

花丛,刘超,张恒德,等,2017. 京津冀地区冬半年污染传输特征及传输指数的改进[J]. 气象,43(7):813-822.

京津冀地区冬半年污染传输特征 及传输指数的改进^{*}

花 丛 刘 超 张恒德 江 琪

国家气象中心,北京 100081

提 要: 文章通过轨迹聚类、潜在源区分析等方法对京津冀地区冬半年污染物传输特征进行了分析,在此基础上对传输指数的构建方法进行了改进,并结合一次重污染天气过程分析了其作用。结果表明,对于北京、天津和石家庄,其重污染轨迹出现概率从高到低均为偏南路径、偏西路径、偏东路径和西北路径;在近地面高度上,西南和东南风的增强在大多时候成为北京的污染物传输通道,其中东南方向的污染物来源主要集中在大气低层;改进后的传输指数能够更好地反映外来传输作用对本地污染物浓度的影响,京津冀及周边地区的传输作用对北京、天津和石家庄等大城市的污染物浓度影响较明显,其中城郊及周边地区的近距离传输影响最为显著;合理应用传输指数可以对重污染天气的成因进行初步判断。

关键词: 污染物传输,后向轨迹,中、低空风场,传输指数

中图分类号: X16

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.07.005

Characteristics of Air Pollutant Transport over Beijing-Tianjin-Hebei Region During Winter Months and Improvement of Transport Weather Index

HUA Cong LIU Chao ZHANG Hengde JIANG Qi

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Trajectory clustering analysis and potential source contribution function (PSCF) analysis are applied for the characteristics of air pollutant transport in China's Beijing-Tianjin-Hebei Region during winter months, and the construction of transport index is improved. On this basis, a heavy air pollution process is used to investigate the effect of transport index. The results show that the probabilities of heavy pollution weather with air masses coming from south, west, east and northwest direction are descending for Beijing, Tianjin and Shijiazhuang. In the surface level, the enhancement of southwesterly and southeasterly wind becomes the main path of air pollutants to Beijing in most time, and the southeastern source of pollutants are mainly concentrated in the lower atmosphere. The improved transport index has a better ability to describe the relationships between air pollutant transports and local $PM_{2.5}$ concentration. The inter-regional transport has an obvious influence on the $PM_{2.5}$ concentration in Beijing, Tianjin and Shijiazhuang, and short-distant transport from suburbs and surrounding areas has the most significant impact. Therefore, a reasonable application of transport index is useful in making a preliminary judgment on the causes of heavily polluted weather.

Key words: air pollutant transport, back trajectory, low-middle level wind, transport index

^{*} 气象预报预测业务与科研结合专项(CMAHX20160601)、科技部国家重点研发计划项目(2016YFC0203301)和国家科技支撑计划项目(2014BAC16B02)共同资助

2016年12月6日收稿; 2017年4月20日收修定稿

第一作者:花丛,主要从事短期天气预报和环境气象工作. Email:floweronly@163.com

引 言

近年来,随我国城市化进程的发展,区域性大气环境问题逐渐凸显,以细颗粒物($PM_{2.5}$)为特征污染物的大气污染问题已严重影响到人民群众的身体健康和社会经济的可持续发展。其中,京津冀地区人口密度大,经济发展迅速,加之秋冬季静稳天气多发,大气污染问题尤其受到关注。已有研究指出,大气污染呈现典型的区域性特征,经济发达地区排放源之间的污染扩散、混合或大城市之间的羽流影响效应,构成区域性大范围污染扩散现象(徐祥德, 2002),风场、排放源及光化学反应也对污染物传输有一定影响(Li et al, 2016)。因此,深入了解区域污染传输特征,为大气污染联防联控提供科学依据,成为研究热点之一(任阵海和苏福庆, 1998)。

部分学者(苏福庆等, 2004a; 2004b; Zhang et al, 2016)利用天气学分析的方法,对影响我国华北地区的几种典型重污染天气型结构及其对区域污染影响进行了解析。张志刚等(2004)使用二维欧拉统计模式,模拟了京津冀地区 SO_2 、 SO_4^{2-} 和 PM_{10} 等污染物的远距离输送和沉降过程,指出北京大气环境中 20% 的 PM_{10} 及 23% 左右的 SO_2 都来自北京周边地区。随着空气质量模式的发展,更多学者开始借助数值模式对污染物输送进行量化模拟和计算。如安俊岭等(2012)利用 WRF-CAMx 模式,定量给出了北京、天津和河北四季大气边界层中 6 种大气污染物的跨界输送通量;何心河等(2016)利用 WRF-Chem 模拟了京津冀地区一次重污染过程,指出南风输送对太行山脚的污染物积累有一定作用。此外,轨迹聚类 and 污染物潜在源区分析方法也在研究污染物输送方面发挥了越来越多的作用(徐祥德等, 2004; Baker, 2010; Zhu et al, 2011; Feng et al, 2014; Wang et al, 2015)。在此基础上,部分学者利用传输轨迹及相关因子构建了客观预报指数,从而实现对污染物传输的量化分析(张磊等, 2013; 花丛等, 2016),并通过典型个例证明传输指数对重污染过程的划分有一定参考意义(霍彦峰等, 2017)。

为进一步加深对京津冀地区污染传输特征的了解,并在此基础上总结有效的客观预报方法,本文以 2014—2016 年冬半年京津冀主要大城市北京、天津和石家庄作为研究对象,对其污染传输特征进行了分析,并在前期研究的基础上对传输指数进行了改进。

1 资料和方法

本文所用 $PM_{2.5}$ 监测数据来源于全国城市空气质量实时发布平台 (<http://113.108.142.147:20035/emcpublish/>)。选取北京、天津和石家庄城区国控点(表 1)监测数据,分别取平均值代表三个城市空气质量状况。气象数据来源于中国气象局地面及探空观测资料。其中秒探空资料为 L 波段探空系统提供的秒级探空数据,具有较高的垂直分辨率,可以提供气温、相对湿度及风矢量等要素信息,在详细描述大气层结特征方面具有优于常规探空的劣势。

表 1 北京、天津和石家庄城区环境监测站点选取情况

Table 1 Environmental monitoring stations in Beijing, Tianjin and Shijiazhuang

城市	北京	天津	石家庄
	万柳	北辰科技园	职工医院
	奥体中心	宾水西道	西南高教
	古城	南口路	世纪公园
	官园	勤俭路	人民会堂
站点	东四	大直沽八号路	化工学校
	农展馆	前进路	高新区
	万寿西宫	跃进路	
	天坛	航天路	
		津沽路	

在进行气团轨迹模拟及聚类、PSCF 分析时,使用到了 TrajStat 软件(Wang et al, 2009)。其中,轨迹模拟采用 NCEP 全球资料同化系统 GDAS (Global Data Assimilation System) 提供的 $1^\circ \times 1^\circ$ 分析场资料作为初始场;轨迹聚类采用角度聚类法,即以轨迹间角度差最大作为聚类标准。

PSCF (potential source contribution function) 方法即潜在源区贡献法,可结合气团轨迹及污染物阈值给出可能的排放源位置,从而用于污染物源地统计(Biegalski and Hopke, 2004)。PSCF 表征经过某一区域的气团到达观测点时对应的要素值超过设定阈值的条件概率。本文结合京津冀地区冬半年大气污染实际情况,设定当 $PM_{2.5}$ 浓度 $> 150 \mu g \cdot m^{-3}$ 时,该轨迹为重污染轨迹。取 $30^\circ \sim 60^\circ N$ 、 $80^\circ \sim 130^\circ E$ 的区域作为研究范围,将其划分为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的网格。经过网格 (i, j) 的重污染轨迹数为 m_{ij} , 总轨迹数为 n_{ij} , PSCF 表达式如式(1)所示。为

避免 n_{ij} 较小的网格出现高 $PSCF_{ij}$, 通过经验权重函数 $W(n_{ij})$ 对其进行降误差处理(王爱平等, 2014), 表达式如式(2)所示。其中 n_{ave} 为网格的平均轨迹端点数。经统计, 本文中北京、天津和石家庄 n_{ave} 均取为 2。

$$PSCF_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \cdot W(n_{ij}) \quad (1)$$

$$W(n_{ij}) = \begin{cases} 1.00, & 3n_{ave} < n_{ij} \\ 0.70, & 1.5n_{ave} < n_{ij} \leq 3n_{ave} \\ 0.40, & n_{ave} < n_{ij} \leq 1.5n_{ave} \\ 0.17, & n_{ij} \leq n_{ave} \end{cases} \quad (2)$$

2 传输特征分析

利用 TrajStat 软件模拟 2014—2016 年冬半年(2014 年 10 月至 2015 年 3 月和 2015 年 10 月至 2016 年 3 月)北京(39.80°N、116.47°E)、天津(39.08°N、117.07°E)和石家庄(38.03°N、114.42°E)的逐 6 h 气团后向轨迹, 365 d 共产生 1460 条轨迹; 每条轨迹模拟时长 24 h, 时间分辨率为 1 h。为体现近地层传输特征, 同时减少地面摩擦影响, 模拟起始高度选为 500 m。采用聚类分析方法对轨迹进行分类, 每个城市得到 4 条主要传输路径, 如图 1 所示。

由图 1 可见, 由于地理位置较为接近, 三个城市容易受到相似天气系统的影响。除京津冀区域外, 影响气团主要途经周边内蒙古、山西、陕西、河南和山东等省(自治区)。模拟轨迹均可聚类为 4 条主要路径: 偏西路径、西北路径、偏东路径及偏南路径。其中, 西北路径(聚类 3)的主要影响系统是南下的蒙古高压, 轨迹最长, 表明气团移动速度快, 在途经下垫面停留时间相对较短, 与当地气团混合作用相对较弱。结合表 2~表 4 的统计结果可以看出, 对

于三个城市该路径平均 $PM_{2.5}$ 浓度最低, 重污染轨迹出现概率最小, 为典型清洁路径。

偏西路径(聚类 2)为在相对平直西风带系统引导下的气团移动轨迹, 其长度较西北路径偏短, 表明气团移动速度相对较慢, 对应的冷空气活动较弱, 对污染物的清除能力较差。此外, 对于北京和天津, 偏西路径经过内蒙古中部, 在合适的天气系统配合下可受到沙尘天气的影响, 从而导致 $PM_{2.5}$ 浓度的升高; 对于石家庄, 偏西路径经过山西中北部, 该区域工业较为密集, $PM_{2.5}$ 源排放强度大(图略), 气团在移动过程中通过混合作用携带了较高浓度的 $PM_{2.5}$ 粒子。因此, 上述三个城市偏西路径的平均 $PM_{2.5}$ 浓度均大于 $100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 为重污染轨迹出现概率第二高的传输路径。

对北京、天津和石家庄来说, 重污染轨迹出现概率最高的均为偏南路径(聚类 1), 重污染轨迹平均 $PM_{2.5}$ 浓度分别高达 241.1 、 210.8 和 $251.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(环境保护部, 2016), 均达到重度污染级别。偏南路径在 4 条主要聚类路径中长度最短, 表明大气中、低层无明显影响系统活动, 天气形势静稳度高, 气团移动速度缓慢。此外, 该路径主要经过河北中南部高排放强度地区, 通过与下垫面的交换作用携带高浓度 $PM_{2.5}$ 粒子, 因此输送作用明显。当偏南路径出现时, 北京、天津和石家庄出现重污染的概率分别高达 46.9%、32.9% 和 44.3%。

偏东路径(聚类 4)一般为西北路径气团进入河北北部后东折影响北京、天津和石家庄等地。由于河北北部下垫面排放强度较小, 气团相对清洁; 东折后经过的河北中东部为高排放区, 然而该段路径较短, 故混合进入气团的污染物有限。

通过以上分析可以看出, 对于北京、天津和石家庄, 其重污染轨迹出现概率从高到低均为偏南路径、

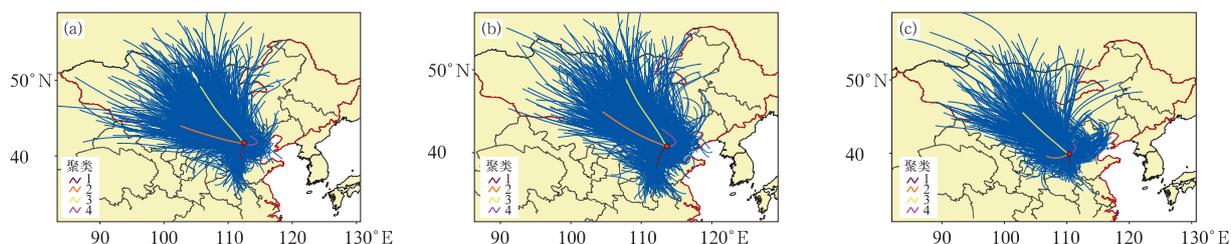


图 1 2014—2016 年冬半年(a)北京、(b)天津和(c)石家庄 24 h 后向轨迹分析及聚类结果

Fig. 1 The 24 h back trajectory clustering analysis in (a) Beijing, (b) Tianjin and (c) Shijiazhuang during 2014—2016 winter months

表 2 北京聚类分析统计结果

Table 2 Statistics of clustering analysis in Beijing

聚类	轨迹数	平均 $\text{PM}_{2.5}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	重污染轨迹数	重污染轨迹平均 $\text{PM}_{2.5}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	重污染轨迹出现概率/%
1	271	162.2	127	241.1	46.9
2	486	127.9	151	261.5	31.1
3	613	41.9	34	265.9	5.6
4	70	90.7	14	236.9	20.0
合计	1440	95.9	326	252.9	22.6

表 3 同表 2, 但为天津

Table 3 Same as Table 2, but for Tianjin

聚类	轨迹数	平均 $\text{PM}_{2.5}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	重污染轨迹数	重污染轨迹平均 $\text{PM}_{2.5}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	重污染轨迹出现概率/%
1	453	128.8	149	210.8	32.9
2	372	103.1	81	246.8	21.8
3	288	67.1	30	212.2	10.4
4	342	47.6	28	211.5	8.2
合计	1455	90.9	288	221.2	19.8

表 4 同表 2, 但为石家庄

Table 4 Same as Table 2, but for Shijiazhuang

聚类	轨迹数	平均 $\text{PM}_{2.5}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	重污染轨迹数	重污染轨迹平均 $\text{PM}_{2.5}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	重污染轨迹出现概率/%
1	210	165.2	93	251.3	44.3
2	484	108.6	136	223.4	28.1
3	583	91.7	111	261.6	19.0
4	179	148.8	69	249.4	38.6
合计	1456	114.9	409	244.5	28.1

偏西路径、偏东路径和西北路径。其中偏南路径为典型的污染路径,西北路径为清洁路径。

3 中、低空风对污染物浓度的影响

除后向轨迹反映出的气团对污染物的中远距离输送外,监测站点附近的中、低空风场对污染物的传输也有重要指示作用。结合 2014—2016 年冬半年北京、天津和石家庄每日 8 个时次(逐 3 h)的地面 10 m 风场及 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据绘制雷达图(图 2),图中以颜色变化代表 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度,数据距离圆心的距离代表风速大小。由图可见,对于三个城市,当近地面风速 $< 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,无论风向如何(北京西北风除外), $\text{PM}_{2.5}$ 浓度普遍较高,一般大于 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。这种情况下外来传输作用较弱,污染物浓度的升高主要以本地积累为主。当风速增大时,外来污染物的传输作用逐渐增强。对于北京,当风速增大到 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在东南—西南方向较高,多数时次超过 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;当风速增大至 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,

西南方向仍有部分 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超过 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的情况出现,表明在近地面高度上,西南和东南风的增强在大多时候成为污染物传输通道,在一定风速范围内传输作用大于扩散能力增强带来的清除作用。对于天津,当近地面风速 $> 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,偏南风成为污染物输送的主要载体。其中在东南方向上,风速 $> 8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时仍有 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超过 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的时次出现。由于天津东部临海,污染物来源主要考虑为滨海新区工业排放对市区的近距离输送。对于石家庄,北风、西南风和东南风的输送作用较明显,这几个方向的上风向为北京、天津及河北省内保定、邢台、衡水等城市,其污染物排放量高,在风速增大的过程中,传输能力也在一定范围内随之增强。

为了进一步探讨中、低空风场对污染物输送的影响,选取有探空观测的北京站绘制 700 hPa、850 hPa、925 hPa 风场与地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据分布的雷达图(图 3)。由图可见,当 $\text{PM}_{2.5}$ 出现超过 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的高浓度值时,中、低空风向均以偏南风为主。其中,东南方向呈现出风速随高度明显减小的

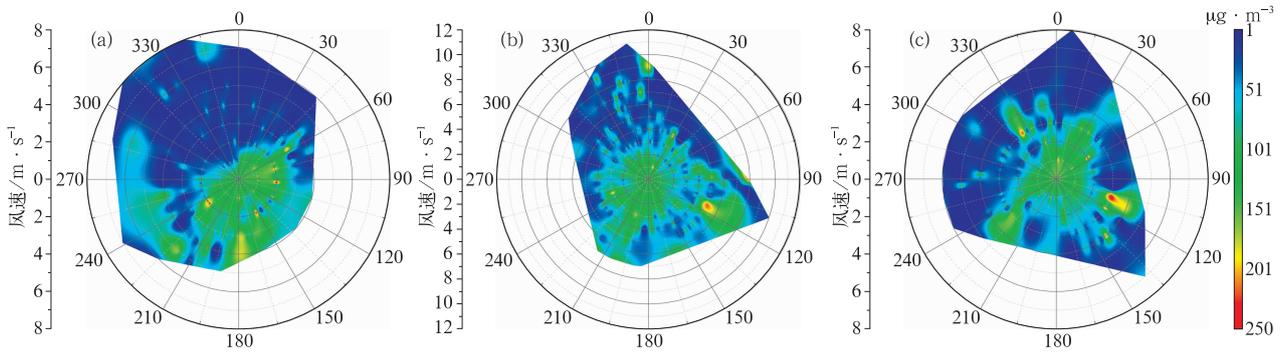


图 2 (a)北京、(b)天津和(c)石家庄地面 10 m 风(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度(单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)分布雷达图

Fig. 2 Distributions of surface 10 m wind direction, wind speed (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and concentration of $\text{PM}_{2.5}$ (unit: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) in (a) Beijing, (b) Tianjin and (c) Shijiazhuang

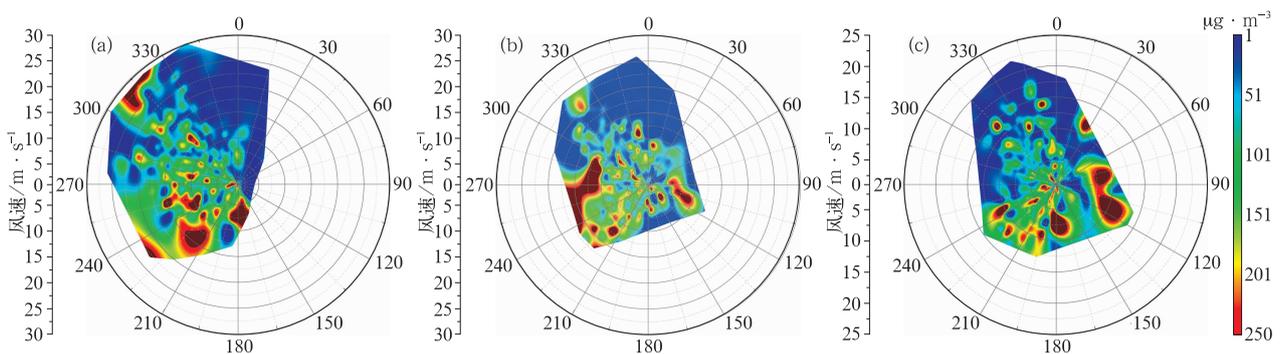


图 3 北京(a)700 hPa、(b)850 hPa、(c)925 hPa 风(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度(单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)分布雷达图

Fig. 3 Distributions of (a) 700 hPa, (b) 850 hPa and (c) 925 hPa wind direction, wind speed (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and concentration of $\text{PM}_{2.5}$ (unit: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) in Beijing

特征,表明该方向污染物来源主要集中在大气低层,中层以上气流的输送作用较弱。在西南方向,当 $\text{PM}_{2.5}$ 出现超过 $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的高浓度值时,700 hPa 和 850 hPa 的风速一般大于 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,中层气流输送作用明显。此外,700 hPa 西北风 $> 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时也会有高浓度污染物出现,这种情况考虑为沙尘粒子的远距离输送在本地沉降造成近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 粒子浓度升高。

4 潜在源区分析

由 PSCF 分析结果可见(图 4),对北京、天津和石家庄 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度造成影响的除京津冀地区外,还包括内蒙古、山西、山东和河南等省(自治区)。高 PSCF 值主要出现在河北南部、河南北部和山东西部,这与上述地区人口密集,工、农业污染排放强度大关系密切。其中,在来自河北中南部和山东西部的气团影响下,北京出现重污染轨迹的概率最高,与

上文提到的高浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 值对应中、低空偏南风的分析一致。天津 PSCF 值分布与北京较为相似,表明由于地理位置接近,两者受气团中长距离输送的影响也较为一致。对于石家庄,陕西北部、山西中南部的 PSCF 值较高,说明偏西路径天气系统携带的污染物对以石家庄为代表的河北中南部城市的影响不可忽视。

5 传输指数的改进与应用

5.1 传输指数的改进

为客观评估污染物平流传输强度,花丛等(2016)在张磊等(2013)研究的基础上引入潜在源贡献因子,结合传输轨迹和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放源清单构建传输强度计算公式如式(3),经检验表明其与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化有较好的一致性,可以作为分析重污染天气成因的有效工具,在预报评估中发挥参考作用。

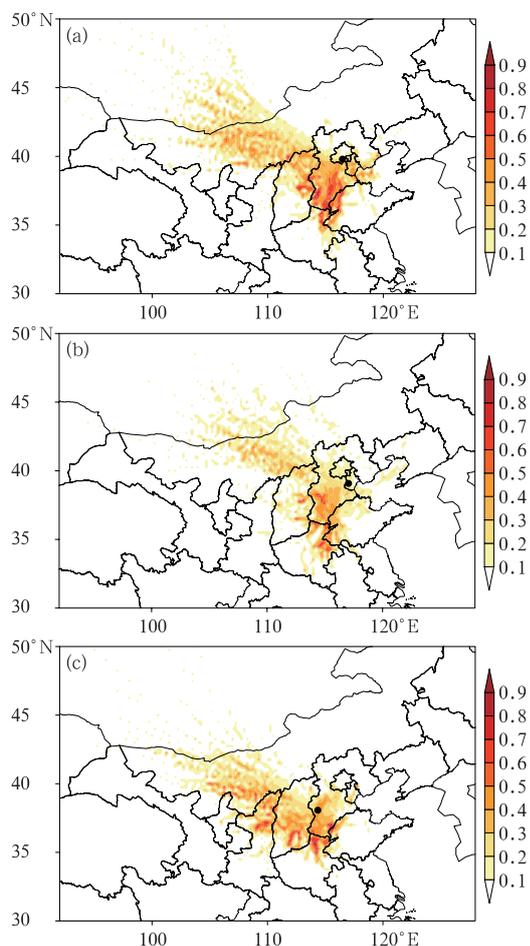


图 4 (a)北京、(b)天津和(c)石家庄
潜在源贡献因子(PSCF)分布
(黑色圆点表示对应城市位置)

Fig. 4 Distributions of PSCF in (a) Beijing,
(b) Tianjin and (c) Shijiazhuang
(Black dot indicates the corresponding city)

$$T_l(i, j) = R_l(i, j) \cdot E(i, j) \cdot W_d(i, j) \cdot W_u(i, j) \cdot PSCF \quad (3)$$

式中, T 为传输强度, R 为输送概率, E 为 $PM_{2.5}$ 排放强度, W_d 为距离权重函数, W_u 为时间权重函数, $PSCF$ 为潜在源贡献因子, 下标 l 和 (i, j) 是对应的轨迹和网格。其中 R 、 W_d 和 W_u 的具体计算方法可参见花丛等(2016)的研究。

该计算方法中, 采用的是清华大学 2010 年 $PM_{2.5}$ 排放源, E 不随时间变化。为更真实地反映由近地面 $PM_{2.5}$ 浓度实时变化及排放强度突变引起的输送强度变化, 计算轨迹模拟时段内各监测站点的 $PM_{2.5}$ 平均浓度, 以此作为 $PM_{2.5}$ 实时浓度; 读取网格点 (i, j) 周边 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 范围内监测站点的 $PM_{2.5}$ 实时浓度并求平均值, 作为网格点下垫面污染物强

度。改进后的 $E(i, j)$ 计算公式为:

$$E(i, j) = \frac{1}{sn} \sum_{s=1}^{sn} E_{PM_{2.5}}(s) \quad (4)$$

式中, $E_{PM_{2.5}}(s)$ 为监测站点 s 在轨迹模拟时段内的 $PM_{2.5}$ 平均浓度, sn 为网格点 (i, j) 周边 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 范围内监测站点数。

由式(3)计算得出各网格点传输强度 $T_l(i, j)$ 后, 求和即得到轨迹 l 的传输指数 T_{all} :

$$T_{all} = \sum_{j=1}^{i=m} T_l(i, j) \quad (5)$$

式中, m 、 n 分别代表经向和纬向上的网格数。

5.2 结果分析

从图 5 可以看出, 2014—2016 年冬半年北京 6 h 间隔传输指数与相应时次 $PM_{2.5}$ 浓度之间存在变化趋势的一致性, 其相关系数为 0.62, 通过 0.01 的显著性检验。由于在计算中引入了实时 $PM_{2.5}$ 浓度, 故该相关系数较采用固定排放源计算的传输指数明显升高(原方法计算得出的相关系数为 0.36; 花丛等, 2016), 表明改进后的传输指数能够更好地反映外来传输作用对污染物浓度的影响。天津和石家庄相同时段的传输指数与 $PM_{2.5}$ 浓度之间相关系数分别为 0.68 和 0.54, 也均通过 0.01 的显著性检验(图略)。由此可见, 将实时 $PM_{2.5}$ 浓度引入传输指数可使其构建方式更加合理, 对京津冀地区的污染物传输作用描述更加准确。需要注意的是, 传输作用仅是污染天气的形成条件之一, 故传输指数不能完全描述污染物浓度的变化。

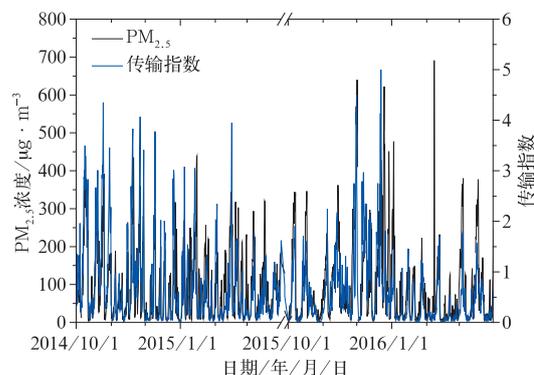


图 5 2014—2016 年冬半年北京 $PM_{2.5}$
浓度与传输指数时间序列

Fig. 5 Time series of observational $PM_{2.5}$
and transmission index in Beijing during
2014—2016 winter months

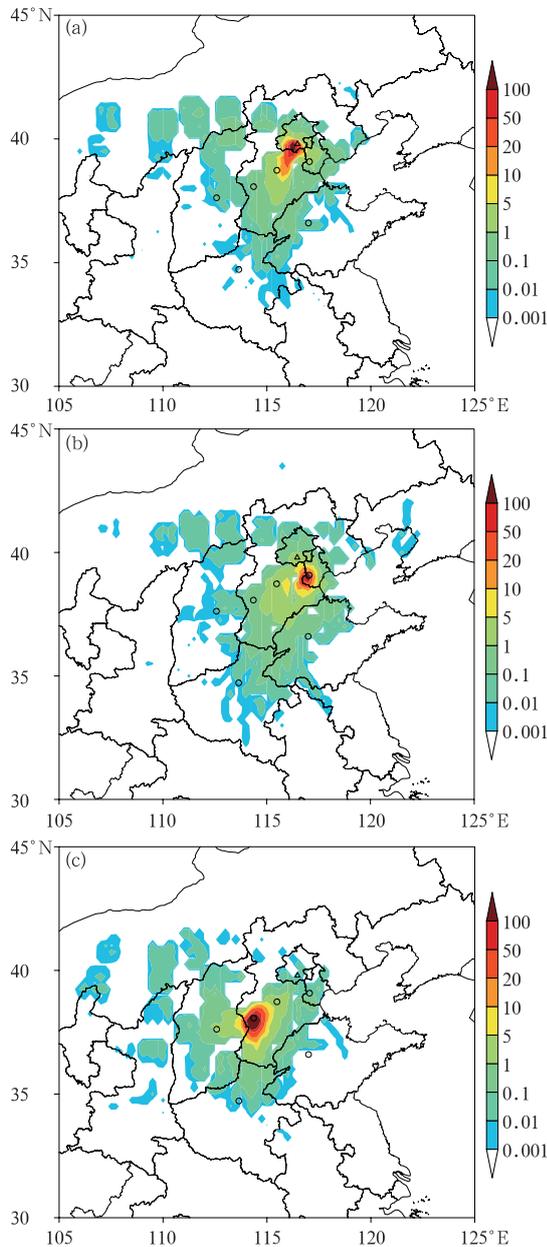


图 6 2014—2016 年冬半年(a)北京、(b)天津和(c)石家庄传输强度分布情况
Fig. 6 Distributions of transport intensity in (a) Beijing, (b) Tianjin and (c) Shijiazhuang during 2014—2016 winter months

表 5 不同传输强度占总传输强度的比例
Table 5 Ratios of different transport intensities to total intensity

城市	所占比例/%			
	≥100	[10,100)	[1,10)	[0.001,1)
北京	39	40	15	6
天津	32	34	26	8
石家庄	63	26	9	2

将所计算时段内各网格点上的传输强度进行叠加,即可得到传输强度的空间分布状况,即不同区域对目标城市的综合传输影响。图 6 显示,京津冀地区、河南北部、山东西北部、山西等地能够对北京、天津和石家庄产生较明显的传输影响。距离目标城市越近,传输强度越大;随距离增加,传输作用迅速减小。对于石家庄来说(图 6c),传输强度>10 的区域集中在其周边地区,该传输强度占总传输强度的比例高达 89%(表 5);北京和天津传输强度>10 的部分占总传输强度的比例分别为 79%和 66%,主要分布在本地及相邻的河北中部地区。由以上分析可见,京津冀及周边地区的传输作用对北京、天津和石家庄的污染物浓度均有一定影响,其中目标城市城郊及周边地区的近距离传输影响最为显著。在对污染源进行调控和减排时,可参考传输强度的空间分布进行决策,以尽量小的经济成本实现最好的区域联防联控效果。

5.3 重污染天气过程中的应用

2015 年 11 月 27 日至 12 月 1 日,京津冀地区出现一次大范围重污染天气过程。其中,北京城区平均 PM_{2.5}小时浓度最高超过 600 μg·m⁻³。逐 6 h PM_{2.5}浓度与传输指数的时间序列如图 7 所示。其中 11 月 29 日 14 时、11 月 30 日 08 时和 12 月 2 日 02 时出现观测数据缺失,分别用相邻时次数据替代。由图可见,两者之间的变化趋势有较好的一致性,相关系数高达 0.79,说明此次过程中外来传输作用对北京 PM_{2.5}浓度变化有较为明显的影响,其中 11 月 28 和 30 日传输指数出现两次峰值。下面结合北京站秒探空廓线和传输强度的空间分布,了

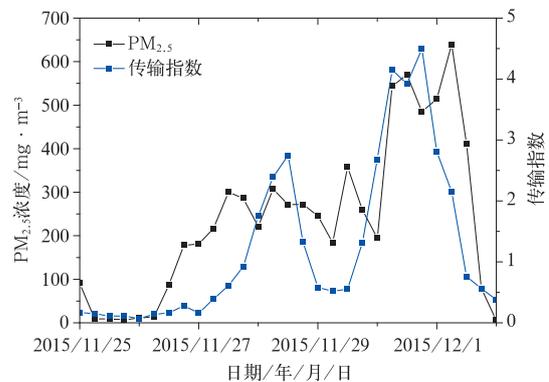


图 7 同图 5,但为 2015 年 11 月 25 日至 12 月 1 日
Fig. 7 Same as Fig. 5, but from 25 November to 1 December 2015

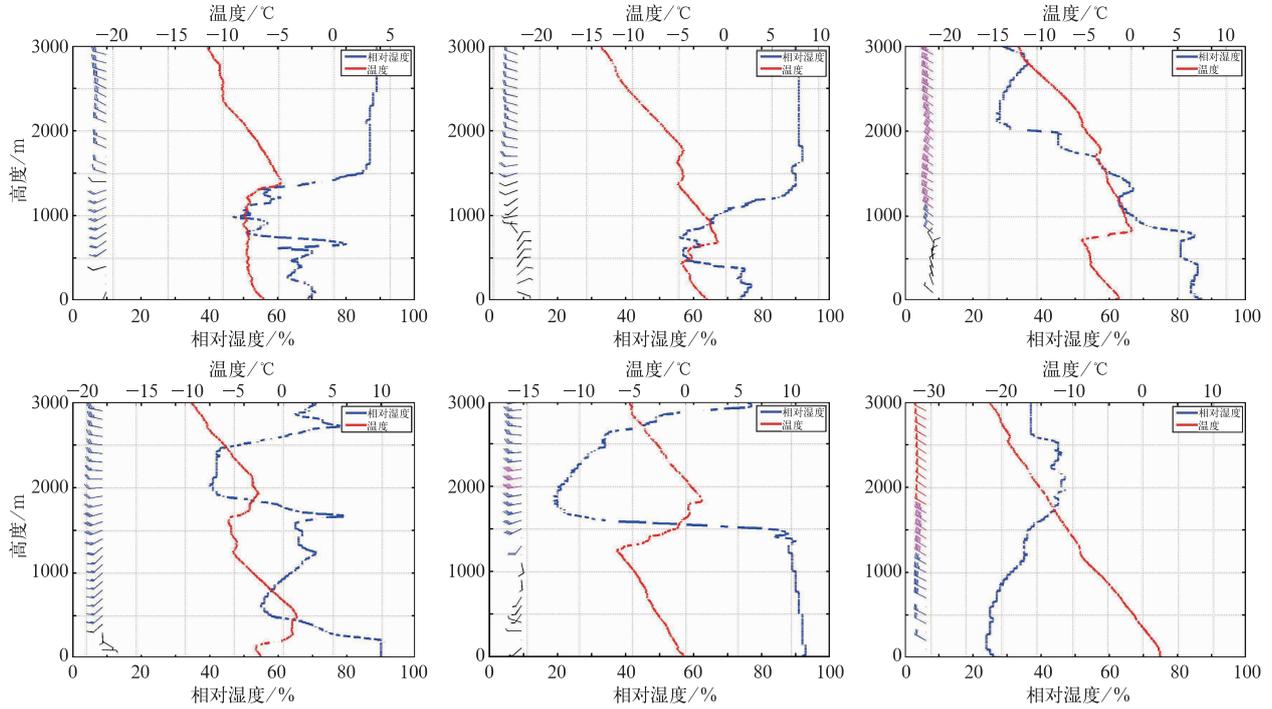


图 8 2015 年 11 月 27 日(a)、28 日(b)、29 日(c)、30 日(d)、12 月 1 日(e)和 2 日(f)08 时的北京秒探空廓线
 Fig. 8 Vertical structure of boundary layer observed by L-band sounding in Beijing at (a) 08:00 BT 27 November, (b) 08:00 BT 28 November, (c) 08:00 BT 29 November, (d) 08:00 BT 30 November, (e) 08:00 BT 1 December and (f) 08:00 BT 2 December 2015
 (Red line indicates temperature, unit: $^{\circ}\text{C}$; blue line indicates relative humidity, unit: %)

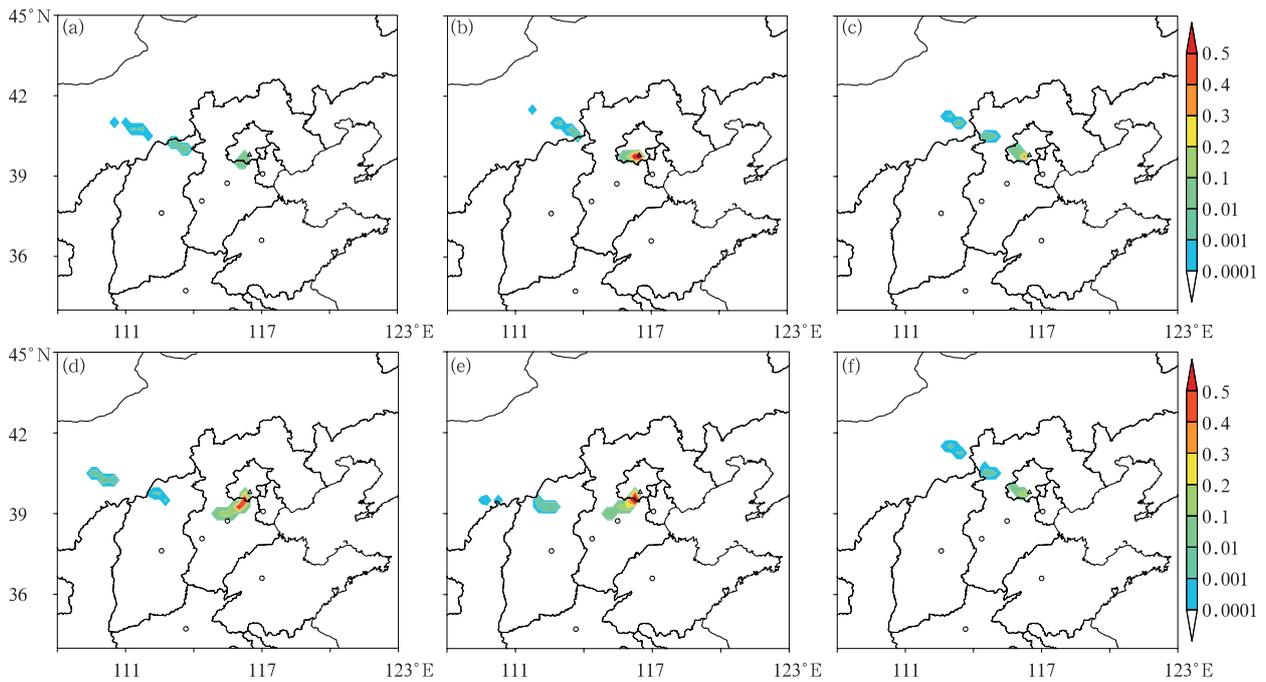


图 9 2015 年 11 月 27 日(a)、28 日(b)、29 日(c)、30 日(d)、12 月 1 日(e)和 2 日(f)08 时的北京传输强度分布
 Fig. 9 Distribution of transport intensity in Beijing at
 (a) 08:00 BT 27 November, (b) 08:00 BT 28 November, (c) 08:00 BT 29 November, (d) 08:00 BT 30 November, (e) 08:00 BT 1 December and (f) 08:00 BT 2 December in 2015

解传输指数在分析重污染天气成因中的作用。

11月27日,中、低空逆温层开始建立(图8a)。由常规高空观测(图略)及秒探空廓线(图9a)可见,北京主要受到偏西路径的气团传输影响,传输强度较弱。至28日,北京低层转为弱偏东风,有利于来自渤海的水汽输送,促进污染物粒子的吸湿增长(图8b)。随 $PM_{2.5}$ 浓度的不断增大,北京南部传输强度明显升高(图9b)。由此可见,该阶段北京重污染天气主要由本地积累造成,远距离传输作用较弱,本地及近郊的高 $PM_{2.5}$ 浓度造成了传输指数第一次峰值的出现。29日,受浅槽过境影响,北京中、高空转为一致偏西北气流,地面 $PM_{2.5}$ 浓度出现阶段性低值。由于冷空气强度较弱,1000 m以下低空风速增加不明显,逆温层和近地面高湿层仍然存在(图8c),故污染并未得到彻底清除。在槽后偏北气流影响下,传输轨迹的偏北分量增加,传输强度明显减小。浅槽过境后,11月30日至12月1日,中、低空偏南气流再次建立(图8d,8e),经河北中部影响北京城区的气团轨迹上传输强度明显增加(图9d,9e),传输指数出现第二次峰值,随后北京 $PM_{2.5}$ 浓度达到过程中的最高值。因此在这一阶段,污染物浓度在短时间内的爆发性增长与来自河北的高强度输送关系密切。12月2日,受较强冷空气的影响,北京上空转为一致偏北风,逆温层彻底被破坏(图8f);在来自西北路径的清洁气团的影响下(图9f),北京 $PM_{2.5}$ 浓度迅速降低,重污染过程结束。

由以上分析可见,合理应用传输指数可以对重污染天气的形成原因进行初步判断。若传输指数增大的同时伴有污染物浓度的明显升高,则以传输型污染为主,传输指数的数值在一定程度上表征传输强度的大小;若污染物浓度增加,而传输指数无明显增加,则考虑以本地积累型污染为主,可结合天气形势及传输强度的空间分布对污染成因做进一步分析。

6 结论与讨论

本文通过轨迹聚类、中、低空风场分析及潜在源区分析等方法对京津冀地区冬半年污染物传输特征进行了阐述。为更好地描述污染物平流输送强度,对传输指数的构建方法进行了改进,并结合一次重污染天气过程分析其作用。得到的主要结论如下:

(1) 通过轨迹聚类分析发现,对于北京、天津和

石家庄,其重污染轨迹出现概率从高到低均为偏南路径、偏西路径、偏东路径和西北路径。其中偏南路径为典型的污染路径,三个城市出现重污染的概率分别高达46.9%、32.9%和44.3%;西北路径为清洁路径。

(2) 中、低空风场对污染物传输有重要影响。其中,在近地面高度上,西南和东南风的增强在大多数时候成为北京的污染物传输通道;对于天津,偏南风尤其是东南风的近距离输送作用明显。此外,通过对中、低空风场的分析发现,北京东南方向的污染物来源主要集中在大气低层,而西南方向的中、低层输送均较为明显。

(3) 改进后的传输指数能够更好地反映外来传输作用对污染物浓度的影响,对京津冀地区的污染物传输作用描述更加准确。京津冀及周边地区的传输作用对北京、天津和石家庄的污染物浓度均有一定影响,其中目标城市、城郊及周边地区的近距离传输影响最为显著。

(4) 通过对一次重污染天气过程的分析表明,合理应用传输指数可以对重污染天气的成因进行初步判断。若传输指数增大的同时伴有污染物浓度的明显升高,则以传输型污染为主;若污染物浓度增加,而传输指数无明显增加,则考虑以本地积累型污染为主,可结合天气形势对污染成因做进一步分析。

参考文献

- 安俊岭,李健,张伟,等,2012.京津冀污染物跨界输送通量模拟[J].环境科学学报,32(11):2684-2692.
- 何心河,马建中,徐敬,等,2016.2014年10月京津冀地区一次 $PM_{2.5}$ 污染过程的数值模拟[J].气象,42(7):827-837.
- 花丛,张恒德,张碧辉,2016.2013—2014年冬半年北京重污染天气气象传输条件分析及预报指数初建[J].气象,42(3):314-321.
- 环境保护部,2016.HJ 633-2012环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)[S].北京:中国环境科学出版社.
- 霍彦峰,邓学良,杨关盈,等,2017.传输指数在合肥市重污染过程中的应用分析[J].环境科学学报,37(4):1277-1286.
- 任阵海,苏福庆,1998.大气输送的环境背景场[J].大气科学,22(4):454-459.
- 苏福庆,高庆先,张志刚,等,2004a.北京边界层外来污染物输送通道[J].环境科学研究,17(1):26-29.
- 苏福庆,杨明珍,钟继红,等,2004b.华北地区天气型对区域大气污染的影响[J].环境科学研究,17(3):16-20.
- 王爱平,朱彬,银燕,等,2014.黄山顶夏季气溶胶数浓度特征及其输送潜在源区[J].中国环境科学,34(4):852-861.
- 徐祥德,2002.北京及周边地区大气污染机理及调控原理研究[J].中国基础科学,(4):19-22.

- 徐祥德,周丽,周秀骥,等,2004.城市环境大气重污染过程周边源影响域[J].中国科学D辑:地球科学,34(10):958-966.
- 张磊,金莲姬,朱彬,等,2013.2011年6—8月平流输送对黄山顶污染物浓度的影响[J].中国环境科学,33(6):969-978.
- 张志刚,高庆先,韩雪琴,等,2004.中国华北区域城市间污染物输送研究[J].环境科学研究,17(1):14-20.
- Baker J, 2010. A cluster analysis of long range air transport pathways and associated pollutant concentrations within the UK[J]. Atmos Environ,44(4):563-571.
- Biegalski S R, Hopke P K, 2004. Total potential source contribution function analysis of trace elements determined in aerosol samples collected near lake huron[J]. Environ Sci Technol,38(16):4276-4284.
- Feng Xiao, Li Qi, Zhu Yajie, et al, 2014. Formation and dominant factors of haze pollution over Beijing and its peripheral areas in winter[J]. Atmos Pollut Res,5(3):528-538.
- Li Yingruo, Ye Chunxiang, Liu Jun, et al, 2016. Observation of regional air pollutant transport between the megacity Beijing and the North China Plain[J]. Atmos Chem Phys,16(22):14265-14283.
- Wang Lili, Liu Zirui, Sun Yang, et al, 2015. Long-range transport and regional sources of $PM_{2.5}$ in Beijing based on long-term observations from 2005 to 2010[J]. Atmos Res,157:37-48.
- Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R, 2009. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data[J]. Environ Model Softw,24(8):938-939.
- Zhang Z, Zhang X, Gong D, et al, 2016. Possible influence of atmospheric circulations on winter haze pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region, northern China[J]. Atmos Chem Phys,16(2):561-571.
- Zhu Lei, Huang Xin, Shi Hui, et al, 2011. Transport pathways and potential sources of PM_{10} in Beijing[J]. Atmos Environ,45(3):594-604.