

一次平流辐射雾的边界层特征及 雾水离子组分研究

江玉华^{1,3} 王 强² 王正兴² 徐晓斌¹

(1. 中国气象科学研究院 北京 100081; 2. 中国气象局培训中心; 3. 重庆市气象台)

提 要: 为了研究北京城市浓雾生成机理以及雾水的污染情况,2006年12月11—12日,在北京南郊北京市观象台(39°56' N、116°17' E)对水平能见度在100m以内的浓雾进行了观测,并分析了这次浓雾形成的天气条件,对所采集的雾水进行了离子组分分析。结果显示:这是一次平流辐射雾,雾层厚约150m,能见度小于100m;在高空槽前、稳定边界层中,近地面正相对涡度区内有气流辐合和暖湿平流,日落之后地面降温迅速,有利于雾的生成;地面偏南风配合近地层暖平流,有利于增加雾的浓度;浓雾的形成发展时段内伴随着大气五级重污染事件。与1999年北京雾水采样比较:pH值上升,电导率下降,阴离子浓度普遍下降,阳离子浓度有所上升。研究表明,近年来北京城市所采取的治理措施,减轻了浓雾及其雾水中的污染。

关键词: 城市浓雾 平流辐射雾 雾水离子组分

On the Atmospheric Boundary Layer Character of an Advection-Radiation Fog Process and the Ionic Species Concentration of Fog Water

Jiang Yuhua^{1,3} Wang Qiang² Wang Zhengxing² Xu Xiaobin¹

(1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, CMA, Beijing 100081;
2. Training Centre of CMA; 3. Chongqing Municipal Meteorological Bureau)

Abstract: In order to study the formation mechanism of urban heavy fog and the pollution of fog-water, an observation of a heavy fog with the visibility of 100m during 11—12 Dec, 2006 was made in Beijing Observatory located in the south suburb (39°56'N, 116°17'E). The synoptic system and fog-water ionic species concentration was analyzed in the work. The results demonstrated that the observed fog process was an advection-radiation fog with a deep layer

资助项目: 国家自然科学基金(40275006)

收稿日期: 2008年3月25日; 修定稿日期: 2008年12月20日

of more than 150 meters and a low visibility of less than 100 meters. In the front of upper trough there exists a stable boundary layer, accompanying with convergence and warm moist advection in the surface positive relative vorticity area. The surface temperature decreased rapidly after sunset, which is favorable for the fog formation. The south-oriented wind and warm advection layer on the ground result in an increase of fog concentration. The formation and increase of heavy fog accompany with the air pollution index $V(APIV)$ increasing. Compared with Beijing's fog-water sample of 1999, the pH rises, electric conductivity rate descends, the anion's concentration generally decreased and the cation concentration increased. Investigation shows that the pollution of heavy fog and fog-water of Beijing has been reduced through efficient control.

Key Words: urban fog advection-radiation fog ionic composition of fog-water

引 言

随着北京城市建设的加快,人口迅速增加,汽车保有量不断上升,城市中雾的影响日益突出,发生浓雾时常伴有重度的空气污染,直接影响着大气环境,也影响着首都的城市形象,已经成为北京实现绿色奥运的严重威胁之一。城市雾还损害城市建筑物及其它基础设施,也对生物和植物产生严重危害,还影响城市气候变化,影响城市中人群的健康。

对雾的研究及对雾水的化学分析是当前城市雾与空气污染研究的重要内容之一。李子华^[1]概括了中国近 40 年雾的研究成果,吴兑^[2]在广东粤北山区、徐怀刚等^[3]在北京进行了雾水采样和分析,这些结果和不同地区雾水化学成分的对比如分析具有重要的意义。在重庆,2001 年再次进行了雾的综合观测实验和雾水采样分析^[4],对比 10 年前的分析结果^[5],可以得到城市发展对雾水污染状况变化的科学依据。另有些对华北大雾的发生气象条件^[6]、天气过程^[7]进行了专门研究,康志明等^[8]对 2004 年冬季华北平原大雾天气进行了诊断分析。

近些年,世界各国也在关注雾水受污染的情况,开展了一系列的实验研究。例如,1994 年欧洲六国在意大利波河谷进行综合性野外实验,重点对云和雾中化学成分分布

的不均匀性,以及它们对云雾过程的影响作进一步的分析和验证^[9]。法国北部城市斯特拉斯堡(1990—1999 年)^[10]做了雾水采集和研究。

城市浓雾的发展过程具有明显的局地性特征,不同性质、不同地区雾的物理化学结构、发生发展过程和时空分布各有其不同特点。加之浓雾的发生频率低,特别是在北京能采集到雾水的浓雾发生的频率更低,雾水采集难度很大。所以目前还少有对北京雾水的化学成分和离子组分的研究结果,也需要深化对产生城市浓雾的天气条件进行分析。

为了研究城市浓雾的形成气象条件及雾水的污染状况,在国家自然科学基金的支持下,2006 年 11—12 月在北京市观象台(39°56'N、116°17'E)进行了浓雾的观测,特别是采用微波辐射计等遥感探测设备,结合 L 波段二次测风雷达,得到的资料揭示了浓雾形成过程中边界层的结构特征,并用自制的雾水采样器采集到了雾水样本,对形成北京城市浓雾的天气过程和采集到的雾水做分析研究。

1 北京城市浓雾特征和生消过程分析

1.1 北京城市浓雾天气过程分析

利用中国气象观测网中站点实测资料,

结合 NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料,以 2006 年 12 月 11—12 日,雾水采集时段内出现的浓雾和空气五级重污染事件作为研究实例,分析北京产生浓雾的天气条件。

将中国地面气象观测网的监测资料,填在地面天气图上可以看到华北浓雾区的演变。2006 年 12 月 11 日 17 时从北京南郊房山、大兴到河北的固安、永清有一小范围雾区,20 时雾区范围扩大且变浓,由图 1a 可见,出现了最小能见度不足 100m 的浓雾区,整个雾区扩大到北京以南的观象台到邢台以北、沿太行山以东的华北平原大部地区。该雾区在 12 日 05 时前后北部有所缩小,北京市观象台和大兴等地减弱为轻雾。12 日 08 时雾再次加浓,华北大部分地区出现最小能见度不足 100m 的浓雾,且雾区再次扩大至北京南郊的房山、观象台和大兴,东面从朝阳经大厂、香河到天津和辽宁的南部,南边扩展

到山东北部、西到太行山以东的华北大平原(图 1b),浓雾持续到 12 日 11 时前后,北京及其附近地区的雾才转为轻雾,而保定以南至邢台以北、沿太行山以东的华北中部地区的雾则持续到 20 时之后才逐渐消散。

北京城区的雾,先是从北京南郊的房山、大兴开始形成,并逐渐加浓,且缓慢向北、向东扩展,丰台、新发地、天坛、十八里店、朝阳、四惠等地先后也出现雾,市中心(二环以内)及海淀区等地则在清晨出现了轻雾。

北京市观象台的起雾时间是 2006 年 12 月 11 日 19:40,能见度接近 100m 的浓雾是 22 时出现的,约在 12 日 5 时转为短时的轻雾,近 8 时雾再次加浓,太阳出来后雾逐渐减弱,至 12 日 10:40,已经减弱为轻雾。

从图 2 可以看出,在北京市观象台雾先是由地面降温造成的。11 日 17:25 地面气温从 -1°C 迅速下降到 -4°C ,19:40 雾开始生成,约 22 时发展为水平能见度近 100m 的浓雾,虽然中间有一段时间雾中水平能见度有所加大,但大部分时间是在 100m 附近。12 日 01 时起地面气温开始逐渐上升,09 时以后气温迅速上升,能见度也较迅速变好。日落后地面辐射降温有利于水滴凝结,可促进雾的生成和发展。

地面气压的演变情况:雾生成前,气压逐渐降低,雾生成后,与地面降温增湿的同时,伴随的是增压。本站地面气压的变化与地面气压场的配置和移动相吻合。地面气温和气压在雾生成前的变化是反位相的,即降温与升压相对应,在雾的维持中气温和气压变化缓慢,雾消散时气温和气压都明显上升。地面相对湿度是从 11 日 14:35 开始逐渐增加,18:20 升到 87%,19:55 已经达到 97%,大于 97% 的相对湿度一直持续到 12 日 10:50。近地面空气增湿,接近或达到饱和即可成雾。

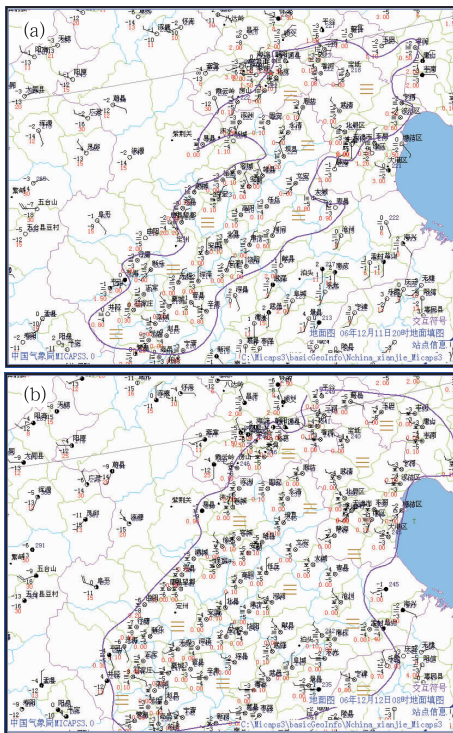


图 1 地面天气图上华北雾区分布情况

- a. 2006 年 12 月 11 日 20 时华北雾区;
- b. 2006 年 12 月 12 日 08 时华北雾区

浓雾时水平能见度在 100m 附近,雾减弱后能见度迅速加大,详见图 2a。

11 日 18:20 地面风速减小到只有 $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,经过一段比较平稳的过程,雾生成时风速加大到 $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (20:35),持续一段时间后有所减弱,22:05 风速再次加大到 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,随后发展为浓雾(见图 2b 实线)。在平流雾生成和发展时多伴有明显的微风。地面风向变化情况,在 11 日 12—14 时为偏北风,15 时开始从东风顺时针转为南风,17 时从南风转为西南风,21 时风向继续顺时针转为西西南风,这一阶段雾生成并发展成为浓雾。12 日 1—3 时风向转为东东北风,雾的浓度降低,3 时以后再次转为南风和西西南风,雾转浓伴随着能见度变差,6—7 时转为西偏北风和西风,8—11 时为西西南到西南风(见图 2b 虚线)。可见,在北京地面吹偏南风有利于雾的生成、维持和加浓,吹偏北风利于雾的减弱和消散。

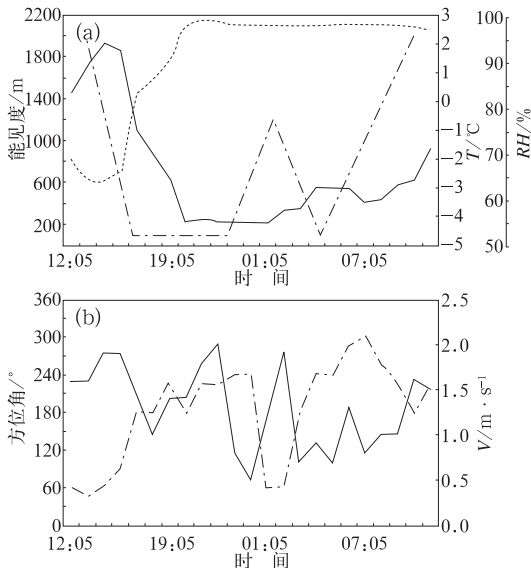


图2 2006年12月11—12日北京市
观象台浓雾发生前后地面气象要素变化
a. 温度(实线)、相对湿度(点划线)、能见度(虚线);
b. 风速(实线)、风向(虚线)

1.2 北京浓雾过程的天气背景

1.2.1 天气背景及物理量特征

2006年12月9日20时500hPa图上(图略),北京被槽后西偏北气流控制,10日08时转为西西北气流,10日20时41~50°N、100~110°E有一槽东移,11日08时该槽已移到内蒙古与山西、河北交界处,北京位于槽前西南气流中,11日20时该槽向北收缩,北京位于其底部的西风气流中,并维持到12日08时。

在12月9日08时,北京位于地面图(图略)上1040.0hPa的高压区内,之后气压逐渐下降,11日08时已经降到1022.5hPa,北京位于高压区边沿处的匀压区内。11日20时北京市观象台及华北大部开始出现雾,22时发展成为浓雾。12日20时高压东移,气压快速上升,华北地区雾消散。

物理量分析(详见图3)表明,在雾生消的全过程中,边界层顶到对流层低层都维持下沉运动(垂直速度、高度-经度剖面图3a),较弱的下沉气流有利于逆温层的维持和浓雾的形成;图3b是11日20时地表面温度分布,雾区位于地面温度较低处。12日20时在1000hPa图上,从华北南部到北京为一强劲的偏南气流区;华北平原到渤海在反气旋环流影响下(图3c);1000hPa图上出现正涡度平流图(3d),与正涡度平流区相伴的是水平气流辐合(图3e)及暖平流(图3f),相对湿度也明显增加(图略);强劲偏南气流维持了18小时,它向华北北部输送热量和水汽。说明高压系统在减弱的同时,1000hPa高度上便开始出现气流辐合,也就是说天气系统由渐变到转型前,在地面温度较低处,1000hPa高度上维持暖湿平流和气流辐合最有利于北方冬季浓雾的形成,也是平流雾生成的特征之一。

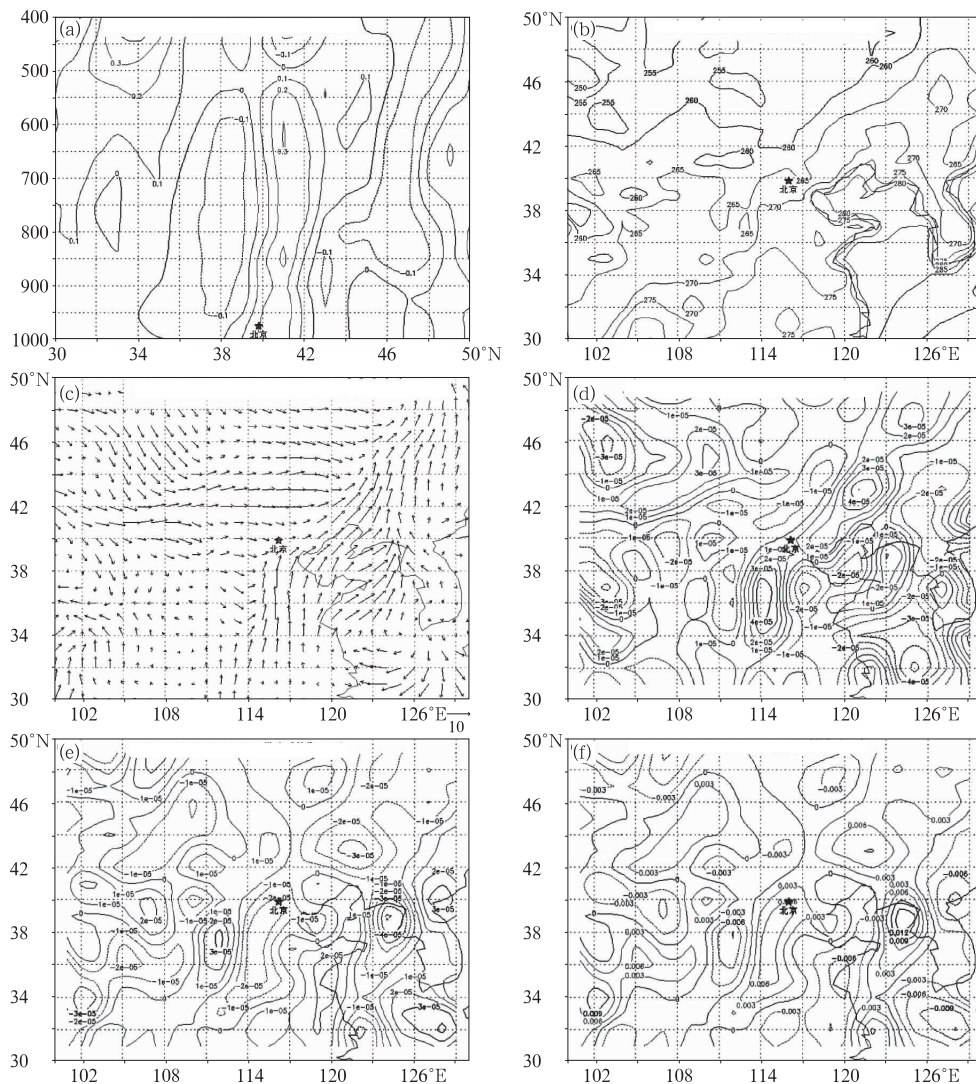


图3 2006年12月11日20时物理量分析图

a. 垂直速度剖面; b. 地表面温度; c. 1000hPa 风场;
d. 1000hPa 相对湿度; e. 1000hPa 散度; f. 1000hPa 温度平流

1.2.2 北京浓雾的边界层垂直结构特征

1.2.2.1 L波段雷达二次高空观测

Skew-T-logP 图上,明显可见北京出现浓雾的时段内,有明显的双层逆温,920hPa 以下有 7℃ 以上的强逆温层,特别是 740hPa 附近的逆温层随雾的发展而加强,在近地面层内的温度露点差约 1℃,空气中的相对湿

度在 97% 以上(图 4)。

北京市气象台 L 波段二次高空观测资料显示,在雾生成前期(11 日 20 时),90m 以下近似等温,但在 240m 和 750m 分别各有一个逆温层存在,特别是低层逆温有利于浓雾的生成;在雾发展过程中(12 日 08 时),逆温层下降到 30m 附近,并延续到 690m,为一较

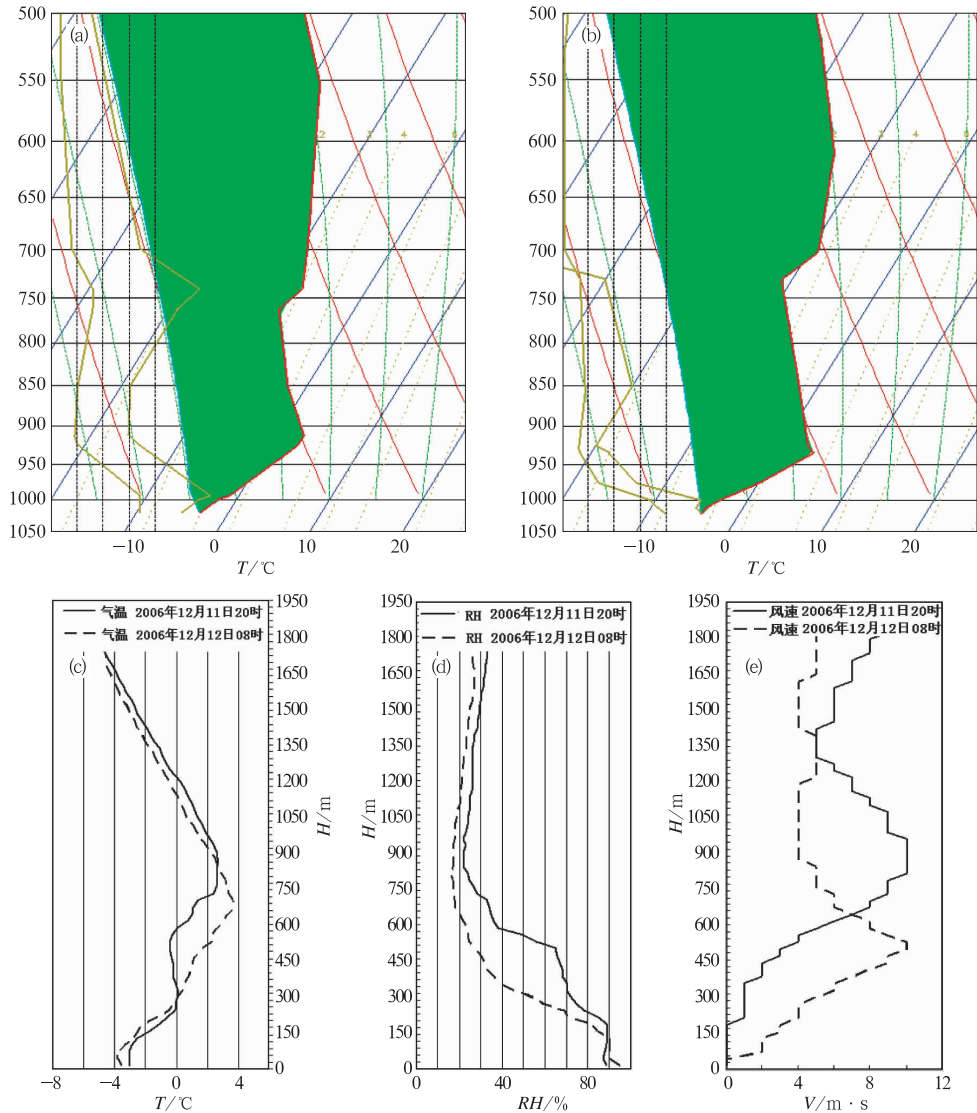


图 4 北京市观象台(54511)2006 年 12 月 11—12 日高空观测资料分析及大气边界层气象要素廓线演变

a. 12 月 11 日 20 时 T-logP 图; b. 12 月 12 日 08 时 T-logP 图;
c. 温度垂直分布; d. 相对湿度垂直分布; e. 风速垂直分布

厚的逆温层。在雾生成前期,在 180m 之下相对湿度在 89% 以上,在雾发展过程中相对湿度在 90% 以上的高度仅 120m,说明雾层不厚,主要在近地层。在雾生成前期,450m 以下风速都在 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,特别是在 180m 以下全是静风;在雾发展过程中,120m 以下

雾层内风速不大于 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,说明适当的微风有利浓雾的维持和发展。综合分析温、湿、风的垂直分布,可以判断,雾顶高度大约在 150m 附近。深厚的强逆温层和暖湿的近地面层是浓雾生成的重要条件和边界层结构特征。

1.2.2.2 浓雾过程中微波辐射计监测的大气边界层温、湿和水汽的连续演变特征

微波辐射计可以用来探测低层大气中的水汽总量,以及温度、湿度和水汽垂直分布廓线^[1],由于其能够提供高时空分辨率的连续监测资料,对分析雾的时空变化过程具有特殊的优越性。目前遥感反演精度虽然还不够高,但其在天气过程分析上还是有帮助的。在这次浓雾过程中,北京市观象台微波辐射计进行了同步测量。北京市观象台微波辐射计探测的资料表明,12月11日7时前,在300m到600m之间有一逆温层,白天太阳出来后,地面增温使逆温层消失。12月11日17时开始在330m到1000m气层内再次出现1℃逆温,且逆温强度随时间而略有加强。11日18时近地面层(150m以下)气温降低到0℃以下,相对湿度增加;11日20时降低到-3℃以下,维持到12日2时,有雾形成且变浓,雾顶高度接近200m,在04时之后近地层气温略有上升,逆温层也略有下降,雾顶高度也随之下降,同一时段内相对湿度都维持在90%以上;到11时逆温层消失,雾也消散了。11日20时到12日09时近地层有较多的液态水含量,大致维持在 $0.3\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上。

从北京市观象台微波辐射计探测的情况可以看到(图5),微波辐射计在边界层温、湿

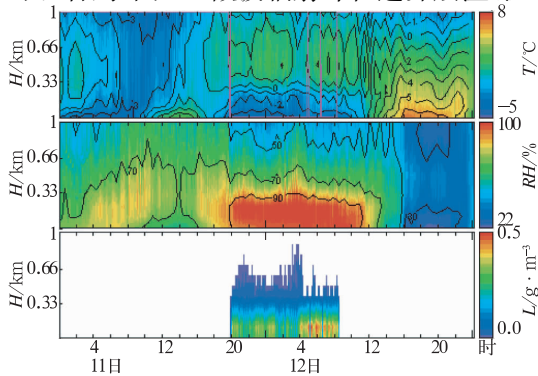


图5 2006年12月11—12日北京浓雾中微波辐射计测量气象要素的连续变化

特征的连续探测中具有良好的表现。在地面雾生成前先降温增湿,雾生成后在200m以下是降温区,而相对湿度高值区(90%)则不足300m高,且连续保持了14个小时,在明显增湿的条件下,近地面有水雾生成,液水含量最大值在 $0.4\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 附近。微波辐射计的降温增湿度以及逆温层高度、雾顶的高度的连续测量结果与高空观测结果是接近的。

综合以上各种资料分析表明:这是一次平流辐射雾天气过程。

1.3 北京城市浓雾和空气污染状况

根据国家环境保护总局公布的空气污染指数(API)资料,北京近年来空气质量状况逐步改善,API二级以下的天数(蓝天)在逐年增加,但是,每年发生四级和五级严重污染的天数起伏较大,改善并不十分显著。环保局公布的资料表明,近年来北京严重污染日里,主要污染物都是可吸入颗粒物(PM_{10}),而且在有雾甚至浓雾时常伴随着重度污染。

从雾水采集日对应的空气污染来看,在浓雾出现之前的几天中,大气处于持续稳定状态,空气中污染物浓度逐渐增加,是发生积累的过程。污染物浓度持续上升,形成比较严重的霾,水平能见度降低。出现浓雾时段内所对应的空气污染程度加重,最后达到了五级重度污染。

图6清晰地表明北京城市重污染是一个逐渐积累的过程。从9日开始逐渐增加,持续到12日浓雾阶段,最大浓度达到 $967.9\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,随着雾的消散,浓度明显下降。与之相比较的是在城区西部的宝联公园和远郊区的上甸子测量的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度,都表现出了污染物持续积累的特征,但城区污染物浓度高于远郊区。

图6a是12月5日14时到13日17时每小时PM粒子浓度随时间的演变过程,北京市观象台(PM_{10})、宝联公园($\text{PM}_{2.5}$)和上

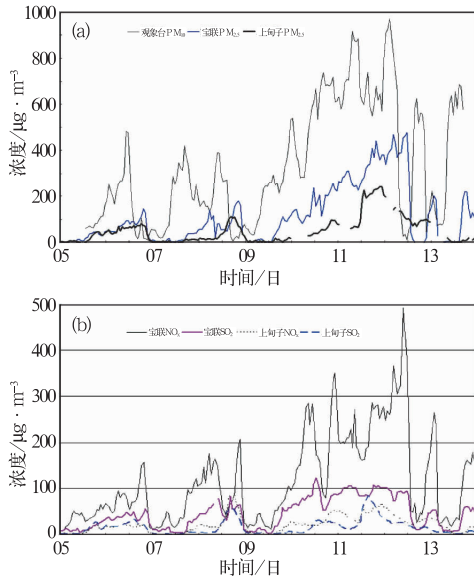


图 6 2006 年 12 月 5—13 日北京空气污染情况
a. 北京市观象台 PM₁₀、和宝联、上甸子 PM_{2.5}
时间演变图; b. 宝联和上甸子监测的
NO_x 和 SO₂ 变化情况

甸子(PM_{2.5})空气粒子浓度随时间演变趋势是一致的,都是逐日加浓。北京市观象台的 PM₁₀浓度高,空气污染也重。

图 6b 是同一时段内,宝联公园和上甸子监测的 NO_x 和 SO₂ 浓度变化情况。与 PM_{2.5} 的演变趋势相同,从 9 日到 12 日 NO_x 和 SO₂ 出现持续性增加的过程,在浓雾阶段达到最高值,在浓雾消散时浓度显著降低。在宝联公园 NO_x 最高浓度达到 491.9 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, SO₂ 最高浓度达到 123.7 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。相比之下,同时段上甸子的 NO_x 浓度低于宝联公园的十分之一,且变化平稳。这说明 NO_x 的污染源主要在城区,且 NO_x 污染比 SO₂ 更重。

2 北京雾水采集及离子组分分析

2006 年 11 月 20—21 日和 12 月 11—12 日,出现浓雾期间,分别在北京市观象台进行

了雾水采样。

2.1 雾水的采集方法

采用自制的主动式雾水采样器进行雾水采样。其基本原理是利用引风机,将雾抽入一个嵌有四层尼龙丝的平面滤网上,通过碰并过程,使雾滴在尼龙丝网上不断的汇集,雾水沿斜槽流入聚乙烯收集瓶中。

2.2 雾水化学分析方法

采集到的雾水样品,由中国气象科学研究院大气成分中心化学实验室进行分析。先进行 pH 值和电导率测定,其余样品经有机微孔膜过滤,用于离子组分测定。利用离子色谱仪对雾水中主要阴离子和阳离子的组分进行分析,其中 11 月 21 日的样品水量太少,没能进行 pH 检测,分析项目也少。分析仪器为 Dionex 公司生产的 DX-500 型离子色谱仪,按国家降水离子组分分析标准方法进行。

2.3 化学分析结果

表 1 中列出的是 2006 年雾水化学分析结果和 1999 年采集的雾水分析结果。2006 年所测的雾水 pH 值明显高于 1999 年。雾水中主要阴离子(如 SO₄⁻²和 NO₃⁻)浓度有所减少,阳离子(如 Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺)浓度有较明显增加,所以 pH 升高,即雾水酸度降低,已经不在酸性范围内。电导率由 1999 年的 2990 $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ 下降到 2006 年的 418.1 $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$,表明雾水中污染物离子含量有所降低,在一定程度上反映出北京的空气质量在转好。

2.4 北京雾水与其它地方雾水的比较

从酸度上看,各地雾水差异很大,西双版纳(1997)雾的 pH 值接近 7、甚至大于 7,体现出中性或弱碱性。上海(1990)雾水的 pH

表 1 北京雾水离子组分演变 (离子浓度单位:mg/L)

时间	pH	电导率 ms · cm ⁻¹	NH ₄ ⁺ mg · l ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mg · l ⁻¹	NO ₃ ⁻ mg · l ⁻¹	Cl ⁻ mg · l ⁻¹	F ⁻ mg · l ⁻¹	Na ⁺ mg · l ⁻¹	K ⁺ mg · l ⁻¹	Ca ²⁺ mg · l ⁻¹	Mg ²⁺ mg · l ⁻¹
2006.12.11.22:30	6.24	0.418		986.9	365.9	248.4	20.0	141.0	39.0	107.0	101.0
2006.11.21.06:30				915.1	310.4	100.3	13.2				
1999.11.23.20:30	5.21	2.990	432.60	1007.0	472.0	235.0	4.46	15.60	60.6	33.2	5.57
1999.11.24.04:00	5.19	3.080	450.85	1117.0	487.0	116.0	11.9	11.2	71.1	45.0	7.16
1999.12.15.06:00	6.03	1.790		487.7	201.5	52.5	11.16	11.26	21.2	62.63	6.27

值为 5.15,重庆雾的酸性是较重的,pH 值为 4.87(2003)。相对而言,北京雾的酸度还不是最低的。

欧洲六国在意大利波河谷进行综合性野外雾实验,所采集的雾水酸度变化很大,如 1994 年 11 月 14 日晚间采集的雾水 pH 值为 6.48,第二天上午雾水的 pH 值为 3.10^[9]。法国北部城市斯特拉斯堡(Strasbourg)采集了 10 年的雾水,其 pH 值在 4~6 之间。韩国^[12]1995 年在 Chongwon 采集的雾水 pH 值为 5.9,日本^[13]1999 年在神户采集的雾水,其 pH 值为 3.7。雾水酸度的局地性和随时间变化的特点很突出。

近年来,各地都在大力治理环境,降低空气污染,雾水中离子浓度的变化是一个重要标志。北京雾水离子组分变化与重庆相比,改善的更加显著(见图 7)。从离子浓度上看,北京雾水中几种主要阴、阳离子的浓度值是比较高的。雾水中的离子浓度与当时空气中的污染物浓度密切相关,北京发生浓雾前氮氧化物和二氧化硫的积聚与之有直接的关系。

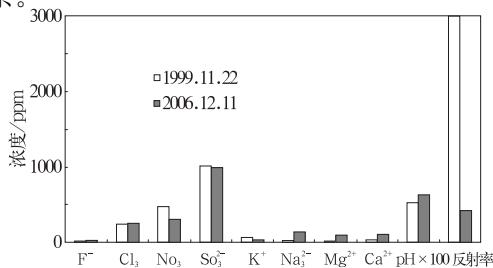


图 7 北京城市雾水理化特征变化

重庆城市在 1991—2003 的 12 年间,雾水 pH 值由 4.27 升为 4.87,空气中酸污染仍然严重;重庆雾水的电导率由 1991 年的平均 815 μ s · cm⁻¹ 升为 2003 年的 1120 μ s · cm⁻¹,虽然大多数离子浓度在下降,特别是 SO₄²⁻ 离子浓度下降最为显著,但总的效果还是不及北京(详见图 8)。

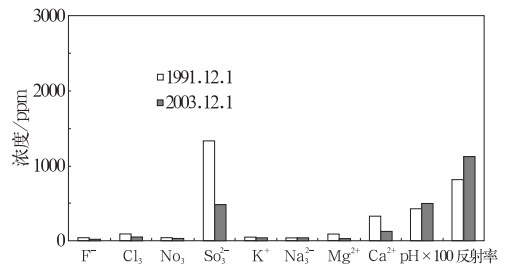


图 8 重庆城市雾水理化特征变化

电导率可以更直接反映雾水中离子的总浓度,1999 年北京雾的电导率是所有已知的数据中最高的,比环境污染较少的西双版纳竟高出 10 倍以上,比污染严重的重庆也要高出数倍。2006 年北京雾水中主要污染物离子浓度有所下降,电导率也有明显下降。

3 结论与讨论

(1) 北京城市浓雾的生成具有显著的局地性特征。天气及物理条件的转变是生成北大范围平流辐射雾的必要条件。在更深厚的稳定层结、更大的降温梯度、更强劲和持续的低空暖湿气流辐合等条件下,且当所形成的雾层较薄时,雾才易变得更浓。

(2) 北京浓雾与城市大气污染关系密切。在浓雾发生前,持续的稳定天气条件下,以可吸入颗粒物 PM_{10} 为主的空气污染物在近地层大气中不断积聚,形成日渐浓重的霾,这是浓雾形成前的一个重要特征。

(3) 雾水的化学成分是城市空气污染情况的直接体现。近年来,北京雾水由酸性向中性变化,电导率明显降低,阴性离子浓度有所减少,显示出北京市的大气污染程度正在逐步减轻。与重庆的雾水比较,在离子浓度、pH 值、电导率等方面的改善最为明显。但是,北京雾水中的硫酸根、硝酸根、钙、镁等阳离子的浓度还是相当高的,仍然属于较严重的污染性雾。

城市污染性浓雾已经成为日益严重的灾害性天气,对雾水化学性质的监测和研究正在成为城市空气质量控制的重要内容之一,涉及多学科领域,目前的实验技术和研究方法还很不适应需要,现有的工作仅仅是初步的,还需要积累更多、更详细的资料,来提高对城市浓雾和霾的科学认识。

致谢: 感谢中国气象局大气探测实验基地和北京市观象台的领导和技术人员,在雾水采样期间给予的全面支持和帮助!感谢中国气象科学研究院大气成分中心化学实验室的技术人员对雾水进行的化学分析!感谢北京城市气象研究所和人工影响天气办公室在微波辐射计、风廓线、空气污染等资料方面给予的帮助。

参考文献

- [1] 李子华. 中国近 40 年来雾的研究[J]. 气象学报, 2001, 59(5): 616-624.
- [2] 吴兑, 邓雪娇, 叶燕翔. 南岭大瑶山浓雾雾水的化学成分研究[J]. 气象学报, 2004, 62(4): 476-485.
- [3] 徐怀刚, 邓北胜, 周小刚, 等. 雾对城市边界层和城市环境的影响. 应用气象学报, 2002, 13(Suppl): 170-176.
- [4] 江玉华, 王强, 李子华, 等. 重庆城区浓雾的基本特征[J]. 气象科技, 2004, 32(6): 450-455.
- [5] 赵琦, 孟小星, 陈刚才. “十五”期间重庆雾水化学特征研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2007, 29(8): 146-149.
- [6] 毛冬艳, 杨贵名. 华北平原雾发生的气象条件[J]. 气象, 2006, 32(1): 78-83.
- [7] 王丽荣, 连志鸾. 河北省中南部一次大雾天气过程分析[J]. 气象, 2005, 31(4): 65-68.
- [8] 康志明, 尤红, 郭文华. 2004 年冬季华北平原持续大雾天气的诊断分析[J]. 气象, 2005, 31(12): 51-56.
- [9] Heintzenberg. Characteristics of haze, mist and fog[J]. Beitr. Zur Phys. Der Atmos., 1998, 71: 21-31.
- [10] P. Herckes, H. Wortham, P. Mirabel et al., Evolution of the fogwater composition in Strasbourg (France) from 1990 to 1999[J]. Atmospheric Research 64 (2002): 53-62.
- [11] 刘红燕, 李炬, 曹晓彦. 遥感大气结构的地基 12 通道微波辐射计测量结果分析[J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(2): 222-229.
- [12] Y. S. Chung, H. S. Kim, M. B. Yoon. Observations of Visibility and Chemical Compositions Related to Fog, Mist and Haze in South Korea[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1999, 111: 139-157.
- [13] Masahide Aikawa, Takatoshi Hiraki, Motonori Tamaki. Comparative field study on precipitation, throughfall, stemflow, fog water, and atmospheric aerosol and gases at urban and rural sites in Japan[J]. Science of the Total Environment, 2005, DTD5: 1-11.