beijing-Tianjin-Hebei Region. Meteorological Science & Technology, 2010, 38(6): 689-694
- [9] 王跃思,姚利,王莉莉,等. 2013 年元月我国中东部地区强霾污染成因分析. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(1): 15-26
- [10] 王喜全,杨婷,王自发. 灰霾污染的跨控制区影响: 一次京津冀与东北地区灰霾污染个案分析. 气候与环境研究, 2011, 16(6): 690-696
- [11] Miao Y, Hu X, Liu S, et al. Seasonal variation of local atmospheric circulations and boundary layer structure in the Beijing-Tianjin-Hebei region and implications for air quality. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2015, 7(10): 1602-1626
- [12] 马锋敏. 北京及周边地区典型大气污染过程的数值模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007
- [13] 蔡旭晖. 湍流微气象观测的印痕分析方法及其应用拓展. 大气科学, 2008, 32(1): 123-132
- [14] Shan W, Yin Y, Lu H, et al. A meteorological analysis of ozone episodes using HYSPLIT model and surface data. Atmospheric Research, 2009, 93(4): 767-776

- [15] Yerramilli A, Dodla V B R, Challa V S, et al. An integrated WRF/HYSPLIT modeling approach for the assessment of PM<sub>2.5</sub> source regions over the Mississippi Gulf Coast region. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2012, 5(4): 401–412
- [16] Dimitriou K, Remoundaki E, Mantas E, et al. Spatial distribution of source areas of PM<sub>2.5</sub>, by Concentration Weighted Trajectory (CWT) model applied in PM<sub>2.5</sub> concentration and composition data. *Atmospheric Environment*, 2015, 116: 138–145
- [17] Dimitriou K. The dependence of PM size distribution from meteorology and local-regional contributions, in Valencia (Spain) — a CWT model approach. *Aerosol & Air Quality Research*, 2015, 15(5): 1979–1989
- [18] Liao T, Wang S, Ai J, et al. Heavy pollution episodes, transport pathways and potential sources of PM<sub>2.5</sub> during the winter of 2013 in Chengdu (China). *Science of the Total Environment*, 2017, 584/585: 1056–1065
- [19] Schmid H P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2002, 113: 159–183
- [20] Stohl A, Forster C, Frank A, et al. Technical note: the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2005, 5(9): 2461–2474
- [21] Stohl A, Hittenberger M, Wotawa G. Validation of the lagrangian particle dispersion model FLEXPART against large-scale tracer experiment data. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(24): 4245–4264
- [22] Cai X, Leclerc M Y. Forward-in-time and backward-in-time dispersion in the convective boundary layer: the concentration footprint. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 123(2): 201–218
- [23] Cai X, Peng G, Guo X, et al. Evaluation of backward and forward Lagrangian footprint models in the surface layer. *Theoretical and Applied Climatology*, 2008, 93(3): 207–223
- [24] Cai X, Song Y, Zhu T, et al. Glacier winds in the Rongbuk valley, north of Mount Everest: 2. Their role in vertical exchange processes. *J Geophys Res*, 2007, 112: D11102
- [25] 蔡旭晖, 丑景垚, 宋宇, 等. 北京市大气静稳型重污染的印痕分析. *北京大学学报(自然科学版)*, 2008, 44(1): 135–141
- [26] 徐春萌, 蔡旭晖, 宋宇. 淮河流域重点城市大气污染源区特征的印痕分析. *北京大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(5): 812–820
- [27] Hanna S R. Applications in air pollution modeling // Nieuwstadt F T M, Dop H V. *Atmospheric turbulence and air pollution modelling*. Berlin: Springer, 1984: 275–310
- [28] 北京市气象局. *北京气候志*. 北京: 北京出版社, 1987: 69–77
- [29] Andrews S Q. Inconsistencies in air quality metrics: “Blue Sky” days and PM<sub>10</sub> concentrations in Beijing. *Environmental Research Letters*, 2008, 3(3): 034009