

徐敬, 张小玲, 徐晓斌, 等. 2011. 大气传输对华北区域本底地区降水化学成分的影响 [J]. 气候与环境研究, 16 (1): 105–112. Xu Jing, Zhang Xiaoling, Xu Xiaobin, et al. 2011. Influence of atmospheric transportation on chemical compositions of precipitation in North China regional background area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (1): 105–112.

# 大气传输对华北区域本底地区降水化学成分的影响

徐敬<sup>1,2,3</sup> 张小玲<sup>1,4</sup> 徐晓斌<sup>2</sup> 于晓岚<sup>2</sup> 程红兵<sup>2</sup> 周怀刚<sup>4</sup>

1 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

4 北京上甸子大气成分本底国家野外站, 北京 101507

**摘 要** 对华北区域本底站 1999~2007 年 239 次降水过程的气流后向轨迹进行分类, 从中选取典型西北路径、西南路径和东南路径降水, 研究了不同输送路径下降水 pH 值、电导率、化学组成特征及影响本底地区的主要排放源。结果显示, 起源于我国中东部内陆地区途经太原、石家庄、北京等大城市的西南气流, 起源于蒙古国途经我国内蒙地区的西北气流, 以及源自海上途经我国东部部分沿海城市的东南气流是对上甸子本底站降水输送的 3 个主要路径。其中西南路径降水频次最高; 西南路径降水 pH 值最高、东南最低; 西北路径降水电导率最低、西南路径最高。 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  是影响华北区域降水化学性质的主导性离子, 西南路径中上述离子浓度明显高于其他方向路径; 土壤尘、农田排放、交通运输排放和燃煤排放是影响本底地区的主要排放源, 西北清洁路径下以自然源的影响为主, 而来自西南人类活动集中地区的输送对人为源影响体现突出, 如交通运输排放和燃煤排放。年际变化来看, 与 1999~2004 年相比, 2005~2007 年 pH 值呈降低趋势, 这与降水中碱性离子浓度的降低密切相关; 降水等级划分的统计结果显示, 随着雨量的增大, 酸雨出现率逐渐增多, 电导率及测得的全部离子成分逐渐降低。

**关键词** 传输 本底 降水化学

**文章编号** 1006-9585 (2011) 01-0105-08 **中图分类号** P412 **文献标识码** A

## Influence of Atmospheric Transportation on Chemical Compositions of Precipitation in North China Regional Background Area

XU Jing<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Xiaoling<sup>1,4</sup>, XU Xiaobin<sup>2</sup>, YU Xiaolan<sup>2</sup>,  
CHENG Hongbing<sup>2</sup>, and ZHOU Huaigang<sup>4</sup>

1 *The Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089*

2 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

4 *Shangdianzi National Station for Atmospheric Background Observation, Beijing 101507*

**Abstract** The backward trajectories of 239 precipitation processes from 1999 to 2007 at North China regional atmospheric background station were classified. Typical north-west, south-west and south-east backward trajectory

**收稿日期** 2009-08-21 收到, 2010-12-10 收到修定稿

**资助项目** 中国气象局公益性行业(气象)科研专项 GYHY20080602

**作者简介** 徐敬, 女, 博士研究生, 工程师, 主要从事大气环境的监测和研究工作。E-mail: jxu07@126.com

precipitation samples were selected to research the characters of the precipitation pH, electrical conductivity, chemical composition, and the main sources affect the background area. Results showed that the south-west backward trajectory coming from the east-central inland area of China, passing through Taiyuan, Shijiazhuang, and Beijing, the north-west trajectory coming from Mongolia, passing through inner Mongolia area, and the south-east trajectory coming from oceanic area, passing through east coastal cities were the main backward trajectories affecting the precipitation at Shangdianzi station. The precipitation frequency in the south-west trajectory was the highest. The pH peaked in the south-west transportation direction and reached a minimum in the south-east. The electrical conductivities reached a maximum in the south-west transportation direction and a minimum in the north-west.  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , and  $\text{Ca}^{2+}$  were the major ions of precipitation at Shangdianzi. The concentrations of the major ions of the south-west trajectory samples were much higher than that of the other directions. Soil dust, farm emission related to fertilization, pollutants from traffic and coal combustion emission were the main four sources identified affecting the background area. The natural source was the primary source affecting the background area in the north-west clean transportation direction, while the anthropogenic sources were more notable in the south-west transportation direction, such as traffic and coal combustion emission. Compare to 1999–2004, the averaged pH decreased from 2005 to 2007, which attributes to the decreasing of the concentrations of alkaline ions in precipitation. The results show that rainfall is significant for the conductivity, acid rain frequency, and the components of the precipitation. The values of conductivity and components concentration decrease and the acid rain frequency increase as the rainfall increase gradually.

**Key words** transportation, background, precipitation chemistry

## 1 引言

清除过程是自然界维持自身平衡、消除大气污染物的汇机制,其中湿沉降是大多数组分从大气中去除的快速、有效途径。近年来,随着城市化进程的推进,尤其是机动车数量的快速增长,我国很多大城市呈现煤烟和机动车尾气并重的污染趋势,颗粒物成为首要污染物。降水过程作为大气颗粒物重要的去除方式之一,其化学组分的变化在一定程度上反映了大气污染的特征。酸雨作为严重威胁人类生存环境的重要问题之一,从上世纪 70 年代起就成为环境保护和科学研究关注的重要领域。目前我国在降水化学成分、酸性成因(吴甫成等, 2000; 胡敏等, 2005; 林雨霏等, 2005; 刘君峰等, 2006)以及酸雨的气象条件特征(刘宝章等, 1998; 林长城等, 2005; 樊琦等, 2008)等方面有了较深入的研究,但对区域背景地区降水化学特征的研究较少。杨东贞等(2002)、丁国安等(2004)和汤洁等(2007)等利用在上甸子本底站获取的降水资料,揭示了华北区域本底地区阶段性降水成分特征和酸雨的变化趋势,徐敬等(2008)对降水化学成分的来源做了探讨,目前尚未见输送对华北本底地区降水

化学影响方面的报道。

从天气学角度来讲,大气辐合、上升运动以及水汽条件是产生降水不可或缺的 3 个主要因素。降水预报通常采用 850 hPa (1500 m 左右)的风场来表征低层大气的水平运动状态,分析辐合产生的条件。大气的水平运动既是空气团本身的运动过程,同时也包含了大气组分的迁移过程。降水化学成分受云中和云下化学过程的影响,其中降水在云下对污染物的冲刷过程对其化学成分的影响更为显著。上甸子本底站是 WMO-GAW 区域本底观测站之一,由于其所处的特殊地理位置,其大气成分浓度水平一方面反映了我国华北地区不受局地人类排放直接污染的清洁背景水平,另一方面在大气传输的作用下也不可避免的受到人类活动集中地区的输送影响(刘洁等, 2008)。大气中酸性物质的迁移和扩散是形成酸雨的重要原因之一(王艳等, 2006),因此,酸雨作为区域性污染问题,特别是开展大气输送对本底地区降水化学成分影响的研究,对研究华北区域对流层内污染物的传输、转化有重要的科学意义。

本文对上甸子本底站主要降水季节的气流轨迹进行统计归类,并在此基础上研究了不同输送路径下的降水 pH 值、电导率和化学组成特征。

将广泛应用于颗粒物来源研究 (Huang et al., 2002; Lee et al., 1999; Chueinta et al., 2000) 的 PMF (Positive Matrix Factorization) 方法引入到降水成分的分析中, 有效地揭示了不同输送路径对区域本底降水化学成分产生的影响。

## 2 采样和分析

### 2.1 样品的采集、分析和保存

本文采用的降水资料来自中国气象局的上甸子区域大气本底污染监测站 (刘洁等, 2008), 资料选自 1999~2007 年主要降水季节 (5~9 月), 样品由人工采集。降水的 pH 值用上海精密科学仪器有限公司生产的 pH 计 (PHS-3B 型), 精度为  $\pm 0.01\text{pH}$  单位。金属阳离子 ( $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ ) 用原子吸收分光光度计 (Hitachi 180-70) 检测, 检测限  $0.02 \times 10^{-6} \sim 0.2 \times 10^{-6}$ ,  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$  用 DIONEX-500 型离子色谱仪检测, 检测限为  $0.05 \times 10^{-6} \sim 0.1 \times 10^{-6}$ 。由于  $\text{F}^-$  离子浓度水平较低, 部分结果低于检测限, 故文中该离子未参与统计和计算。pH 值在降水样品采集后经平衡立即在站上的实验室测量, 离子分析由中国气象科学研究院大气化学实验室完成, 分析前样品在  $4^\circ\text{C}$  条件下用经处理的聚乙烯瓶避光保存。实验室每年参加世界气象组织的质量考核, 多年考核结果优良。

### 2.2 气流轨迹分析

气流轨迹反映了大气气团在一定时间内的运动路线, 据此可以分析降水气团的来源和路径。本文利用美国国家海洋与大气局 (NOAA) 空气资源实验室 ARL (Air Resources Laboratory) 和澳大利亚墨尔本气象研究中心联合开发的混合型单粒子拉格朗日综合轨迹模式 HYSPLIT (Draxler et al., 1992, 1997) 对引起每次降水的大气气团进行后向气流轨迹模拟。气流轨迹通过网站 <http://www.arl.noaa.gov/ready/open/hysplit4.html> [2008-08-07] 在线计算, 气象数据选用 FNL 数据库中的相关资料。轨迹的起始时间为每次降水过程的开始时刻, 每隔 6 小时计算一次轨迹, 每次的后向延伸时间为 72 h, 起始高度为 1500 m。

## 3 结果

### 3.1 气流轨迹统计结果

气流轨迹统计结果显示, 上甸子本底站的降水输送路径主要有 3 个方向, 分别为: 西南路径、西北路径和东南路径。为了使分析结果更具代表性, 从 1999~2007 年本底地区降水集中月份 (5~9 月) 获取的 239 个降水样品中选取了典型西南路径的降水样本 67 个、西北路径降水样本 46 个、东南路径降水样本 44 个, 上述 3 个输送路径的降水样本占总数量的 65.7%, 其中西南路径的降水频率最高, 占总降水数量的 28%。图 1 显示了 3 个输送方向上选取的气流轨迹, 从图中可以看出, 西北路径气流多起源于蒙古国, 途经我国内蒙和河北西北部地区; 西南路径气流多起源于我国中东部内陆地区, 途经山西、河南、河北西南部、北京等地; 东南气流多来自海上, 途经山东半岛、河北东南部以及天津等地影响本底地区。对比 3 个主要路径的输送轨迹, 西北气流来自人口密度小、经济相对欠发达地区; 东南气流源于海上, 途经我国东部的部分沿海城市, 其输送路径相对清洁; 西南气流途经了我国内陆人口和工业集中的重要省份, 也是我国环境问题较突出的地区。以下分析从上述 3 个输送路径的分类出发, 探讨输送对本底地区降水化学成分的影响。

### 3.2 pH 值、电导率和化学组成

#### 3.2.1 降水量和降水化学成分的关系

在酸雨观测中发现: 不同雨量下的降水酸度相差各异。以每次酸雨观测所取得的雨量  $R$  按 4 个等级 (小雨:  $0.1\text{ mm} \leq R < 10\text{ mm}$ ; 中雨:  $10\text{ mm} \leq R < 25\text{ mm}$ ; 大雨  $25\text{ mm} \leq R < 50\text{ mm}$ ; 暴雨:  $R \geq 50\text{ mm}$ ) 进行划分, 并对不同雨量等级下降水的 pH 平均值、酸性降水频率、电导率以及化学组分的变化情况进行分析, 结果见表 1。由表 1 可见: 4 个雨量等级的降水 pH 值均低于 5.60, 均为酸雨, 其中中雨的降水酸度最高为 4.49, 不同等级的 pH 平均值差别不显著; 酸雨出现率随雨量增大逐渐增多, 雨量达到中雨以上时酸雨出现率维持在 50% 以上, 当雨量达到暴雨时, 酸雨的频率达到了 66.67%; 电导率及测得的全部离子成分均随雨量增大逐渐降低。通过上面的分析可

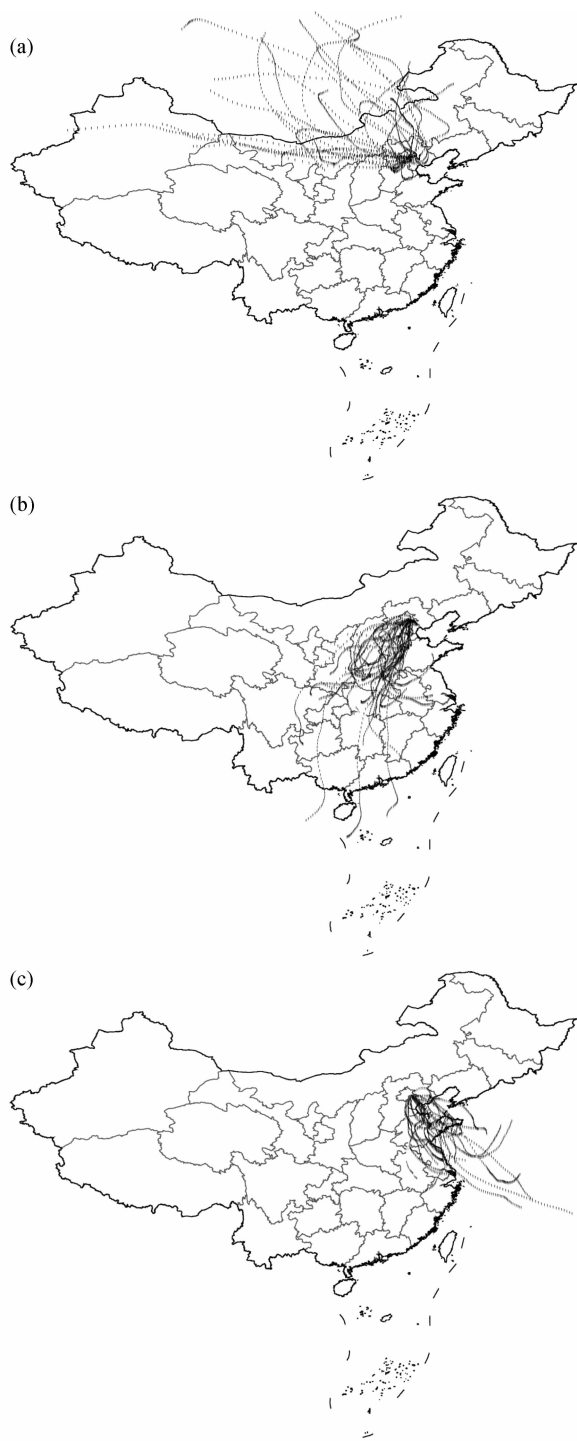


图1 后向气流轨迹: (a) 西北路径; (b) 西南路径; (c) 东南路径

Fig. 1 Backward trajectories: (a) North-west pathway; (b) south-west pathway; (c) south-east pathway

以看出,随着雨量的增大,大气中的污染物逐渐被清除,气溶胶中的碱性离子浓度逐渐降低,从而降低了对降水酸性的中和作用,因此随着雨量

的增大酸性降水频率上升。

### 3.2.2 不同输送路径下 pH 值、电导率和化学组成的平均值

以降水量为权重进行加权平均得出了各要素在不同输送路径下的统计结果(表2),并计算了主要离子成分的标准偏差(表3)。通过表2中pH值的对比得出,西南方向pH值最高、东南方向最低,3个方向平均为5.58,该结果与北京城、近郊区5.52的平均水平接近(金蕾等,2006)。李祚泳(1999)的研究结果表明,北京地区降水pH值不但受酸性离子 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{NO}_3^-$ 浓度的影响,而且也强烈地受碱性离子 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{NH}_4^+$ 浓度的影响。表2中来自西南输送路径下测得 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{NH}_4^+$ 浓度明显高于其他方向,推断西南输送方向下pH值偏高的情况可能源于碱性离子的中和作用。

降水的电导率可以用来判断降水受污染的程度,电导率越高污染程度越大。通过3个主要输送路径下测得的电导率结果对比得出,受西北气流输送影响的降水电导率为 $42.0 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,明显低于其余2个方向;电导率最高值出现在西南气流输送影响的降水中,为 $64.7 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。本底站来自西北清洁地区气流输送下测得的降水电导率与我国降水背景点瓦里关山测得的平均电导率 $14.8 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 相比仍明显偏高(汤洁等,2000),说明上甸子作为区域本底站其降水化学成分明显地受大气污染影响,其中来自人类活动集中区的西南输送影响最为显著。

表2中主要水溶性离子浓度测量结果显示, $\text{SO}_4^{2-}$ 在3个输送路径下均为浓度最高的阴离子,其次为 $\text{NO}_3^-$ ,说明 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{NO}_3^-$ 是降水中主导性的酸性离子; $\text{NH}_4^+$ 是浓度最高的阳离子,其次为 $\text{Ca}^{2+}$ ;  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{NH}_4^+$ 是影响华北区域降水化学性质的主导性离子;从3个输送方向对比来看,西南输送路径下测得的上述4种主要离子浓度明显高于其他2个方向,其余离子浓度水平接近。西北、西南和东南输送路径下 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 比值分别为1.6、1.7和1.8,均低于1994年北京市的平均值3.7(王文兴和张婉华,1997)。尽管我国能源结构调整后燃煤导致的 $\text{SO}_2$ 排放量增长得到了控制,但同时由于经济快速发展引发的大量能源需求以及汽车保有量的增加导致了 $\text{NO}_x$ 排放量迅速增长。因此,北京呈现煤烟污染

表 1 不同降雨量等级下 pH 值、酸性降水频率、电导率以及化学组分的平均结果  
Table 1 The averaged values of pH, acid rain frequency, conductivity, and chemical component concentrations of precipitation according to different rainfall ranges

|    | pH 值 | 酸性降水频率 | 电导率<br>/ $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ | 离子浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ |                 |                    |                 |                  |                  |              |               |
|----|------|--------|---------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|--------------------|-----------------|------------------|------------------|--------------|---------------|
|    |      |        |                                             | $\text{Cl}^-$                         | $\text{NO}_3^-$ | $\text{SO}_4^{2-}$ | $\text{NH}_4^+$ | $\text{Mg}^{2+}$ | $\text{Ca}^{2+}$ | $\text{K}^+$ | $\text{Na}^+$ |
| 小雨 | 4.60 | 44.19% | 73.41                                       | 0.84                                  | 6.48            | 11.65              | 5.13            | 0.53             | 3.64             | 0.63         | 0.47          |
| 中雨 | 4.49 | 51.36% | 65.50                                       | 0.69                                  | 4.96            | 8.53               | 4.07            | 0.34             | 3.07             | 0.58         | 0.26          |
| 大雨 | 4.78 | 59.25% | 44.86                                       | 0.34                                  | 3.29            | 6.51               | 3.15            | 0.22             | 2.22             | 0.33         | 0.13          |
| 暴雨 | 4.53 | 66.67% | 42.20                                       | 0.21                                  | 2.36            | 5.44               | 2.08            | 0.13             | 1.21             | 0.19         | 0.10          |

表 2 不同输送路径下 pH 值、电导率和化学组分的平均结果  
Table 2 Average values of pH, conductivity, and chemical compositions for different transportation pathways

|      | pH 值 | 电导率<br>/ $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ | 离子浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ |               |                  |                  |                 |                    |                 |               |
|------|------|---------------------------------------------|---------------------------------------|---------------|------------------|------------------|-----------------|--------------------|-----------------|---------------|
|      |      |                                             | $\text{K}^+$                          | $\text{Na}^+$ | $\text{Ca}^{2+}$ | $\text{Mg}^{2+}$ | $\text{NH}_4^+$ | $\text{SO}_4^{2-}$ | $\text{NO}_3^-$ | $\text{Cl}^-$ |
| 西北路径 | 5.43 | 42.0                                        | 0.36                                  | 0.26          | 2.68             | 0.31             | 3.97            | 6.62               | 4.11            | 0.50          |
| 西南路径 | 5.73 | 64.7                                        | 0.46                                  | 0.20          | 3.23             | 0.28             | 4.50            | 9.11               | 5.25            | 0.49          |
| 东南路径 | 5.29 | 61.9                                        | 0.60                                  | 0.23          | 2.56             | 0.32             | 3.43            | 7.31               | 4.03            | 0.69          |
| 平均   | 5.58 | 56.2                                        | 0.47                                  | 0.23          | 2.82             | 0.30             | 3.96            | 7.68               | 4.46            | 0.56          |

表 3 3 个输送路径下离子成分的标准偏差  
Table 3 Standard deviation of ions for each transportation pathway

| 路径 | $\text{Cl}^-$ | $\text{NO}_3^-$ | $\text{SO}_4^{2-}$ | $\text{NH}_4^+$ | $\text{Mg}^{2+}$ | $\text{Ca}^{2+}$ | $\text{K}^+$ | $\text{Na}^+$ | $\text{H}^+$ |
|----|---------------|-----------------|--------------------|-----------------|------------------|------------------|--------------|---------------|--------------|
| 西北 | 0.67          | 3.92            | 4.84               | 5.18            | 0.37             | 4.15             | 0.35         | 0.48          | 0.00         |
| 西南 | 0.58          | 4.73            | 6.68               | 3.79            | 0.28             | 3.05             | 0.42         | 0.22          | 0.00         |
| 东南 | 0.67          | 3.57            | 6.00               | 4.56            | 0.77             | 3.29             | 0.50         | 0.43          | 0.00         |

和机动车尾气污染并存的污染特征，其中非采暖季节  $\text{NO}_x$  排放引发的环境问题较  $\text{SO}_2$  污染更为突出。 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  主要是  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  经过液相或气相氧化后进入降水的，气溶胶无机组分与相关气体的浓度变化之间存在密切的关系（胡敏等，2005；周福民等，2002）。已有的研究结果显示，自 1990 年代以来北京地区降水中  $\text{NO}_3^-$  浓度的增长速度高于  $\text{SO}_4^{2-}$ （王文兴和张婉华，1997；胡敏等，2005），故通过前面的分析大体可以推断出区域大气污染类型的转变对本底地区降水化学成分的影响。

4 来源解析

为了检验不同输送路径下所获得的降水样品组分间的显著性差异，对主要离子成分  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  进行了显著性检验。结果显示，西南和西北输送路径下获取的样本中  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  通过了 95% 置信度的检验，其余离子成分在各输送路径样本中没有呈现显著性差异。造成这

种现象的可能原因在于， $\text{Ca}^{2+}$  是土壤尘的代表元素， $\text{NH}_4^+$  与氮肥引起的农田氨排放有关，上甸子本底站周边是大范围的农田、果园，因此对降水成分来说局地来源的贡献在某种程度上掩盖了输送的影响。为了进一步探讨不同输送路径对本底站降水化学成分的影响，采用了 PMF 方法（徐敬等，2008）对降水成分的来源进行了解析。该方法与 PCA（Principal Component Analysis）和 FA（Factor Analysis）等因子分析方法相同，是一种基于受体模型的多元统计分析方法，尽管 PMF 方法较其它因子分析方法具有一定的优势，但也同样存在因子分析方法共同的缺陷：即如何确定因子数？本文的选取原则为（Yakovleva et al., 2000）：第一，解析结果的残数值大部分在  $-3.0 \sim 3.0$  之间（图 2）；第二，随着因子数的调整，计算结果趋于稳定（Q 值变化幅度降低）[Q 值为加权残数平方和，其具体意义参见徐敬等（2008）]（图 3）。基于上述原则，西北、西南、东南输送路径最终都确定了 4 个因子。

图 4 是 3 个输送路径下的解析结果，其中因

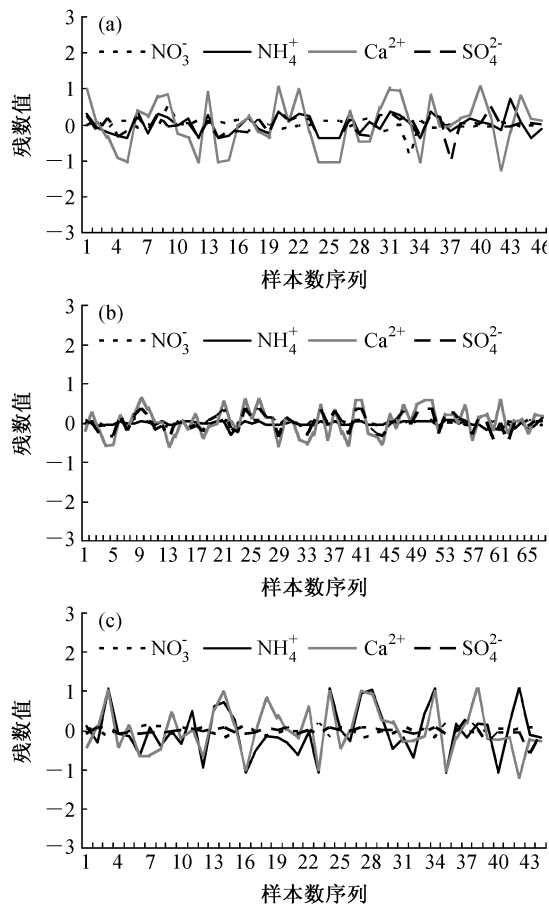


图2 典型离子的残数值: (a) 西北路径; (b) 西南路径; (c) 东南路径  
Fig. 2 Residual values of typical ions for different transportation pathways: (a) North-west; (b) south-west; (c) south-east

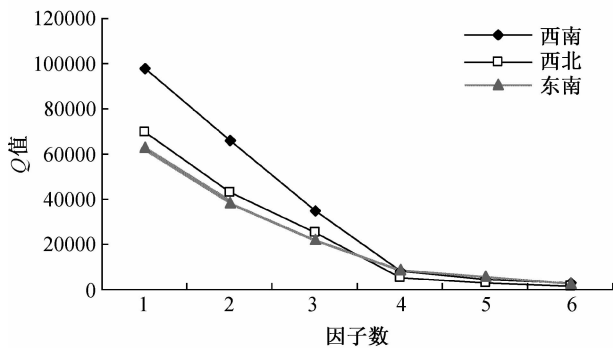


图3 Q 值随因子个数的分布  
Fig. 3 Distribution of Q value with the numbers of factors

子的排序代表了它们的重要性顺序, 各因子中不同成分 EV 值 [EV 值为某种成分总解释的加权变分, 其具体含义参见徐敬等 (2008)] 高低相当于相应因子对解释这些成分的显著度。解析结果显

示, 3 个输送路径下所获得的 EV 值最高的 4 种离子均为  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$ 。 $\text{Ca}^{2+}$  离子是土壤的典型代表物元素;  $\text{SO}_4^{2-}$  离子主要与燃煤排放的  $\text{SO}_2$  转化有关;  $\text{NH}_4^+$  主要来自气态氨的转化, 与氮肥引起的农田氨排放有关;  $\text{NO}_3^-$  离子来源于高浓度的  $\text{NO}_x$  在大气中经过化学转化形成的可溶于水的硝酸或硝酸盐, 代表的是  $\text{NO}_x$  人为源的影响, 如汽车尾气等。根据不同离子对排放源的指示性意义, 可以推断出土壤尘、燃煤排放、农田施肥排放和交通运输排放是影响本底地区降水化学成分的主要排放源。具体分析来看, 尽管 3 个主要输送路径下解析出的源的种类相同 (表 4), 但他们在不同路径中相对重要性的排序不同。通过对比可以看到, 西北清洁路径下土壤尘的影响位居全部因子首位, 西南路径中交通排放的影响位居首位, 且燃煤排放的影响也较西北路径突出。东南路径的解析结果与西北路径的结果十分接近, 可能与北京特殊地形条件下, 东南路径所反映的气流输送信息较为复杂有关, 解析结果有待验证。

表 4 3 个输送路径解析得出的主要影响源及排序  
Table 4 Main sources and their orders for different transportation pathways

| 输送<br>路径 | 主要影响源及排序 |        |        |        |
|----------|----------|--------|--------|--------|
|          | 因子 1     | 因子 2   | 因子 3   | 因子 4   |
| 西北       | 土壤尘      | 农田施肥排放 | 交通运输排放 | 燃煤排放   |
| 西南       | 交通运输排放   | 土壤尘    | 燃煤排放   | 农田施肥排放 |
| 东南       | 农田施肥排放   | 土壤尘    | 交通运输排放 | 燃煤排放   |

结合不同路径中降水成分的显著性分析可以推断出, 西北路径输送和西南路径输送对本底地区降水化学成分的影响存在明显的不同, 西北路径多以自然源为主, 而西南路径中人为源排放, 如交通运输排放和燃煤排放的影响较突出。

需要指出的是, 降水成分受云中中和云下化学过程的影响, 就某一地区来说降水的水汽主要是从外部流入的, 而不同高度层次上大气运动轨迹各不相同, 本文选取低层大气水平运动代表性层及大气污染物的主要运输高度 (1500 m) (张峥和孟广礼, 1992) 的气流运动轨迹来描述整个降水过程的来源方向是一种简化处理的办法; 此外, 垂直运动是降水形成的重要大气动力学特征, 随着辐合上升运动局地及天气尺度范围内的地面污

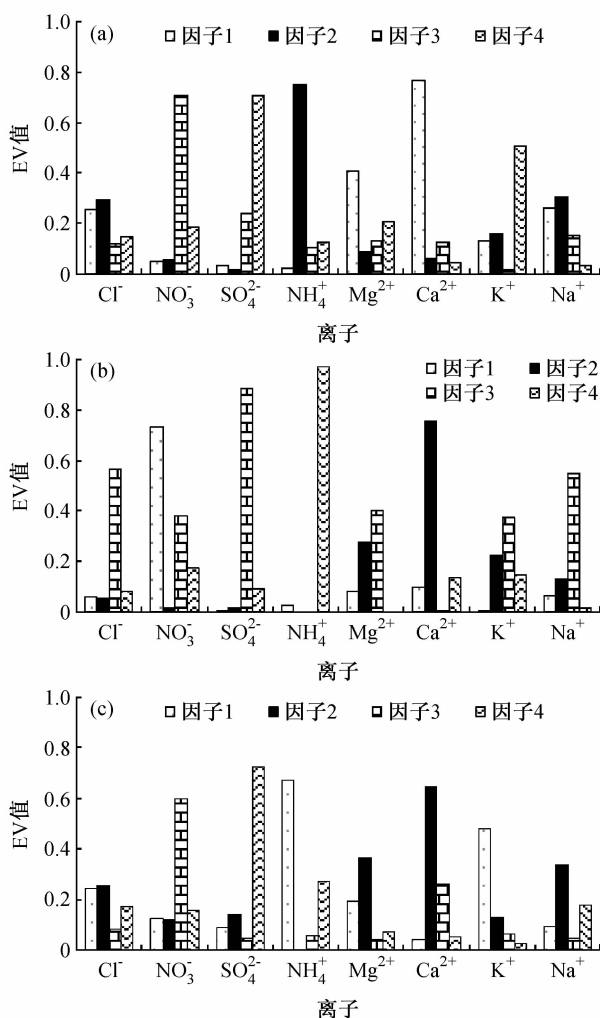


图4 因子分析结果：(a) 西北路径；(b) 西南路径；(c) 东南路径。图中因子1至因子4与表4中的主要影响源排序相对应  
Fig. 4 Results of source identification; (a) North-west pathway; (b) south-west pathway; (c) south-east pathway. Factors 1 to 4 correspond to the main sources showed in table 4

染物被携带至上空，而后随着降水的形成逐渐清除，势必会影响降水的成分及性质，但受观测资料及篇幅的限制，本文的研究难于全面的体现输送的影响。此外，受PMF方法的局限，本文仅对主要输送方向下可能的排放源的相对重要性进行了探讨，就输送对本底地区降水化学成分的影响问题，特别是在污染来源的具体种类、位置及影响程度等方面还需要更深入的研究工作。

## 5 结论

(1) 西南、西北和东南气流输送降水是上甸

子本底站降水输送的3个主要路径，其中西南路径降水频次最高。

(2) 3个输送路径下测得的pH值为西南路径最高、东南路径最低；西北路径降水电导率最低，西南路径降水电导率最高； $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{NH}_4^+$ 是影响华北区域降水化学性质的主导性离子，其中西南输送路径下测得主要离子浓度明显高于其他2个方向，3个输送路径下 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 比值接近；降水等级划分的统计结果显示，随着雨量的增大，酸雨出现率逐渐增多，电导率及测得的全部离子成分逐渐降低，但pH平均值差别不显著。

(3) PMF解析结果显示，土壤尘、农田排放、交通运输排放、燃煤排放是影响本底地区降水化学成分的主要排放源；西北输送路径下以自然源的影响为主，而西南路径下人为排放源的影响较突出，如交通运输排放和燃煤排放。

**致谢** 感谢上甸子本底站工作人员在观测资料收集过程中的辛勤劳动；感谢马志强博士在资料整理过程中提供的帮助。

## 参考文献 (References)

- Chueinta W, Hopke P K, Pzacero P. 2000. Investigation of source of atmospheric aerosol at urban and suburban residential areas in Thailand by positive matrix factorization [J]. *Atmos. Environ.*, 34: 3319–3329.
- 丁国安, 徐晓斌, 王淑凤, 等. 2004. 中国气象局酸雨网基本资料数据集及初步分析 [J]. *应用气象学报*, 15 (增刊): 85–94.
- Ding Guoan, Xu Xiaobin, Wang Sufeng, et al. 2004 Database from the acid rain net work of China meteorological administration and itr preliminary analysis [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 15 (Suppl.): 85–94.
- Draxler R R. 1992. Hybrid single particle Lagrangian trajectories (HYSPLIT): Version 3.0 – user's guide and model description [R]. NOAA Technical Memo. ERL ARL-195.
- Draxler R R. 1997. Description of the HYSPLIT4 modeling system [R]. NOAA Technical Memo. ERL ARL-224.
- 樊琦, 范绍佳, 钟流举, 等. 2008. 华南地区典型酸雨过程气象条件的数值模拟 [J]. *中国环境科学*, 28 (3): 279–283.
- Fan Qi, Fan Shaojia, Zhong Liuju, et al. 2008. Numerical simulation of the meteorological conditions for a typical acid rain process in South China area [J]. *China Environmental Science (in Chinese)*, 28 (3): 279–283.
- Huang S, Rahn K A, Arimoto R. 2002. Testing and optimizing

- two factor-analysis techniques on aerosol at Narraganett, Rhode Islan [J]. *Atmos. Environ.*, 23 (6): 11–16.
- 胡敏, 张静, 吴志军. 2005. 北京降水化学组成特征及其对大气颗粒物的去除作用 [J]. *中国科学 (B 辑)*, 35 (2): 169–176.
- Hu Min, Zhang Jing, Wu Zhijun. 2005. Chemical compositions of precipitation and scavenging of particles in Beijing [J]. *Science in China (Ser. B) (in Chinese)*, 35 (2): 169–176.
- 金蕾, 徐谦, 林安国, 等. 2006. 北京市近二十年 (1987~2004) 湿沉降特征变化趋势分析 [J]. *环境科学学报*, 26 (7): 1195–1202.
- Jin Lei, Xu Qian, Lin Anguo, et al. 2006. Trend analysis of wet deposition between 1987–2004 in Beijing city [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 26 (7): 1195–1202.
- Lee E, Chan C K, Paatero P. 1999. Application of positive matrix factorization in source apportionment of particulate pollutants in Hong Kong [J]. *Atmos. Environ.*, 33: 3201–3212.
- 李祚泳. 1999. 我国部分城市降水中离子浓度与 pH 值的关系研究 [J]. *环境科学学报*, 19 (3): 303–306.
- Li Zuoyong. 1999. Relationship between ion concentration and pH in precipitation in number of Chinese cities [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 19 (3): 303–306.
- 林长城, 林详明, 邹燕, 等. 2005. 福州气象条件与酸雨的关系研究 [J]. *热带气象学报*, 21 (3): 330–336.
- Lin Changcheng, Lin Xiangming, Zou Yan, et al. 2005. Study on the relationship between meteorological conditions and acid rain in Fuzhou, Fujian province [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 21 (3): 330–336.
- 林雨霏, 刘素美, 纪雷, 等. 2005. 舟山群岛降水中阴离子及 pH 值的特征分析 [J]. *环境科学*, 26 (5): 49–54.
- Lin Yufei, Liu Sumei, Ji Lei, et al. 2005. Characteristic analysis on the anions and pH profiles of rain water of Zhoushan archipelago [J]. *Environmental Science (in Chinese)*, 26 (5): 49–54.
- 刘宝章, 李金龙, 王敬云, 等. 1998. 青岛地区边界层特征及酸雨成因 [J]. *环境科学学报*, 18 (1): 39–44.
- Liu Baozhang, Li Jinlong, Wang Jingyun, et al. 1998. Character of the boundary layer and cause of acid rain in the Qingdao area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 18 (1): 39–44.
- 刘洁, 张小玲, 徐晓峰, 等. 2008. 北京地区  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{O}_3$  和  $\text{PM}_{2.5}$  变化特征的城郊对比分析 [J]. *环境科学*, 29 (4): 1059–1065.
- Liu Jie, Zhang Xiaoling, Xu Xiaofeng, et al. 2008. Comparison analysis of variation characteristics of  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_3$ , and  $\text{PM}_{2.5}$  between rural and urban areas, Beijing [J]. *Environmental Science (in Chinese)*, 29 (4): 1059–1065.
- 刘君峰, 宋之光, 许涛. 2006. 广州地区雨水化学组分与雨水酸度主控因子研究 [J]. *环境科学*, 27 (10): 1998–2002.
- Liu Junfeng, Song Zhiguang, Xu Tao. 2006. Study on ionic composition of rain water at Guangzhou and the primary factors of rain water acidity [J]. *Environmental Science (in Chinese)*, 27 (10): 1998–2002.
- 汤洁, 薛虎圣, 于晓岚, 等. 2000. 瓦里关山降水化学特征的初步分析 [J]. *环境科学学报*, 20 (4): 420–425.
- Tang Jie, Xue Husheng, Yu Xiaolan, et al. 2000. The preliminary study on chemical characteristics of precipitation at Mt. Waliguan [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 20 (4): 420–425.
- 汤洁, 徐晓斌, 巴金, 等. 2007. 近年来京津地区酸雨形势变化的特点分析 [J]. *中国科学院研究生院学报*, 24 (5): 667–673.
- Tang Jie, Xu Xiaobin, Ba Jin, et al. 2007. Trend of precipitation acidity in Beijing–Tianjin region—The implication of particle abatement effort [J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Science (in Chinese)*, 24 (5): 667–673.
- 王文兴, 张婉华. 1997. 论北京降水的酸性 [J]. *环境科学研究*, 10 (4): 6–10.
- Wang Wenxing, Zhang Wanhua. 1997. On the precipitation acidity in Beijing [J]. *Research of Environmental Science (in Chinese)*, 10 (4): 6–10.
- 王艳, 葛福玲, 刘晓环, 等. 2006. 泰山降水化学及大气传输的研究 [J]. *环境科学学报*, 26 (7): 1187–1194.
- Wang Yan, Ge Fuling, Liu Xiaohuan, et al. 2006. Study on the precipitation chemistry and atmospheric transport at the Mount Taishan [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 26 (7): 1187–1194.
- 吴甫成, 吴君维, 王晓燕, 等. 2000. 湖南酸雨污染特征 [J]. *环境科学学报*, 20 (6): 807–809.
- Wu Fucheng, Wu Junwei, Wang Xiaoyan, et al. 2000. Study on acid rain pollution in Hunan Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 20 (6): 807–809.
- 徐敬, 张小玲, 徐晓斌, 等. 2008. 上甸子本底站湿沉降化学成分变化与来源解析 [J]. *环境科学学报*, 28 (5): 1001–1006.
- Xu Jing, Zhang Xiaoling, Xu Xiaobin, et al. Variations and source identification of chemical compositions in wet deposition at Shangdianzi background station [J]. *Acta Science Circumstantiae (in Chinese)*, 28 (5): 1001–1006.
- Yakovleva E, Hope P K, Wallace L. 2000. Receptor modeling assessment of PTEAM data [R]. *Environ. Sci. Technol.*, 33: 3645–3652.
- 杨东贞, 周怀刚, 张忠华. 2002. 中国区域空气污染本底站的降水化学特征 [J]. *应用气象学报*, 13 (4): 430–438.
- Yang Dongzhen, Zhou Huaigang, Zhang Zhonghua. 2002. Chemical characteristics of precipitation in regional air pollution background stations of China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 13 (4): 430–438.
- 张峥, 孟广礼. 1992. 1988 年两广地区春季酸雨观测和天气形势分析 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 28 (1): 86–95.
- Zhang Zheng, Meng Guangli. 1992. An observation of spring's acid rain and an analysis of weather situation at the Liangguang's area of China in 1988 [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese)*, 28 (1): 86–95.
- 周福民, 邵可声, 胡敏, 等. 2002. 北京大气气溶胶部分无机组分及相关气体的浓度变化 [J]. *环境科学*, 23 (1): 11–15.
- Zhou Fumin, Shao Kesheng, Hu Min, et al. Concentrations of aerosol and related gases in Beijing [J]. *Environmental Science (in Chinese)*, 23 (1): 11–15.