

花丛,张恒德,张碧辉. 2016. 2013—2014 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. 气象, 42(3): 314-321.

2013—2014 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^{* 1}

花 丛 张恒德 张碧辉

国家气象中心, 北京 100081

提 要: 本文结合地面常规观测资料和空气质量数据, 利用聚类分析方法对 2013—2014 年冬半年北京地区的气象传输轨迹特征进行了统计分析, 并通过潜在源区贡献法(PSCF)分析了污染物的潜在源区。结果表明: 影响北京的气团主要来自西南、偏东和西北三条路径, 其中西南和偏东路径中重污染天气的出现概率分别为 56.58% 和 43.80%, 为典型的污染物传输路径。潜在源区分析发现, 高 PSCF 值主要对应西南和偏东轨迹气团所影响的山东西部、河北中南部及天津等地, 其形成与下垫面排放及气团移动速度有关。在此基础上, 结合 PM_{2.5} 排放源强度构建传输气象指数, 经检验发现与 PM_{2.5} 浓度的生消变化有较好的一致性, 且有约 6 h 的预报提前量。将传输指数与天气分析相结合, 有助于加深对重污染天气成因的理解, 并在预报评估中发挥参考作用。

关键词: 重污染天气, 聚类分析, PSCF, 传输气象指数

中图分类号: X16

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.3.006

Analysis on Advective Transport Condition for Heavy Air Pollution Processes in Beijing During the 2013—2014 Winter Months and Design of Transmission Weather Index

HUA Cong ZHANG Hengde ZHANG Bihui

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Surface observation and air quality data are applied for the analysis of advective transport characteristics in Beijing during the 2013—2014 winter months with cluster analysis. Meanwhile, potential source contribution function (PSCF) is used for the analysis of potential source area. The results show that air masses which influence Beijing mainly come from southwest, east and northwest, and the probability for heavy pollution weather in southwest and east paths are 56.58% and 43.80% respectively, which indicates the two directions are typical pollutants transmission paths. It is also revealed that high PSCF values caused by underlying emission and small air mass velocity cover the western Shandong, central and southern Hebei, Tianjin and other places. These places are affected by air masses from southwest and east. Combined with emission intensity of PM_{2.5}, transmission weather index is designed based on the former conclusions. It is found that the index is consistent with PM_{2.5} concentration, and has a forecast of about 6 hours in advance. Therefore, combining transmission weather index with weather analysis may lead to a better understanding of heavy air pollution and play a reference role in forecasting operation and assessment.

Key words: heavy air pollution process, cluster analysis, potential source contribution function (PSCF), transmission weather index

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306015)和气象关键技术集成与应用重点项目(CMAGJ2014Z16)共同资助
2015年8月24日收稿; 2016年1月5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

北京作为高速发展的环首都经济圈的中心,近年来由于频发的大气重污染事件而受到社会各界的广泛关注。国外已有研究证明,大气污染物可通过平流输送对其他地区产生影响(Chiapello et al, 1997; Baker, 2010)。国内也有研究指出,北京地区的大气污染是本地排放与周边区域输送作用的共同结果(徐祥德, 2002)。因此,结合气象条件、局地地形条件及区域污染源分布情况对气象传输条件进行分析研究显得尤为重要。

针对北京及华北地区的大气污染物输送问题,苏福庆等(2004a; 2004b)利用历史资料总结了北京市外来污染物的主要输入通道,并指出输送汇及其摆动是形成华北平原及北京重污染区的主要形式。陈朝晖等(2008)通过一次大气污染过程分析了天气型与污染输送路径之间的关系。张志刚等(2004)利用模式模拟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 都来自周边地区。近年来,在分析污染物传输方面,HYSPLIT模式及轨迹聚类方法成为重要工具。许多学者以此为基础,对国内大气污染现象较为严重的城市和地区的污染物传输问题进行了研究(王艳等, 2008; 杨素英等, 2010; 刘世玺等, 2010; 朱佳雷等, 2011; 王茜, 2013; 翁之梅等, 2016; 陈镭等, 2016)。此外,将轨迹聚类与污染物潜在源区分析相结合,可以更好地理解不同区域对污染物输送的影响(Zhu et al, 2011; Wang et al, 2015)。

2013—2014年冬半年,北京地区多次出现重污染天气(赖芬芬等, 2014a; 2014b; 吕梦瑶等, 2014; 杨寅等, 2014)。针对这一时期的污染物传输特征尚缺乏深入分析,同时对于污染物浓度的预报也缺少有效的客观参考依据。因此,本文首先利用轨迹分析方法对污染物气象传输特征进行统计,并分析污染物潜在源区,在此基础上初步构建客观预报指数,以期能提高对北京重污染天气的分析和预报水平。

1 资料和方法

本文所用空气质量指数(AQI)及 $PM_{2.5}$ 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/>),时间分辨

率为6 h。 $PM_{2.5}$ 排放源数据采用清华大学2010年排放源清单(图1),格点分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。气象数据来源于中国气象局常规地面观测资料。

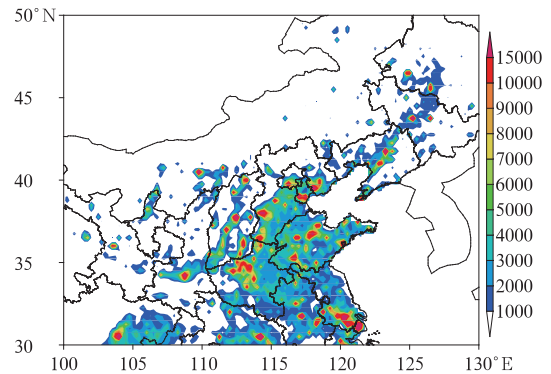


图1 2010年 $PM_{2.5}$ 排放源强度(单位: $t \cdot a^{-1}$)

Fig. 1 $PM_{2.5}$ emission intensity in 2010 (unit: $t \cdot a^{-1}$)

HYSPLIT为美国国家海洋大气研究中心(NOAA)开发的一款欧拉和拉格朗日混合型大气扩散模式,其平流和扩散的处理均采用拉格朗日方法。HYSPLIT模式在输送、扩散和沉降过程方面考虑得较为完整,目前在国内外广泛应用于分析污染物来源及确定传输路径。本文中模拟初始场采用NCEP全球资料同化系统(Global Data Assimilation System, GDAS)提供的 $1^\circ \times 1^\circ$ 分析场资料。

在分析污染物潜在源区时,采用了潜在源区贡献法(potential source contribution function, PSCF)(Biegalski et al, 2004)。这是一种应用广泛的污染物源地统计方法,通过结合气团轨迹和某污染物要素值给出可能的排放源位置。PSCF函数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。由于北京地区冬半年重污染天气中的首要污染物以 $PM_{2.5}$ 为主,结合《环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)》(环境保护部, 2012),设定当轨迹对应的 $PM_{2.5}$ 浓度大于 $150 \mu g \cdot m^{-3}$ 时,该轨迹为重污染轨迹。将 $30^\circ \sim 60^\circ N$ 、 $80^\circ \sim 130^\circ E$ 的范围划分为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的网格,经过网格 (i, j) 的重污染轨迹数为 m_{ij} ,经过网格 (i, j) 的总轨迹数为 n_{ij} ,则PSCF的表达式可写作式(1)。对 n_{ij} 较小的网格可能出现非常高的 $PSCF_{ij}$,因此,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)。 $W(n_{ij})$ 的表达式为式(2)。其中 n_{ave} 为研究区域内每个网格的平均轨迹端点数,本文中 $n_{ave} = 2$ 。高PSCF值所对应的区域即污染物的潜在源区,经过该区域的轨迹为污染物传输的主要路径。

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

$$W(n_{ij}) = \begin{cases} 1.00 & 3n_{ave} < n_{ij} \\ 0.70 & 1.5n_{ave} < n_{ij} \leq 3n_{ave} \\ 0.4 & n_{ave} < n_{ij} \leq 1.5n_{ave} \\ 0.17 & n_{ij} \leq n_{ave} \end{cases} \quad (2)$$

此外,在进行轨迹聚类及 PSCF 分析时,使用到了 TrajStat 软件(Wang et al, 2009)。

2 空气质量概况

根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(环境保护部,2012),当 AQI 超过 200 时,空气质量达到重度及以上污染。本文定义 AQI 级别一和二级(0~100)的时次为清洁时次,三和四级(101~200)为轻污染时次,五和六级(>200)为重污染时次。对北京城区 8 个国控点(图 2)监测数据取平均值,用于表征城区 AQI 总体状况,统计 2013 年 11 月至 2014 年 3 月每日 4 个时次(02,08,14 和 20 时)的 AQI 分布情况,去除缺测,共得到 580 个数据样本。统计结果见表 1。可见北京共有 131 个时次出现重污染天气,占总数的 22.59%;清洁时次共 282 次,占 48.62%,不到总数的一半。

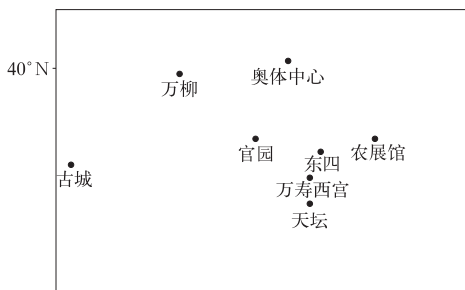


图 2 北京城区环境监测站点分布
Fig. 2 Spatial distribution of environmental monitoring stations in Beijing

图 3 给出了 AQI 逐月分布情况。在统计时段,各月 AQI 中位数分别为 90、78、114、143 和 117。其中 2 月空气质量状况较其他月份偏差,为重污染天气高发时段。第三个四分位数分别为 169、146、182、274 和 195,均达到或接近国家标准四级中度污染。经统计,各月分别出现 19、19、27、40 和 26 个 AQI>200 的重污染时次,其中 1 月极值达到 500,出现“爆表”现象。

表 1 2013 年 11 月至 2014 年 3 月北京城区 AQI 分布情况

Table 1 Analysis of AQI in Beijing from November 2013 to March 2014

	清洁 (0~100)	轻污染 (101~200)	重污染 (>200)	总样本
时次	282	167	131	580
百分比/%	48.62	28.79	22.59	100

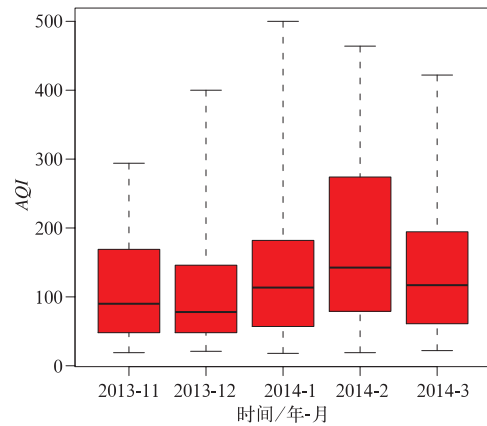


图 3 2013 年 11 月至 2014 年 3 月北京城区逐月 AQI 分布箱线图

Fig. 3 Boxplot of monthly AQI in Beijing from November 2013 to March 2014

3 气象传输特征分析

选择北京(站号:54511;39.8°N、116.47°E)为研究对象,利用 TrajStat 软件计算 2013 年 11 月至 2014 年 3 月逐 6 h 的 604 条气团后向轨迹,即基于起报时间追踪过去一段时间内气团传输路径。每条轨迹模拟时长 48 h,时间分辨率为 1 h,起始高度为 500 m。用聚类分析方法对轨迹进行分组,得到 3 条主要传输路径,如图 4 所示。其中聚类 1 共 80 条轨迹,主要为来自河北中南部、沿太行山东麓传输的西南路径气流。以 2014 年 3 月 24—27 日的天气过程为例(图 5a),东亚地区无明显冷空气活动,地面高压强度较弱,中心位于海上。北京处在地面高压西北侧,等压线稀疏,风力较小。聚类 2 共 396 条轨迹,主要为蒙古国经内蒙古中部、河北西北部进入北京的西北路径气流。以 2013 年 12 月 26—31 日为例(图 5b),地面高压强度较强,中心位于新疆以西,地面锋区较为明显。北京位于高压前部,受到西北或偏北路径冷空气的影响。聚类 3 共 128 条轨迹,

主要为来自辽宁西部经渤海湾、天津进入北京的偏东路径气流。该类传输路径出现时,地面高压中心位于我国东北地区(图 5c),冷空气对华北地区的影响较弱。聚类 2 的轨迹长度明显长于聚类 1 和聚类 3,在模拟时间相同的前提下,说明偏东和偏南路径气团的移动速度明显小于西北路径气团。

定义模拟开始时北京 AQI>200 的时刻对应的轨迹为重污染轨迹。在聚类分析的基础上对有 AQI 观测数据的 580 条轨迹进行分类,结果如表 2 所示。聚类 1 西南路径气流和聚类 3 偏东路径气流的平均 AQI 为 238.13 和 197.43,分别达到或接近重污染水平;其中重污染轨迹的出现概率分别为

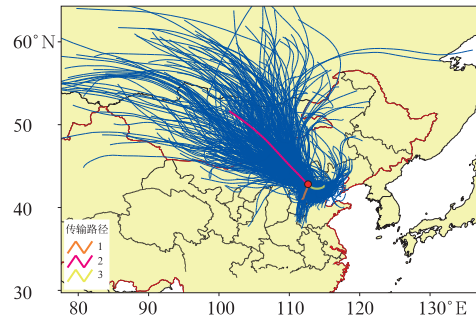


图 4 2013 年 11 月至 2014 年 3 月北京 48 h 后向轨迹分析及聚类结果

Fig. 4 48 h back trajectory clustering analysis in Beijing from November 2013 to March 2014

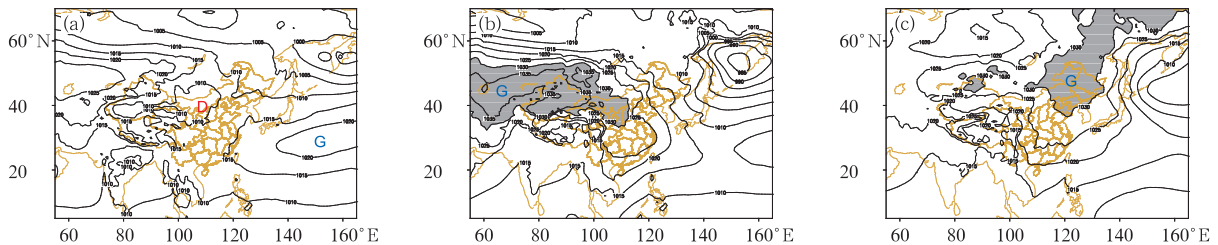


图 5 三种传输路径下典型过程的地面平均气压场

(阴影示意气压值高于 1030 hPa 的区域,G、D 分别表示高、低压中心)

(a)2014 年 3 月 24—27 日,(b)2013 年 12 月 26—31 日,(c)2014 年 2 月 16—25 日

Fig. 5 Average surface pressure field of three typical transmission paths

adows denote area with pressure above 1030 hPa, and the letters of G and D indicate the center of surface high and low, respectively)

(a) 24—27 March 2014, (b) 26—31 December 2013, (c) 16—25 February 2014

表 2 聚类分析统计结果

Table 2 Statistics of clustering analysis

聚类	轨迹数/条	平均 AQI	重污染轨迹数/条	重污染轨迹平均 AQI	重污染轨迹出现概率/%
1	76	238.13	43	308.37	56.58
2	383	92.34	35	256.14	9.14
3	121	197.43	53	287.08	43.80
合计	580	133.37	131	285.80	22.59

表 3 2013 年 11 月至 2014 年 3 月逐月聚类轨迹数

Table 3 Clustering trajectories from November 2013 to March 2014

聚类	2013 年 11 月	2013 年 12 月	2014 年 1 月	2014 年 2 月	2014 年 3 月
1	22	7	13	14	20
2	97	104	87	32	63
3	0	9	22	58	32
合计	119	120	122	104	115

56.58%和 43.80%,重污染轨迹的平均 AQI 更高达 308.37 和 287.08,可见这两条路径为典型的污染物传输路径。相比之下,聚类 2 西北路径气流的

平均 AQI 为 92.34,重污染轨迹出现概率仅为 9.14%,为典型的清洁路径。

结合逐月聚类轨迹数统计(表 3),可以进一步

解释图 3 中的 AQI 分布情况。2014 年 2 月, 聚类 1 和聚类 3 共占该月总轨迹数的 69.23%, 在有利的污染传输路径影响下, 该月重污染天气发生时次较其他月份偏多。与之形成对比的是 2013 年 12 月, 聚类 2 占该月总轨迹数的 86.67%, 清洁路径作用下, 该月 AQI 整体状况优于其他月份。

由地面风玫瑰图(图 6)可以看出, 重污染天气发生时, 北京多为偏南或偏东风, 几乎没有西北风出

现, 风速均小于 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在这两种风向下, 气团经过河北中南部、东部以及天津等高污染排放区进入北京, 小风速使大气中携带的污染物有充足的时间进行二次转化, 从而进一步加重污染程度; 而清洁状态下, 偏北路径的气团占主导, 来自内蒙古中部、河北北部等较高海拔、低排放区的气流对污染物有明显的扩散清除作用。

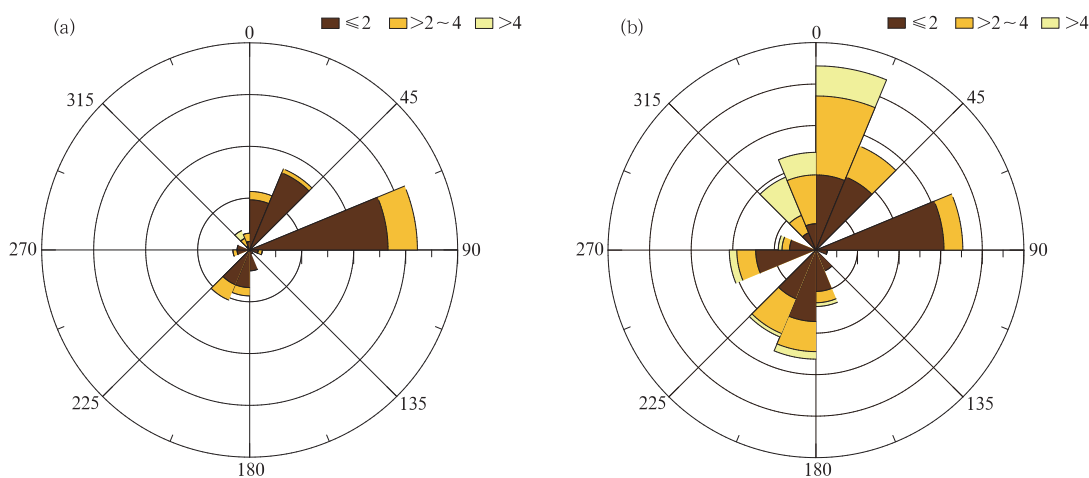


图 6 重污染(a)及清洁(b)时刻地面观测风玫瑰图
(填色表示风速, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 Wind rose diagram of heavy air pollution (a) and clear (b) days, and the colored area denotes wind speed (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

4 潜在源区分析

由图 7 可以看出, 高 PSCF 值主要出现在山东西部、河北中南部, 一般超过 0.6。经过上述地区的轨迹对应聚类 1, 为源于内陆工业区的西南路径气团, 其本身污染物含量较高, 且秋、冬季采暖及沿途秸秆焚烧等排放进一步加大了污染物浓度; 到达北京后易在北侧的燕山山脉前形成堆积, 污染物难以扩散, 出现重污染天气的概率最高。聚类 3 对应的偏东路径气团从辽宁西部经渤海湾、河北东部、天津等地进入北京。由于经过渤海海面, 气团相对湿度一般较高, 有利于污染物的吸湿增长和二次转化, 并导致能见度降低。然而, 偏东路径气团在陆地污染区滞留时间相对较短, 故 PSCF 值低于西南路径气团。聚类 2 对应的西北路径气团中, PSCF 值相对较高的区域出现在山西北部, 该地区同样为排放强度较大的工业区; 而在内蒙古中西部、河北北部等地, 下垫面排放强度低, 相应的 PSCF 值也较低。

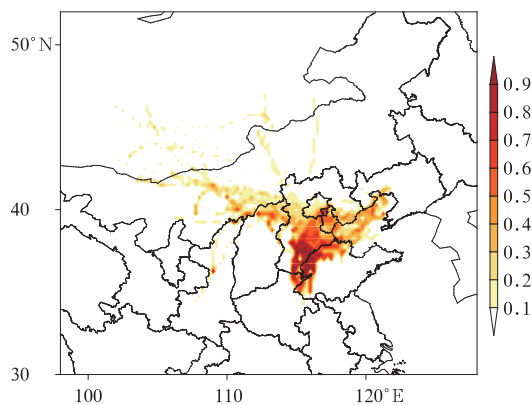


图 7 北京潜在源贡献因子(PSCF)分布
Fig. 7 Distribution of PSCF in Beijing

5 污染物传输指数

5.1 传输指数的构建

通过以上分析可以看出, 传输轨迹中包含了大

量对重污染天气有指示意义的信息。张磊等(2013)结合轨迹模式的输出结果和污染物排放源强度,设计了一种可评估污染物平流输送强度的客观参数,并通过与 CO 和 O₃ 浓度资料的对比验证,证明其可较为合理的表征传输强度。本文在此基础上引入潜在源贡献因子(PSCF),用于更好地描述污染源地对输送条件的影响。结合 PM_{2.5} 排放源清单计算污染物传输强度如下:

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

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_t 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。

$$R_l(i, j) = \frac{\tau_l(i, j)}{n} \quad (4)$$

式中, $\tau_l(i, j)$ 为轨迹 l 在网格 (i, j) 内的停留时间, n 为所有轨迹运行的总时间。两者都用轨迹点的个数表示。

$$W_d(i, j) = \frac{1}{d(i, j)/5 + 1} \quad (5)$$

式中, $d(i, j)$ 为网格 (i, j) 与观测点的距离。

$$W_t(i, j) = \frac{1}{t_l(i, j)/18 + 1} \quad (6)$$

式中, $t_l(i, j)$ 为轨迹 l 对应的气团从网格 (i, j) 移动到观测点所需的时间, 单位为 1 h。

通过式(3)计算得到某条轨迹的污染物传输强度后, 将该轨迹的所有传输强度求和即为该轨迹的传输指数 T_{all} :

$$T_{all} = \sum_{i=1}^{i=m} \sum_{j=1}^{j=n} T_l(i, j) \quad (7)$$

式中, m 和 n 分别代表经向和纬向上的网格数。

5.2 结果分析

计算输出 2013 年 11 月至 2014 年 3 月逐 6 h 间隔的传输指数, 并与 PM_{2.5} 浓度的观测值进行对比(图 8), 发现两者之间的变化趋势存在一致性, 其相关系数为 0.3592, 通过 0.05 的显著性水平检验。这一特点说明, 传输指数的构建方式基本合理, 能够表征平流输送对北京 PM_{2.5} 浓度变化的重要影响, 说明外来污染物是北京重污染天气形成过程中不可忽视的因素。

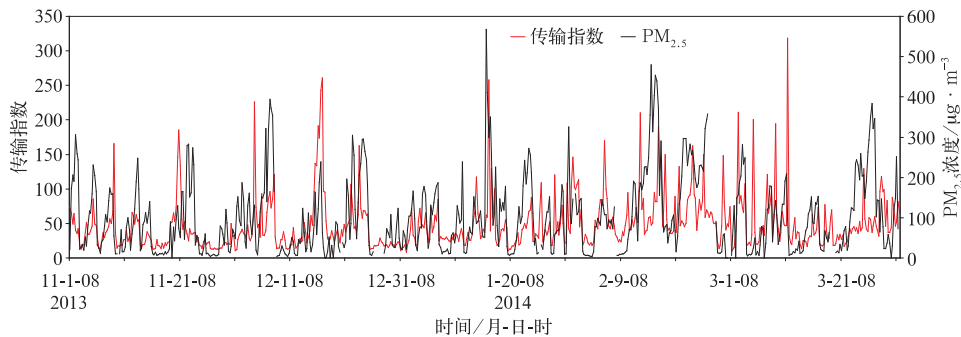


图 8 2013 年 11 月至 2014 年 3 月北京 PM_{2.5} 浓度与传输指数时间序列

Fig. 8 Time series of observational PM_{2.5} and transmission weather index in Beijing from November 2013 to March 2014

通过观察发现, PM_{2.5} 浓度较之传输指数的变化常存在一定滞后性。这一点从天气学意义上很好理解: 平流输送对污染物的传输导致了 PM_{2.5} 浓度的变化, PM_{2.5} 浓度相对传输条件的变化有一定滞后响应时间。为计算响应时间的长度, 对两者进行时滞相关分析, 即逐时次计算 PM_{2.5} 小时浓度与传输指数之间的相关系数。结果显示(表 4), 在 PM_{2.5} 浓度滞后传输指数 6 h 的情况下, 两者相关性最为明显。

说明传输指数对污染物浓度变化有大约 6 h 的预报提前量, 可以此作为参照, 估算污染物浓度的变化趋势。

表 4 PM_{2.5} 浓度与传输指数时滞相关分析

Table 4 Time lag correlation coefficient of observational PM_{2.5} and transmission weather index

PM _{2.5} 滞后时间/h	0	6	12	18	24
相关系数	0.3592	0.3745	0.3065	0.2343	0.2334

传输指数可从整体上表征气团轨迹对污染物的输送能力,而组成传输指数的传输强度可代表输送能力的空间分布情况。将 2013 年 11 月至 2014 年 3 月逐 6 h 共 604 条轨迹的传输强度进行叠加,得到不同地区对北京的污染物传输强度分布。图 9 显示,天津、河北中南部、山东西北部及河南北部传输强度大于 1,说明上述地区的污染物可通过区域传输对北京产生较明显影响,其传输强度之和占到总强度的 99.78%(表 5)。其中河北中部、天津西部距离北京近,工业发达,排放强度较高,且经过这两个区域的气流到达北京后易与燕山和太行山脉形成地形辐合,使污染物难以扩散,进一步加重污染程度,因此传输作用最为明显,与之对应的大于 100 的传输强度占总传输强度的 90.12%。工业较为发达的太原、济南、郑州等周边省会城市,由于较少有气团轨迹经过或距离较远等原因,对北京的传输作用并不明显。

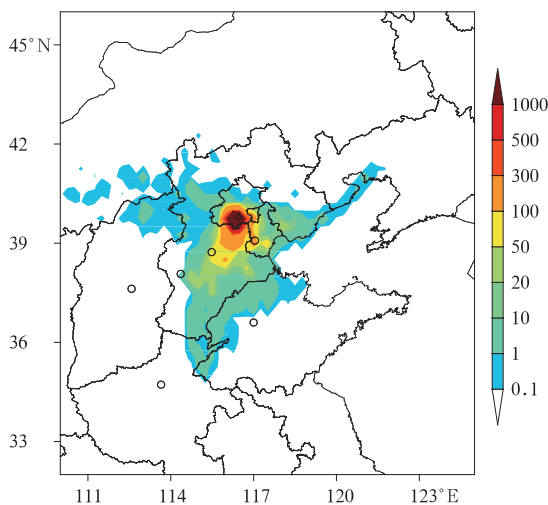


图 9 2013 年 11 月至 2014 年 3 月北京传输强度分布情况

Fig. 9 Distribution of transmission intensity in Beijing from November 2013 to March 2014

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

传输强度范围	≥ 1000	$[100, 1000)$	$[1, 100)$	$[0.1, 1)$
比例/%	72.45	17.67	9.66	0.19

6 结 论

本文利用轨迹分析和聚类方法,对北京地区

2013—2014 年秋、冬季节的气团传输轨迹特征进行了分析,并利用 PSCF 法对污染物的潜在源区进行了计算;在此基础上,结合 $PM_{2.5}$ 排放源强度构建传输气象指数,用于表征气象条件对污染物的传输能力。得到的主要结论如下:

(1) 秋、冬季影响北京的气团主要来自西南、偏东和西北三条路径,其中西南和偏东路径中重污染天气的出现概率分别为 56.58% 和 43.80%,为典型的污染物传输路径;西北路径中重污染天气出现概率较低,为清洁路径。

(2) 潜在源贡献因子分析表明,高 PSCF 值主要对应西南和偏东轨迹气团所影响的山东西部、河北中南部及天津等地,其形成与下垫面排放源强度及气团移动速度有关。

(3) 基于轨迹分析、排放源强度和 PSCF 值构建的传输气象指数能够在一定程度上反映污染物浓度的生消变化,且有约 6 h 的预报提前量,可在预报业务中用作客观参考依据。

(4) 天津及河北中部的污染物传输对北京地区影响最为显著。可参照传输强度的空间分布对污染源进行合理调控和减排,做到空气质量改善和经济发展兼顾。

需要说明的是,传输气象指数的构建过程中采用了 $PM_{2.5}$ 排放源强度,因此主要适用于以细颗粒物为首要污染物的污染天气类型,且由于排放源为常量,无法反映由排放强度突变引起的大气污染事件。此外,传输作用是污染天气的形成条件之一,静稳天气形势和化学反应均对污染物浓度有较大影响,因此仅参考传输指数难以正确判断污染天气情况。在环境气象预报业务中,可将传输指数与天气分析相结合以得到污染物浓度变化的正确趋势。

参考文献

- 陈镭,马井会,耿福海,等. 2016. 上海地区一次典型连续颗粒物污染过程分析. 气象, 42(2):
- 陈朝晖,程水源,苏福庆,等. 2008. 华北区域大气污染过程中天气型和输送路径分析. 环境科学研究, 21(1): 17-21.
- 环境保护部. 2012. HJ633-2012. 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行).
- 赖芬芬,何立富. 2014. 2013 年 11 月大气环流和天气分析. 气象, 40(2): 253-260.
- 赖芬芬,马学款. 2014. 2014 年 1 月大气环流和天气分析. 气象, 40(4): 515-520.
- 刘世玺,安俊琳,朱彬,等. 2010. 远距离输送作用对南京大气污染的影响. 生态环境学报, 19(11): 2629-2635.

- 吕梦瑶,何立富. 2014. 2013年12月大气环流和天气分析. *气象*, 40(3):381-388.
- 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. *环境科学研究*, 17(1):26-29.
- 苏福庆,任阵海,高庆先,等. 2004b. 北京及华北平原边界层大气中污染物的汇聚系统—边界层输送汇. *环境科学研究*, 17(1):21-25.
- 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. *中国环境科学*, 34(4):852-861.
- 王茜. 2013. 利用轨迹模式研究上海大气污染的输送来源. *环境科学研究*, 26(4):357-363.
- 王艳,柴发合,刘厚凤,等. 2008. 长江三角洲地区大气污染物水平输送场特征分析. *环境科学研究*, 21(1):22-29.
- 翁之梅,李丽平,杨万裕,等. 2016. 浙江省冬季不同霾过程的后向气流轨迹及环流特征. *气象*, 42(2):
- 徐祥德. 2002. 北京及周边地区大气污染机理及调控原理研究. *中国基础科学*, 8:19-22.
- 杨素英,赵秀勇,刘宁微. 2010. 北京秋季一次重污染天气过程的成因分析. *气象与环境学报*, 26(5):13-16.
- 杨寅,何立富. 2014. 2014年2月大气环流和天气分析. *气象*, 40(5):642-648.
- 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. *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. *环境科学研究*, 17(1):14-20.
- 朱佳雷,王体健,邢莉,等. 2011. 江苏省一次重霾污染天气的特征和机理分析. *中国环境科学*, 31(12):1943-1950.
- Baker J. 2010. A cluster analysis of long range air transport pathways and associated pollutant concentrations within the UK. *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. *Environ Sci Tec*, 38(16):4276-4284.
- Chiapello I, Bergametti G, Chatenet B, et al. 1997. Origins of African dust transported over the northeastern tropical Atlantic. *J Geophys Res*, 102(D12):13701-13709.
- Wang L L, Liu Z R, Sun Y, et al. 2015. Long-range transport and regional sources of PM_{2.5} in Beijing based on long-term observations from 2005 to 2010. *Atmos Res*, 157(15):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. *Environ Model Soft*, 24(8):938-939.
- Zhu L, Huang X, Shi H, et al. 2011. Transport pathways and potential sources of PM₁₀ in Beijing. *Atmos Environ*, 45(3):594-604.