

# 气流输送对北京大气污染物体积分数的影响

陈旭<sup>1</sup> 安俊琳<sup>1</sup> 刘世玺<sup>1</sup>

## 摘要

利用 HYSPLIT 后向轨迹模式和 2004 年 8 月—2007 年 12 月 NCEP 再分析气象资料,计算每天 15:00 抵达北京地区 10、100 和 500 m 高度上的后向气流轨迹.对整个研究时段、采暖季和非采暖季期间的后向气流轨迹分别进行聚类分析,得到这 3 个时段到达北京地区的主要后向气流轨迹聚类.其中整个研究时段的后向气流轨迹分成 3 个聚类,采暖季和非采暖季的后向气流轨迹都分成 5 个聚类.结合各段时间中国科学院大气物理研究所观测的大气污染物体积分数资料,分析不同时段气流输送作用对北京主要大气污染物体积分数的影响.发现采暖季和非采暖季北京气体污染物体积分数高值主要集中在来自风速较小的西北方气流聚类.采暖季污染物体积分数低值主要出现在偏北方向风速较大的后向气流轨迹聚类.非采暖季污染物体积分数低值主要出现在偏北低速气流聚类和西北向高速气流轨迹聚类中.从各时段污染物最值分布情况可以看出:在风速较大的后向气流轨迹聚类影响下,北京的污染物体积分数较低;途经了较严重工业排放地带的后向气流轨迹聚类会使北京气体污染物体积分数显著增高.此外,虽然非采暖季的大气污染物分布与气流输送的影响基本符合,但各聚类污染物分布结果与气流输送作用的影响存在偏差.

## 关键词

后向气流轨迹; 聚类分析; 大气污染物; 气流输送

中图分类号 P425.6

文献标志码 A

收稿日期 2011-01-23

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目(2009CB426313); 教育部博士点基金(20093228110003); 中国博士后科学基金资助(20090450560)

作者简介

陈旭,男,本科生,大气物理与大气环境专业. chenxunui@gmail.com

安俊琳(通信作者),男,博士,主要研究方向为大气环境. junlinan@nuist.edu.cn

## 0 引言

近年来,随着中国经济的发展,城市高速扩张,城市人口和汽车数量迅速增加,城市大气污染这一严重的环境问题更加突出<sup>[1-2]</sup>.北京作为首都,城市发展速度更快,然而其随季节不断变化的排放源、复杂的城市冠层和多变的气象条件,以及不确定的远距离输送使得对北京大气污染物的准确预测和有效治理十分困难<sup>[3-4]</sup>.

目前很多研究结果显示,远距离传输对城市大气污染物浓度有很重要的影响. Moody 等<sup>[5]</sup>通过后向轨迹的相似性进行聚类分析,发现不同的气流影响下,降水的组成具有显著差异,并认为造成这种差异的一个重要因素是气流的发源地. Cape 等<sup>[6]</sup>对后向轨迹的聚类分析解释了爱尔兰海岸的 Mace Head 观测站的痕量气体观测结果,排除局地气流扰动的干扰后,发现在不同气团的影响下,臭氧浓度有显著的差异. 安俊琳等<sup>[7]</sup>运用后向轨迹模式对北京城区连续观测的  $O_3$  及其前体物  $NO_x$  和 CO 浓度进行了分析,认为受上游污染源的影响,当北京盛行东南、偏南和偏西气流时,容易出现高浓度  $O_3$ . 赵恒等<sup>[8]</sup>运用后向轨迹模式计算 2001 年 3 月 TRACE-P 期间抵达香港地区的后向气流轨迹,并分析香港地区大气输送特征,对轨迹进行聚类分析后认为,到达香港的 6 类典型气团中来自大陆的气团占 47.5%,局地输送性气团占 34.6%,海洋性气团占 18.7%,并发现污染性气体  $O_3$ 、 $SO_2$  和 CO 在大陆性气团影响下的平均浓度明显高于在海洋性气团影响下的平均浓度. Baker<sup>[9]</sup>运用后向轨迹模式对英国伯明翰地区 1998—2001 年间城市与乡村 2 个观测点的光化学污染气体浓度数据进行了对比和分析,发现远距离输送作用对城乡的光化学污染气体浓度影响显著,不同的发源地以及气流途经地区的空气状况对局地污染物浓度有重要影响.

目前,针对北京地区长时段的后向气流轨迹分类及气流输送对城市大气污染影响的研究工作较少.北京大气中的  $SO_2$ 、 $NO_x$  和  $O_3$  都具有较大的季节变化,特别是在冷暖季<sup>[10]</sup>.这些差异除了与局地排放的变化密切相关以外,也受到来自上游的不同污染源影响<sup>[7]</sup>.

本文以北京 2004 年 8 月—2007 年 12 月大气污染物观测数据为基础,运用 HYSPLIT(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory)模式对 2004 年 8 月—2007 年 12 月整个研究时段和其中采暖季和非采暖季的后向气流轨迹进行聚类分析.结合考虑局地排放、气

<sup>1</sup> 南京信息工程大学 大气物理学院,南京,210044

团发源地、气流途经区域和气象要素等因素,研究气流输送对北京地区  $O_3$ 、 $NO_x$  以及  $SO_2$  这几类典型大气污染物浓度的影响,这将有助于进一步了解北京污染物浓度变化机制,为制定有效的环境调控政策提供科学依据。

## 1 观测与研究方法

### 1.1 观测站点

观测地点位于中国科学院大气物理研究所 325 m 气象铁塔 (116°4'E, 39°9'N) 上 10 m 处,该铁塔位于北京市北三环路和北四环路之间,距三环路约 1 km,其东面 200 m 处为南北走向的八达岭高速公路,北面 50 m 处为东西走向的北土城西路。

### 1.2 仪器设备

$\varphi(SO_2)$  观测采用美国热电环境设备公司生产的 43CTL 高精度脉冲荧光  $SO_2$  分析仪,分析仪最低检测限为  $0.06 \times 10^{-9}$  (体积分数,下同),零漂  $< 0.2 \times 10^{-9} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$ ,跨漂为  $\pm 1\% \cdot (7 \text{ d})^{-1}$ 。 $\varphi(NO_x)$  观测采用 42CTL 高精度化学发光  $NO-NO_2-NO_x$  分析仪,分析仪最低检测限为  $0.05 \times 10^{-9}$ ,零漂  $< 0.025 \times 10^{-9} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$ ,跨漂为  $\pm 1\% \cdot (24 \text{ h})^{-1}$  (满度值)。 $\varphi(O_3)$  观测采用美国热电环境设备公司生产的 49C 紫外光度法  $O_3$  分析仪,分析仪最低检测限为  $2 \times 10^{-9}$ ,零漂为  $4\% \cdot (24 \text{ h})^{-1}$ ,跨漂为  $\pm 2\% \cdot (7 \text{ d})^{-1}$ 。

观测前所有仪器都进行了标定,以减少仪器造成的系统误差。

### 1.3 数据质量控制措施

1) 对于在观测仪器零点漂移技术指标范围内的负值,取仪器最低检出限的 1/2 数值,作为观测结果参加统计。

2) 仪器在校准零/跨度期间,如果发现仪器零点漂移或跨度漂移超出漂移控制限,此时采集到的数据误差较大,不参与统计。一般情况下,从发现超出控制限的时刻起,到仪器恢复到调节控制限以下这段时间内的观测数据作为无效数据,但对该数据进行标注,作为参考数据保留。

3) 对手工校准的系统,仪器在校准零/跨度期间,发现仪器零点漂移或跨度漂移超出漂移控制限,应从发现超出控制限时刻的前一天算起,到仪器恢复到调节控制限以下这段时间内的观测数据作为无效数据,不参加统计,但对该数据进行标注,作为参考数据保留。

4) 在仪器校准零/跨度期间的数据作为无效数据,不参加统计,但应对该数据进行标注,作为仪器检查的依据予以保留。

5) 如观测站临时停电或断电,则从停电或断电时起,至恢复供电后仪器完成预热为止时段内的任何数据都为无效数据,不参加统计。恢复供电后仪器完成预热一般需要 0.5 ~ 1 h。

### 1.4 后向轨迹计算模式

本文运用 HYSPLIT 模式进行后向轨迹计算,该模式是一种欧拉和拉格朗日型混合计算模式,其平流和扩散的处理采用拉格朗日方法,而体积分数计算采用欧拉方法。模式采用地形  $\sigma$  坐标(即随动坐标)  $\sigma = 1 - z/Z_{top}$ ,  $z$  为距离地面高度,  $Z_{top}$  为模式顶高。水平网格与输入的气象场相同,垂直方向分为 28 层,在计算中将气象要素分别线性内插到各  $\sigma$  层上。轨迹模式所采用的气象资料是 NCEP 的 FNL 全球分析资料,并经过 ARL 的预处理模块转化为模式所需要的格式。

本文计算 2004 年 8 月 5 日—2007 年 12 月 31 日(研究时段内采暖季和非采暖季包含在其中)逐日后向气流轨迹。轨迹的起始点为观测点,后向时间尺度为 96 h,以便能够包括二次污染物的生命周期。起始时间为下午 15:00,此时  $\varphi(O_3)$  达到最大值。起始高度分别为 10、100、500 m。最后得到了 3 个高度的计算结果,每个高度的后向气流轨迹 1 244 条(其中采暖季 301 条,非采暖季 729 条)。聚类分析基于 3 个不同高度上的后向轨迹,而不是单独一个高度上的,可以最大程度上减少算法的不确定性和气象条件的影响。

### 1.5 聚类分析方法

聚类分析是一种多元的统计分析方法,按照一批样本的亲疏程度进行分类分析。其原理就是先寻找一种能够客观反映样本之间远近关系的统计量,然后根据这种统计量把样本分为若干类。

本文使用的聚类方法为  $k$  均值分类法。设将  $n$  个样本分为  $k$  类,首先从  $n$  个数据对象任意选择  $k$  个对象作为初始聚类中心;然后把剩下的每个对象都分派到与这  $k$  个中心距离最小的那个类中,得到第 1 次迭代形成的  $k$  个类;接着根据组成每一类的样本对象计算每个变量的均值,每一类的  $n$  个均值在  $n$  维空间中形成  $k$  个点,这就是第 2 次迭代的类中心;按照这种方式依次迭代下去,直至达到指定的迭代次数或终止迭代的判据要求时,聚类过程结束。

## 2 结果与讨论

### 2.1 污染物体积分数变化

从图 1 可以看出  $\varphi(\text{SO}_2)$ 、 $\varphi(\text{NO})$  存在明显的单峰型季节变化: 夏季最低, 冬季达到峰值.  $\varphi(\text{SO}_2)$ 、 $\varphi(\text{NO})$  峰值分别为  $50 \times 10^{-9}$ 、 $60 \times 10^{-9}$ , 而且  $\varphi(\text{SO}_2)$  存在每年峰值递增的特点, 夏季低值均小于  $10 \times 10^{-9}$ . 这种现象与北京采暖期燃烧大量的煤炭, 排放废气和冬季相对稳定的大气层结有关<sup>[10]</sup>.  $\text{NO}_2$  的季节变化则没有明显的规律.  $\varphi(\text{NO}_x)$  为  $\varphi(\text{NO})$  与  $\varphi(\text{NO}_2)$  的总和, 受  $\text{NO}$  分布特点的影响  $\varphi(\text{NO}_x)$  也略微呈现单峰型季节变化的趋势.  $\varphi(\text{O}_3)$  季节变化呈现明显的单峰型趋势, 7 月左右达到最高值并依次向前后月份递减. 由于近地层  $\text{O}_3$  的生成主要来自光化学反应, 夏季高温、强烈的太阳辐射以及高浓度  $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}$  和  $\text{VOC}_s$  等前体物可能是  $\varphi(\text{O}_3)$  在夏季出现高值的主要原因<sup>[11]</sup>.

### 2.2 气流输送对污染物体积分数的影响

#### 2.2.1 2004 年 8 月—2007 年 12 月气流输送对污染物体积分数的影响

如图 2 所示, 随着聚类数目的增加, 聚类内变化量递减. 聚类数目在 1 和 2、2 和 3、5 和 6 之间都有明显的聚类内变化, 其中 1 和 2 之间、2 和 3 之间聚类内变化幅度显著, 而 5 与 6 之间的聚类内变化较小. 若将后向轨迹由 5 个聚类分为 6 个聚类, 聚类内变化减小量不到 8, 而且第 3、4、5 聚类数目对应的聚类内变化量本身并不大, 其数值仅在 13.34 ~ 15.33 m. 将后向气流轨迹分为 6 个聚类的结果也显示出现了 2 个聚类相似度很大的聚类轨迹. 将后向轨迹分为 2 个聚类则依然存在较大的聚类内变化, 而且聚类数目过少, 分析意义不大. 为使聚类内变化与聚类数目都尽量合理, 本文将研究时段内到达北京的后向气流轨迹分为 3 个聚类进行分析. 对比英国伯明翰<sup>[9]</sup>、山东济南<sup>[12]</sup>等地的后向气流轨迹分类结果, 北京 2004 年 8 月—2007 年 12 月期间后向气流轨迹聚类数相对较少. 其原因可能是北京处于蒙古—西伯利亚与太平洋两大气压系统之间, 冬季受西伯利亚—蒙古高压影响吹西北风, 夏季受海洋暖高压影响偏东南风, 属于典型的温带半湿润大陆性季风气候<sup>[13]</sup>, 因此气流轨迹分布比较规律.

图 3 为运用  $k$  均值分类法将研究时段内北京的后向气流轨迹进行聚类分析得到的 3 类典型后向气流轨迹聚类结果<sup>[9]</sup>. 每个聚类结果包括 10、100 和

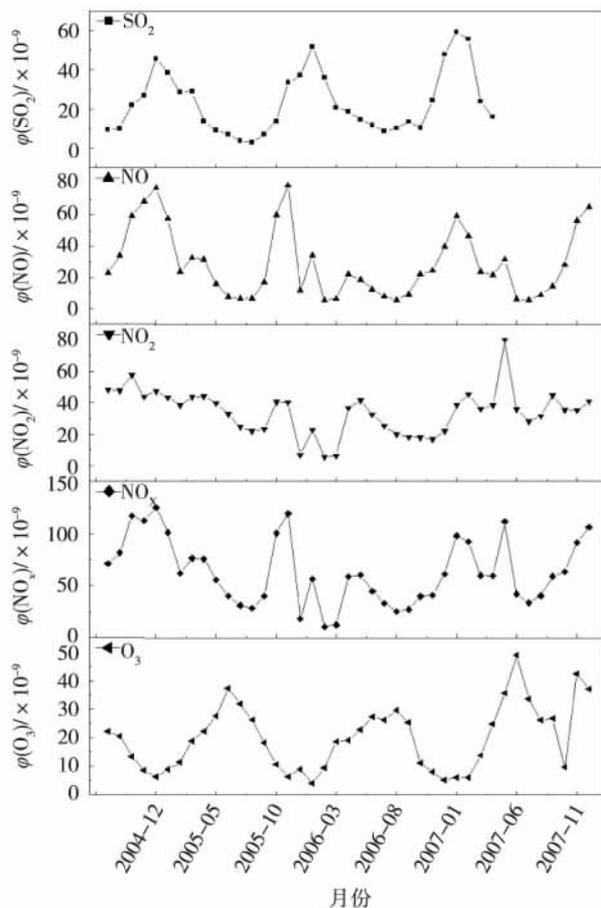


图 1  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{O}_3$  的体积分数逐月变化

Fig. 1 Monthly changes of  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  and  $\text{O}_3$  volume fraction

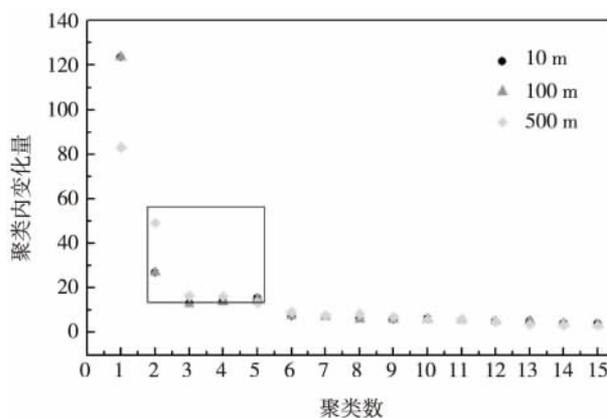


图 2 各聚类数目对应的聚类内变化量

Fig. 2 Change of within-cluster variance with cluster number

500 m 3 层轨迹. 聚类 1 包含 429 条逐日轨迹, 占研究时段采暖季总轨迹数的 34.2% (其他聚类的轨迹数目与百分比见图 3), 其气流主要来自蒙古中北部

地区, 风速较大, 穿越蒙古东南部经过内蒙古、河北到达北京. 聚类 2 的气流从蒙古以西以及西西伯利亚地区出发, 横穿蒙古, 经内蒙古、河北抵达北京. 从 4 d 的轨迹长短可以判断出聚类 2 的气流速度约为聚类 1 气流速度的 2 倍, 因此本文考虑轨迹来向和风速, 将聚类 1 和聚类 2 分别称作西北气流和西北高速气流. 聚类 3 气流轨迹长度远远小于前两者, 轨迹从山东西北部出发, 曲折进入河北南端, 向西北、东北偏转进入北京. 同样根据之前的命名方法将聚类 3 称作偏南低速气流.

从图 4 研究时段各聚类每月出现的频率(各聚类出现频率为该聚类在某月出现的轨迹数与研究时段总轨迹数的比值, 以下采暖季与非采暖季各聚类出现频率算法与之相同)可以看出, 聚类 1 西北气流与聚类 2 西北高速气流变化趋势一致, 4—10 月明显低于其他月份. 峰值出现在寒冷的 1 月和 12 月. 偏南气流则恰与其相反, 峰值出现在炎热的 8 月, 在 5—10 月外的其他月份出现频率很低.

表 1 将全研究时段 3 聚类各种污染物体积分数每日 8:00—16:00 的平均值进行比较. 其中, 同一聚类中污染物体积分数最高值用加粗数值表示, 最低值用带有下划线数值表示(表 2、表 3 同).  $\varphi(\text{NO}_2)$ 、 $\varphi(\text{NO}_x)$  和  $\varphi(\text{O}_3)$  均在聚类 2 达到最小值. 聚类 2 的气流速度最大而且源头和途经地区基本属于无污染排放带. 风速反映大气边界层湍流的强弱<sup>[7]</sup>, 高速而清洁的西北气流促进大气污染物的稀释扩散. 聚类 1 的气流发源地和沿经路径也很清洁, 但是风速只达到聚类 2 的一半, 对北京大气污染物的扩散作用小于聚类 2. 这可以合理解释表 1 中聚类 1 的各污染物体积分数大于聚类 2.  $\varphi(\text{SO}_2)$ 、 $\varphi(\text{NO})$  和  $\varphi(\text{NO}_x)$  的最大值出现在聚类 1 而没有出现在风速更小而且途经了山东、河北等大量排放工业废气地区<sup>[14-15]</sup>的聚类 3, 这可能是由于聚类 1 主要出现的时间段是 10 月一次年 4 月, 这段时间包含了北京的采暖季节. 居民取暖燃烧大量煤炭产生的硫化物, 交通运输排放的氮化物会因为采暖季比较稳定的大气层结而难以扩散, 从而造成了氮硫化物体积分数冷季高暖季低的现象<sup>[7]</sup>. 聚类 3 虽然途经大片工业排放区, 气流速度也十分缓慢, 但聚类 3 主要出现的非采暖季大气状况本来就以外不稳定类型居多, 有利于污染物扩散, 且受季风影响, 降水远多于采暖季, 这对大气污染物有冲刷沉降作用<sup>[10]</sup>. 因此聚类 3 中仅有  $\varphi(\text{NO}_2)$  和  $\varphi(\text{O}_3)$  达到了最大值. 其中  $\varphi(\text{O}_3)$  达到最大值的原因

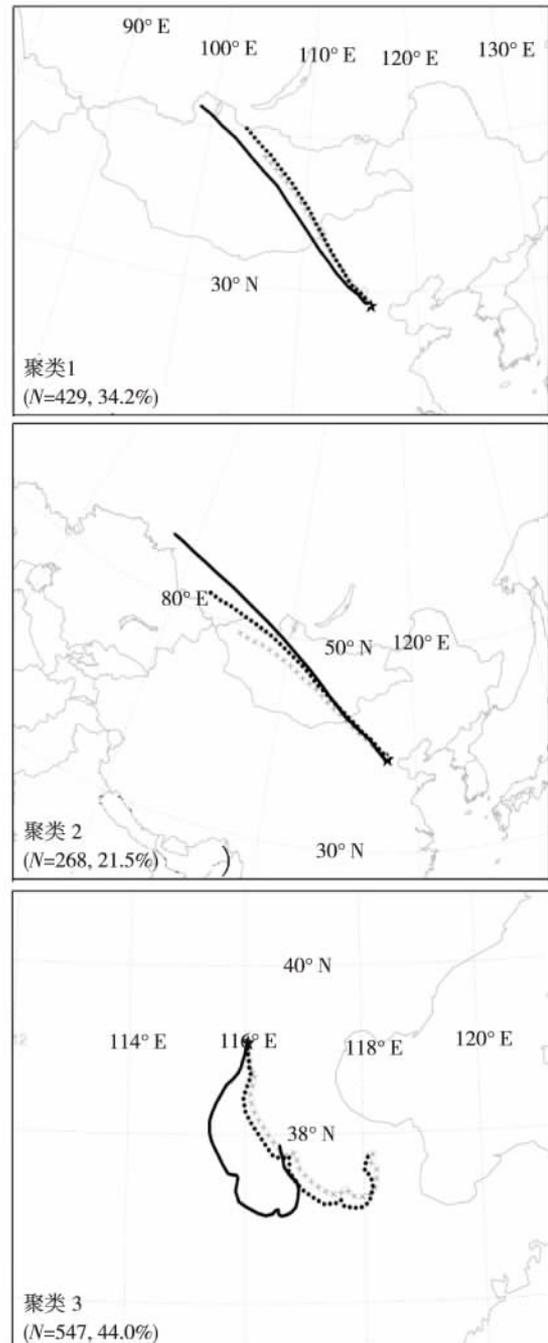


图 3 2004 年 8 月—2007 年 12 月, 每日 15:00 到达北京的后向 96 h 气流轨迹的 3 个聚类结果 (实线: 500 m; 点线: 100 m; 叉线: 10 m)

Fig. 3 The three air mass clusters identified from August 2004 to December 2007, each represented by 4-day back trajectories arriving at 15:00 in Beijing at heights of 500 m (real line), 100 m (dotted line) and 10 m (cross line)

与夏季较强的太阳辐射, 高温、湿度以及高浓度  $\text{NO}_x$ 、CO 和  $\text{VOC}_s$  等前体物也有密切联系<sup>[16-17]</sup>.

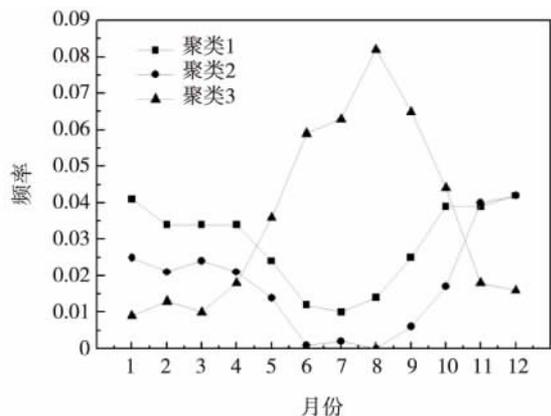


图4 2004年8月—2007年12月3个聚类各月出现频率

Fig. 4 Monthly frequency of each cluster from August 2004 to December 2007

表1 北京2004—2007年3个聚类类型的各种污染物在每日8:00—16:00的平均体积分数

Table 1 Mean pollutant volume fractions from 8:00 to 16:00 of each cluster during 2004—2007 in Beijing  $\times 10^{-9}$

聚类类型	$\varphi(\text{SO}_2)$	$\varphi(\text{NO})$	$\varphi(\text{NO}_2)$	$\varphi(\text{NO}_x)$	$\varphi(\text{O}_3)$
1	26.06	21.32	29.97	51.29	24.98
2	22.81	19.33	23.88	43.20	23.47
3	18.67	14.66	33.61	48.26	37.52

北京地区对比香港地区(海洋性气团造成夏季 $\varphi(\text{O}_3)$ 低值,而秋冬季 $\varphi(\text{O}_3)$ 高值由大陆性气团引起<sup>[18]</sup>)有明显差异.大陆性季风的影响通常使观测点 $\varphi(\text{O}_3)$ 增加,海洋性季风通常对 $\text{O}_3$ 起到稀释减小的作用<sup>[19-20]</sup>,而最终造成气团对污染物体积分数影响的一个关键因子是气团是否携带了大量污染物.中国南京地区受夏季海洋性气团控制时没有出现 $\varphi(\text{O}_3)$ 低值<sup>[21]</sup>,其原因可能是海洋性气团到达南京时携带了长三角地区排放的大量工业污染物.

### 2.2.2 采暖季气流输送对污染物体积分数的影响

为了更加明确地讨论气流运输对北京污染物体积分数的影响,避开随时间变化的局地排放等因素对污染物分类比较时的干扰,本文将气流输送对大气污染物体积分数的影响分采暖季和非采暖季分别进行了分析.采暖季和非采暖季与本文长达3年多的观测时段期限差异很大.因此在分析采暖季和非采暖季气流输送对北京大气污染物影响时,应对采暖季和非采暖季的后向气流轨迹分别进行聚类分析.根据北京冬季供暖的特点,一般是11月15日—次年3月15日之间供暖,所以将12月—次年2月

划分为采暖季,4—10月划分为非采暖季,3月和11月属过渡时期,不作划分<sup>[10]</sup>.

如图5所示,随着聚类数目的增加,聚类内变化量递减.聚类数目在4和5与7和8之间都有较明显的聚类内变化,并在5和8之后的聚类内变化量减小,其中4和5之间的聚类内变化幅度较7和8之间显著.考虑到聚类分析的聚类数目过大或过小都将不利于分析,本文将聚类分析的轨迹结果进行比较后,选择将采暖季后向气流轨迹分为5个聚类进行分析.这个分类结果与全研究时段的聚类结果相比聚类数目要多.

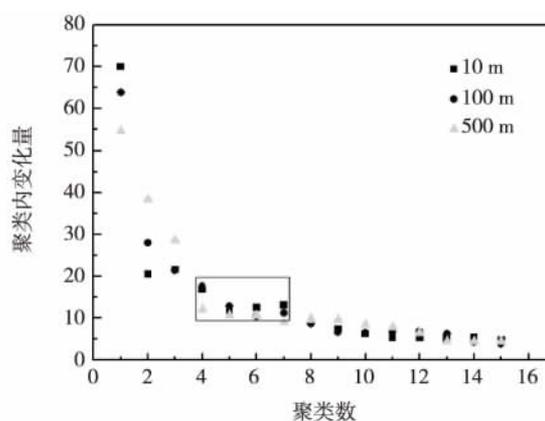


图5 采暖季各聚类数目对应的聚类内变化量

Fig. 5 The change of within-cluster variance with cluster number in cold seasons

图6为运用k均值分类法将北京研究时段内采暖季的后向气流轨迹进行聚类分析后得到的5类典型气流轨迹聚类<sup>[9]</sup>.每个轨迹聚类结果同样包括10、100、500 m 3层轨迹,各聚类的轨迹数目与所占百分比见图6.聚类1气流主要来自西西伯利亚中东部,向东南偏南方向,经贝加尔湖和蒙古中东部,穿越内蒙古及河北北部到达北京.跨越距离较长,风速较快.聚类2的气流主要来自于北京西北方向的内蒙古中部,跨度和风速都很小,途经河北西北部进入北京.聚类3的轨迹经度跨越最大,西伸至巴尔喀什湖,横穿蒙古,从西北偏西方向途经内蒙古、河北进入北京.图6显示聚类4的轨迹十分平直,由蒙古西部穿越蒙古整个南端,沿直线吹往北京.聚类5相较于聚类1,轨迹方向更加偏北,由贝加尔湖中部出发,向南经过我国内蒙古、河北抵达北京.聚类4和聚类5的风速相当,比聚类2风速大但比聚类1和聚类3风速小.

从图7研究时段采暖季的5个后向气流轨迹聚

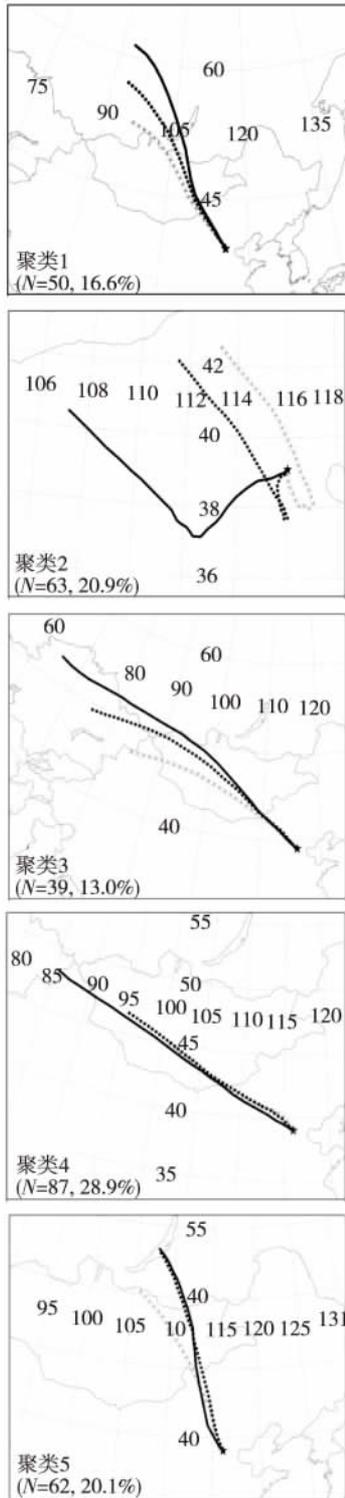
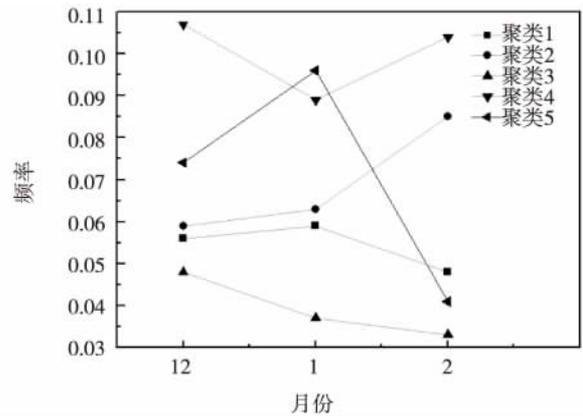


图6 研究时段采暖季每日15:00到达北京的后向96 h 气流轨迹的5个聚类结果 (实线: 500 m; 点线: 100 m; 叉线: 10 m)

Fig. 6 The five air mass clusters identified for cold seasons from August 2004 to December 2007, each represented by 4-day backward trajectories arriving at 15:00 in Beijing at heights of 500 m (real line), 100 m (dotted line) and 10 m (cross line)

类每月出现的频率可以看出, 聚类4 的频率最高, 1月略低于12月和2月. 聚类5 波动较大, 2月出现频率很小, 约0.04, 而1月超过0.095, 12月处于中间值. 聚类1 和聚类2 在12月与1月的出现频率相当, 约0.06, 2月聚类2 出现频率有所升高而聚类1 有所降低. 聚类3 在整个采暖季的出现频率都很低, 且从12月一次年2月呈依次下降的分布特征.



7 2004年8月—2007年12月采暖季5个聚类各月出现频率  
Fig. 7 Monthly frequency of each cluster in cold seasons from August 2004 to December 2007

表2 显示研究时段内采暖季5个聚类类型的各种污染物体积分数在每日8:00—16:00的平均值. 除O<sub>3</sub>外, 其余污染物体积分数最大值都集中在聚类2 且最小值都集中在聚类1. 从图6 各聚类的气流轨迹分析, 采暖季5个聚类的气流来向都是西北的内蒙古、蒙古、西伯利亚等空气较清洁的地区. 从各聚类轨迹的长度(表征聚类的气流速度)分析, 聚类1 和聚类3 是聚类结果中长度最长的2个聚类, 对应较快的风速. 聚类2 轨迹长度最短, 对应最慢的风速. 高速而清洁的气流, 能促进大气污染物的稀释扩散<sup>[7]</sup>, 这可以合理解释聚类1 和聚类2 的大部分污染物体积分数比其他聚类小, 而聚类2 大部分污染物体积分数较大. 聚类4 和聚类5 风速明显小于聚类1 和聚类3 而大于聚类2, 其大部分污染物体积分数处于中间值, 与其风速大小也能很好对应. 采暖季各聚类污染物体积分数对比结果显示在途经地区空气清洁程度相当的情况下, 聚类风速对污染物有较明显的影响, 风速越大对应的大部分污染物体积分数越小.  $\varphi(O_3)$  最低值出现在聚类2 的原因可能与该聚类高  $\varphi(NO)$  的滴注反应有关<sup>[16]</sup>, 因而  $\varphi(O_3)$  的分布特征与  $\varphi(NO)$  分布相反.

表2 北京2004—2007年采暖季5个聚类类型的各种污染物在每日8:00—16:00的平均体积分数

Table 2 Mean pollutant volume fractions from 8:00 to 16:00 of each cluster for cold seasons during 2004—2007 in Beijing  $\times 10^{-9}$

聚类类型	$\varphi(\text{SO}_2)$	$\varphi(\text{NO})$	$\varphi(\text{NO}_2)$	$\varphi(\text{NO}_x)$	$\varphi(\text{O}_3)$
1	23.10	14.27	19.04	33.31	20.70
2	58.75	54.96	40.34	95.30	8.94
3	31.56	29.54	25.52	55.06	17.62
4	43.61	31.47	25.63	57.10	12.16
5	38.98	32.31	29.28	61.59	12.87

2.2.3 非采暖季气流输送对污染物体积分数的影响

如图8所示,随着聚类数目的增加,聚类内变化量递减.聚类数目在4和5之间都有明显的聚类内变化,并在5之后的聚类内变化量显著减小.因此本文选择将非采暖季后向气流轨迹分为5个聚类进行分析.

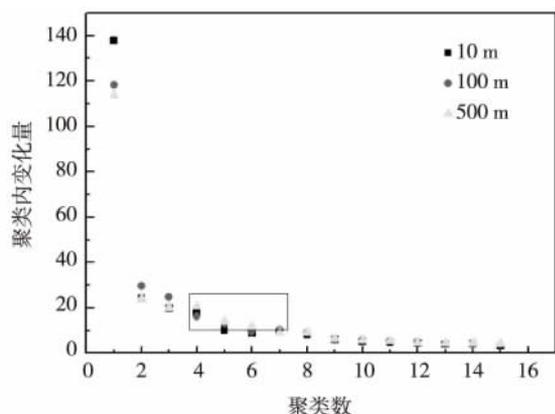


图8 非采暖季各聚类数目对应的聚类内变化量  
 Fig. 8 The change of within-cluster variance with cluster number in warm seasons

图9为运用k均值分类法将研究时段内非采暖季北京的后向气流轨迹进行聚类分析后得到的5类典型气流轨迹聚类<sup>[9]</sup>.每个聚类同样包括10、100、500 m 3层轨迹,各聚类的轨迹数目与百分比见图9.聚类1气流轨迹从中西伯利亚以南出发,穿越贝加尔湖和蒙古东部,向南经过内蒙古与河北西北部到达北京,距离较长,风速较大.聚类2轨迹距离较短(风速较小)从蒙古南端向东南偏东方向延伸,途经山西北部与河北中部地区,到达北京.聚类3从内蒙古中东部的乌珠穆沁草原出发,向南途经内蒙古和河北北部至北京,距离较短(风速较小).聚类4由山东半岛最南端向西北方向曲折延伸,穿越山东与河北中部直至北京.聚类5经纬跨度最广(距离最

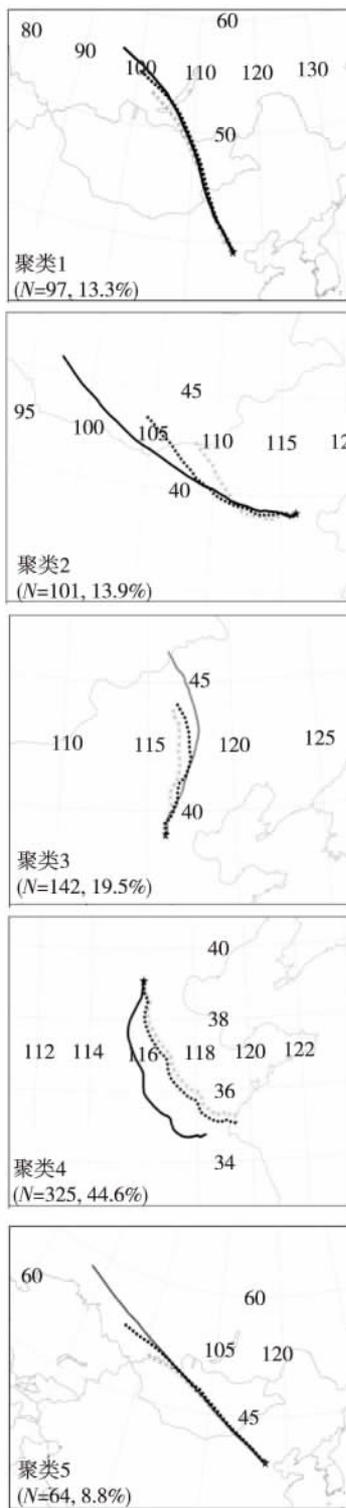


图9 研究时段非采暖季每日15:00到达北京的后向96 h气流轨迹5个聚类结果(实线:500 m;点线:100 m;叉线:10 m)

Fig. 9 The five air mass clusters identified for the warm seasons from August 2004 to December 2007, each represented by 4-day back trajectories arriving at 15:00 in Beijing at heights of 500 m (real line), 100 m (dotted line) and 10 m (cross line)

长, 风速最大), 从西西伯利亚中部沿直线往东南方向, 经蒙古中部、内蒙古中部和河北西北部, 抵达北京。

从图 10 研究时段非采暖季 5 个聚类每月出现的频率可以看出, 聚类 1、2 和 5 出现频率变化趋势一致, 并与图 5 中聚类 1 和 2 在 4—10 月的变化趋势大体上吻合。7、8 月出现频率偏低, 前后月份依次升高。聚类 3 在 7、8、9 月出现频率相对于其他月份要高, 在 8 月达到峰值, 其他月份聚类 3 的出现频率与聚类 1、2、4 相近。非采暖季大部分时段中频率出现最高的是聚类 4, 其出现频率呈现单峰型分布特征, 6、7 月达到峰值, 往前后月份依次降低。与图 4 显示的全研究时段的聚类 3 出现频率分布特征略微相似。

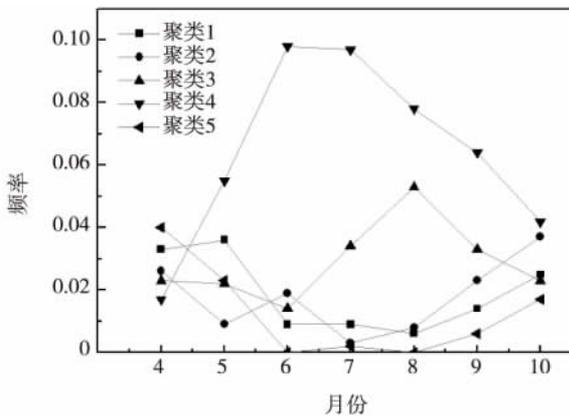


图 10 2004 年 8 月—2007 年 12 月  
非采暖季 5 聚类各月出现频率

Fig. 10 Monthly frequency of each cluster in warm seasons during August 2004 to December 2007

表 3 显示研究时段非采暖季 5 个聚类类型的各种污染物体积分数在每日 8:00—16:00 的平均值。除  $O_3$  外, 其余污染物体积分数最大值都集中在聚类 2 且最小值都集中在聚类 3。聚类 2 风速较小, 从蒙古出发的偏西气流经过了山西北部与河北中部大量排放工业废气地区<sup>[19-22]</sup>, 因此可能携带大量的气体污染物。风速不大的聚类 2 也不利于污染气体的扩散。这可能是造成聚类 2 中大部分污染气体体积分数明显高于其他聚类的原因。聚类 3 虽然风速并不大, 但是其大部分污染物体积分数却明显低于其他风速更大的聚类。这除了与聚类 3 所经过内蒙古中部草原地区的空气比较清洁有关, 还可能牵涉到其他影响北京大气污染物体积分数的因子。例如图 10 中显示聚类 3 在 7、8 月(夏天) 出现频率比较高, 这

段时间北京的大气层结比较不稳定, 降雨也较其他时段多。不稳定的大气结构和雨水对污染物的冲刷沉降作用<sup>[10]</sup> 可能也是使聚类 3 污染物体积分数较小的原因。相对于聚类 3, 聚类 4 在夏季出现的频率也比较高, 但是污染物体积分数普遍偏高。其原因可能是聚类 4 的气流轨迹曲折经过了山东、河北等排放工业废气严重地区<sup>[14-15]</sup>, 气流速度不大, 携带污染物的气流可能对北京地区大气污染物体积分数有增高的作用。图 9 显示聚类 5 和聚类 1 的距离较长(风速较大), 所经地区也基本属于空气较清洁的西伯利亚、蒙古地区。因此表 3 中聚类 1、5 对应的污染物体积分数都较小, 与气流输送影响效果基本相符。对于大部分污染物出现在了聚类 3 而不是出现在风速更大的聚类 1 和 5, 还需要进一步研究其原因。表 3 显示非采暖季对比于采暖季,  $\varphi(SO_2)$ 、 $\varphi(NO)$  和  $\varphi(NO_2)$  都有明显降低, 而  $\varphi(O_3)$  明显高于采暖季, 这与非采暖季节较强的太阳辐射、高气温、湿度以及  $NO_x$ 、CO 和 VOCs 等前体物存在的情况下发生光化学反应产生大量  $O_3$  有关<sup>[16-17]</sup>。 $\varphi(O_3)$  最高值出现在聚类 3, 最低值出现在聚类 5 的原因与这两聚类的  $\varphi(NO)$  是否会因滴注反应消耗大量  $O_3$  有关<sup>[16]</sup>。

表 3 北京 2004—2007 年非采暖季 5 个聚类类型的  
各种污染物在每日 8:00—16:00 的平均体积分数

Table 3 Mean pollutant volume fractions from 8:00 to 16:00 of each cluster for warm seasons during 2004—2007 in Beijing  $\times 10^{-9}$

聚类类型	$\varphi(SO_2)$	$\varphi(NO)$	$\varphi(NO_2)$	$\varphi(NO_x)$	$\varphi(O_3)$
1	11.11	10.92	27.27	38.19	34.66
2	<b>14.98</b>	<b>14.33</b>	<b>36.59</b>	<b>50.93</b>	36.80
3	<u>9.18</u>	<u>6.82</u>	<u>24.84</u>	<u>31.67</u>	<b>43.69</b>
4	12.18	9.50	34.57	44.06	41.28
5	10.81	13.16	30.76	43.92	<u>33.43</u>

### 3 结论

1) 北京城市大气中的  $\varphi(SO_2)$ 、 $\varphi(NO)$  和  $\varphi(O_3)$  都存在明显的单峰型季节变化,  $NO_2$  没有明显的季节变化规律。

2) 2004 年 8 月—2007 年 12 月, 北京地区的后向气流轨迹经合理地聚类分析可分为西北气流、西北高速气流和偏南低速气流 3 个聚类。聚类频率的月分布情况与北京季风气候特征相吻合。研究时段内的采暖季和非采暖季后向气流轨迹经合理聚类分析皆可分为 5 个聚类。采暖季的后向气流聚类基本

都来自西北方向,非采暖季后向气流轨迹来向主要包括南、北和西北方向,比采暖季轨迹来向多。

3) 由于随时间变化的局地排放因素影响,全研究时段的3个聚类污染物体积分数分布没有明显的规律。采暖季和非采暖季北京气体污染物体积分数高值都主要集中在风速较小的西北方气流影响下。采暖季污染物体积分数低值主要出现在偏北方风速较大的后向气流轨迹聚类。非采暖季污染物体积分数低值主要出现在偏北低速气流聚类和西北向高速气流轨迹聚类中。

4) 分采暖季和非采暖季分析气流输送对北京市大气污染物的影响,效果较为明显。从各时段不同聚类的污染气体体积分数分布上看,途经大片工业排放区的气流轨迹聚类使北京大气污染物在其影响下易达到高值。清洁高速的气流则通常使污染物体积分数降低。输送气流途经地区的空气质量对北京污染气体体积分数有一定的影响,而输送气流风速的大小则通过影响气体污染物的扩散强度,也能对北京地区的污染物体积分数起到一定的影响效果。

5) 非采暖季各聚类的气体污染物体积分数分布结果中,大部分污染物最小值出现在风速比较小的聚类3,而没有出现在风速更大而且发源地和途经地区都很清洁的其他气流聚类,说明北京地区大气污染物体积分数除了受气流输送的影响还受到其他因素的共同作用。这些因素可能包括不断变化的局地排放、不稳定的局地气象要素、城市所处的复杂地形等。需要对影响北京城市污染物体积分数的其他因素进行更深入的研究工作。

致谢:感谢中国科学院大气物理研究所长期进行观测工作的全体人员;感谢 NOAA 提供 HYSPLIT 模型。

## 参考文献

### References

- [1] Berntsen T, Isaksen I S A, Wang W C, et al. Impact of increased anthropogenic emission in Asia on tropospheric ozone and climate: A global 3-D model study [J]. *Chemical and Physical Methodology: Series B*, 1996, 48(1): 13-32
- [2] Zhang J, Wang T, Chameides W L, et al. Ozone production and hydrocarbon reactivity in Hong Kong, Southern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 2006 6(5): 8961-9002
- [3] 刘小红,洪钟祥,李家伦,等.北京地区严重大气污染的气象和化学因子[J].*气候与环境研究*,1999,4

(3): 231-236

LIU Xiaohong, HONG Zhongxiang, LI Jialun, et al. Meteorological and chemical parameters determining the photochemical air pollution in Beijing [J]. *Climatic and Environmental Research*, 1999, 4(3): 231-236

- [4] 徐祥德,丁国安,卞林根.北京城市大气环境污染机理与调控原理[J].*应用气象学报*,2006,17(6):815-828  
XU Xiangde, DING Guoan, BIAN Lingen. Beijing city air pollution observation experiment [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* 2006, 17(6): 815-828
- [5] Moody J L, Galloway J N. Quantifying the relationship between atmospheric transport and the chemical composition of precipitation on Bermuda [J]. *Chemical and Physical Methodology: Series B*, 1998, 40(5): 463-479
- [6] Cape J N, Methven J, Hudson L E. The use of trajectory cluster analysis to interpret trace gas measurements at Mace Head, Ireland [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(22): 3651-3663
- [7] 安俊琳,王跃思,孙扬.气象因素对北京臭氧的影响[J].*生态环境学报*,2009,18(3):944-951  
AN Junlin, WANG Yuesi, SUN Yang. Assessment of ozone variations and meteorological effects in Beijing [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(3): 944-951
- [8] 赵恒,王体健,江飞,等.利用后向轨迹模式研究 TRACE-P 期间香港大气污染物的来源[J].*热带气象学报*,2009,25(2):181-186  
ZHAO Heng, WANG Tijian, JIANG Fei, et al. Investigation into the source of air pollutants to Hong Kong by using backward trajectory method during the TRACE-P campaign [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2009, 25(2): 181-186
- [9] Baker J. A cluster analysis of long range air transport pathways and associated pollutant concentrations within the UK [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(4): 563-571
- [10] 安俊琳,王跃思,李昕,等.北京大气中 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO 和 O<sub>3</sub> 体积分数变化分析[J].*生态环境*,2007,16(6):1585-1589  
AN Junlin, WANG Yuesi, LI Xin, et al. Measurement on the atmospheric SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO and O<sub>3</sub> concentrations in Beijing [J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(6): 1585-1589
- [11] 安俊琳,王跃思,李昕,等.北京大气 O<sub>3</sub> 与 NO<sub>x</sub> 的变化特征[J].*生态环境*,2008,17(4):1420-1424  
AN Junlin, WANG Yuesi, LI Xin, et al. Characteristics of atmospheric O<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub> concentrations in the urban area [J]. *Ecology and Environment* 2008, 17(4): 1420-1424
- [12] Shan W P, Zhang J D, Huang Z X, et al. Characterizations of ozone and related compounds under the influence of maritime and continental winds at a coastal site in the Yangtze Delta [J]. *Atmospheric Research*, 2010, 97(1/2): 26-34
- [13] 恽耀南.北京志:气象卷[M].北京:北京出版社,1999:27  
YUN Yaonan. *Annals of Beijing: Meteorological volume* [M]. Beijing: Beijing Publishing House, 1999: 27
- [14] 苏秋实,王立本.山东省工业“三废”排放的库兹涅茨

- 特征研究[J]. 水土保持研究 2008, 15(3): 258-262  
SU Qiushi, WANG Liben. Study on the environmental Kuznets Curve characteristics of industrial "Three Wastes" in Shandong province [J]. Research of Soil and Water Conservation 2008, 15(3): 258-262
- [15] 刘德智, 蔡海标. 河北省工业废气排放与治理的实证分析[J]. 技术经济研究 2008(6): 41-43  
LIU Dezhi, CAI Haibiao. Demonstrative analysis on industrial waste gas discharge and control in Hebei province [J]. Study on Technical Economy 2008(6): 41-43
- [16] 姚小红, 何东全, 周中平, 等. 北京城市大气中 NO<sub>x</sub>、CO、O<sub>3</sub>的变化规律研究[J]. 环境科学, 1999, 20(1): 23-26  
YAO Xiaohong, HE Dongquan, ZHOU Zhongping, et al. The study on the variation of NO<sub>x</sub>, CO and O<sub>3</sub> in Beijing urban atmosphere [J]. Environmental Science, 1999, 20(1): 23-26
- [17] Jo W K, Park J H. Characteristics of roadside air pollution in Korean metropolitan city ( Daegu ) over last 5 to 6 years: Temporal variations, standard exceedances and dependence on meteorological conditions [J]. Chemosphere 2005, 59(11): 1557-1573
- [18] Chan L Y, Liu H Y, Lam K S, et al. Analysis of the seasonal behavior of tropospheric ozone at Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 1998, 32(2): 159-168
- [19] Saito S, Nagao I, Tanaka H. Relationship of NO<sub>x</sub> and NMHC to photochemical O<sub>3</sub> production in a coastal and metropolitan area of Japan [J]. Atmospheric Environment 2002, 36(8): 1277-1286
- [20] Chou C C-K, Liu S C, Lin C Y, et al. The trend of surface ozone in Taipei, Taiwan, and its causes: Implications for ozone control strategies [J]. Atmospheric Environment 2006, 40(21): 3898-3908
- [21] Tu J, Xia Z G, Wang H S, et al. Temporal variation in surface ozone and its precursors and meteorological effects at an urban site in China [J]. Atmospheric Research 2007, 85(3/4): 310-337
- [22] 马一方. 山西省环境空气污染现状及防治对策[J]. 山西能源与节能 2007(4): 27-29  
MA Yifang. The current condition and protection policy of atmospheric environment in Shanxi province [J]. Shanxi Energy and Conservation 2007(4): 27-29

## The impact of air transport pathways on pollutant concentrations in Beijing

CHEN Xu<sup>1</sup> AN Junlin<sup>1</sup> LIU Shixi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

**Abstract** Using the HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory( HYSPLIT ) model, three cluster analysis of 96 h back trajectories for August 2004 to December 2001 arriving at 15:00 pm in Beijing at three different arrival heights of 10, 100 and 500 m have been performed in order to better understand the impact of air transport pathways on urban air pollutant concentrations in cold and warm seasons. Three natural synoptic scale transport patterns were identified with westerly, strong-westerly and slow-easterly from August of 2004 to December of 2007. And five synoptic scale transport patterns were identified during cold seasons and warm seasons. With observational data taken from an urban site of Institute of Atmospheric physics, the impact of each transport pattern on air pollutant concentrations in Beijing were analyzed. The results show high atmospheric pollutant concentrations of both cold and warm seasons always appear in slow-northwestern pathways, the low pollutant concentrations of cold seasons appear in strong-northerly pathways and that of warm seasons appear in both slow-northerly pathways and strong-northwestern pathways. The analytic results indicate low pollutant concentration always appear in long-range transport pattern as the fast wind speed and air pathways from heavy polluted industrial region tend to increase the urban pollutant concentration in Beijing. The bias between the air transport pathway effect and the pollutant concentration distribution in warm seasons indicates that more study are needed on other potential factors effecting urban atmospheric pollutants.

**Key words** back trajectory; cluster analysis; air transport; air pollutant