

李宏宇, 胡朝霞, 魏香. 2010. 雨雾、雪雾共生天气气象要素分析 [J]. 大气科学, 34 (4): 843–852. Li Hongyu, Hu Zhaoxia, Wei Xiang. 2010. Analysis of meteorological elements in rain/snow-mixed fogs [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (4): 843–852.

雨雾、雪雾共生天气气象要素分析

李宏宇¹ 胡朝霞² 魏香³

¹ 北京市人工影响天气办公室, 北京 100089

² 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

³ 空军气象中心, 北京 100843

摘要 利用多通道微波辐射计、边界层风廓线仪及自动/人工气象站等观测资料, 分析了2007年秋冬季北京地区雨雾和雪雾两次共生天气形成与维持过程中地面和高空气象要素伴随降雨、降雪过程的变化。结果显示: (1) 高湿和小风是雨雾、雪雾生成并造成地面低能见度的主要气象条件。大雾形成与维持过程中, 地面水平能见度与相对湿度的反相关关系非常显著。能见度越低时, 雾的含水量也越高。(2) 较弱的降雨和降雪可以促使雾含水量减少, 提高能见度, 但降雨或降雪蒸发增湿又利于雾的维持。(3) 雨雾在降雨过程中高层气温经历大幅降温, 除可能受天气系统影响外, 与云层中水汽凝结释放的大量潜热和含水量大幅度增加也有关系。雪雾在降雪过程中高层温度总体随着时间趋于降低且变化幅度较小。(4) 在降雨、降雪过程中雨雾和雪雾低层一直存在水汽饱和层, 且饱和层的顶部随降雨和降雪强度的加大而抬升, 厚度不断加大, 造成地面水平能见度进一步下降。结合催化剂人工消雾与共生雾降水(降雨或降雪)相似的原理, 个例分析结果初步表明较弱的降雨或降雪过程对消除暖雾、冷雾的影响有限, 对改善地面水平能见度并不显著, 这对人工消雾技术研究具有一定的启发作用。

关键词 雨雾/雪雾共生 气象要素 人工消雾

文章编号 1006-9895(2010)04-0843-10

中图分类号 P426

文献标识码 A

Analysis of Meteorological Elements in Rain/Snow-Mixed Fogs

LI Hongyu¹, HU Zhaoxia², and WEI Xiang³

¹ Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089

² Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³ Air Force Meteorological Center, Beijing 100843

Abstract Data analysis from the multi-channel microwave radiometer, boundary layer wind profiler, and auto/artificial weather station observation in Beijing region, displays those changes of surface and upper-level meteorological elements accompanied with raining or snowing processes during the formation and maintenance of two rain/snow mixed events that occurred in the autumn and the winter of 2007, respectively. The results indicate that high humidity and light wind are the main meteorological conditions in favor of fog occurrence and causing low visibility too. During the fog formation and maintenance there is a distinct inverse correlation between the horizontal visibility and surface relative humidity. The lower the visibility is, the more abundant liquid water the fog contains. Lighter rain or snow could diminish the water content and then increase the visibility within the fog. On the other hand, rain or snow evaporates and subsequently the humidification will further benefit the maintenance of the fog. In the rain-mixed fog, a significant increase/decline of the upper air temperature during the rain process is related to the re-

收稿日期 2009-08-28, 2010-02-04 收修定稿

资助项目 国家科技支撑计划重点项目 2006BAC12B07、2006BAC12B04

作者简介 李宏宇, 男, 1975年出生, 博士, 高级工程师, 主要从事云和降水物理学研究。E-mail: lihy@bjmb.gov.cn

leased latent heat of water vapor condensation and substantial increase of water content besides the possible influence of weather systems. While in the snow-mixed fog, the upper air temperature generally declines with the time in a quite small change range. A vapor-saturated layer during the raining or snowing processes is always observed in the low layer in both the fog cases. As precipitating gets stronger, the top of the saturated layer rises higher and the layer also gets thicker, with surface horizontal visibility reduced. In regard to alike mechanism between fog dispersal and precipitation stimulation, these cases results reveal that weaker rain or snow processes have only limited effects on the dissipation of warm fogs or cold fogs, in another word, it is less conducive to increasing the surface horizontal visibility. The analysis offers some enlightenment on the effects and techniques of fog dispersal with seeding agent.

Key words fog mixed with rain/snow, meteorological elements, fog dispersal

1 引言

我国北方每年秋冬时节易出现大范围的大雾天气。浓密持久的大雾使得近地面层能见度很低,加上雾滴中常溶有许多有害物质,给现代化交通运输、输电和大气环境都带来严重的影响,也为人们生产生活 and 身体健康带来严重危害(徐怀刚等, 2002)。

目前,国内外针对雾的天气与气候学特征、雾的边界层特征及其生消机制、雾的宏微观结构与物理化学特性等研究较多(Roach et al., 1976; Fuzzi et al., 1992; 许绍祖和尹球, 1988; 李子华, 2001), 针对不同类型雾的大量观测实验研究也发现了很多新的观测事实,对雾的认识有了很大提高。在对雾的能见度变化规律及其影响因子统计分析中,地面水平能见度与地面的相对湿度、空气污染物浓度等存在呈很好的相关关系,地面风速与降水等则对雾的形成、维持以及能见度的影响较为复杂(闫敬华和徐建平, 2001; 王淑英等, 2003; 马雁军等, 2005)。

结合观测试验,利用建立的二维、三维雾模式,国内外学者也开展了许多关于雾的预报方法与雾的生消、演变规律的数值研究(Brown and Roach, 1976; Musson-Genon, 1987; Duynkerke, 1999; 黄建平等, 2000; 周小刚等, 2004; 董剑希等, 2006; 何晖等, 2009), 通过模拟分析湍流、长短波辐射、凝结、蒸发、重力沉降以及地表植被类型、气溶胶成分与辐射效应等对雾生消的影响,在雾的产生、发展机制以及各种影响因素的作用方面得出许多有益的结论,也加深了对不同类型雾的形成与演变过程的认识。

此外,为减轻雾的危害,人们还一直在探索控制雾的生成、减弱以及人工消散雾的方法,开展了

很多有益的探索和实践,在人工消雾试验研究、新型催化剂研制以及播撒装置等方面取得了一些新的进展(Fukuta, 1996; Möller et al., 2003; Bankova et al., 2003; 郭恩铭等, 1990; 濮江平等, 2001; 王伟民等, 2002; 黄庚等, 2006; 高建秋等, 2008)。

降水对雾的形成、维持以及能见度变化存在重要影响。鉴于已有雾的观测试验和数值模拟研究对象大多为纯雾天气,对雾和降水等共生天气少有研究,降雨、降雪和雾共存时气象要素的变化情况尚不清楚;另一方面,催化剂消雾的思路和自然降水及人工增雨的原理较为相似(Bankova et al., 2003; Jean, 2005), 均主要通过激发碰并或加速冰-水转化过程来增加大粒子,减少小滴浓度与尺寸,本文选取 2007 年 10 月 26 日~28 日和 12 月 26 日~28 日北京地区与降雨、降雪两次共生雾天气,通过利用多通道微波辐射计、边界层风廓线仪及自动/人工气象站等观测资料,详细分析了伴随降雨或降雪过程地面及高空气象要素的变化,并初步探讨了采用催化剂消除暖雾、冷雾可能存在的局限性。

2 探测设备与资料简介

文中分别从地面观测的水平能见度、降雨(雪)量、相对湿度、(10 分钟平均)风速和高空观测的云液水、相对湿度、水平与垂直风速等几个气象要素的变化对雾过程进行分析。受探测设备所处位置和对降雪观测计量限制,地面相对湿度和高空的相对湿度、云液水廓线资料分别取自 TP/WVP-3000 微波辐射计内置气象传感器观测和遥测,该微波辐射计位处海淀区车道沟北京市气象局业务楼顶;地面风速和高空风速廓线资料分别来自自动气象站观测和 CFL-03B 边界层风廓线仪遥测,观测设备均位于海淀区海淀公园;地面降雨量观测来自车道沟自动气象站,而降雪融雪测量则主要参考附

近的海淀气象站。地面水平能见度的观测位置介于微波辐射计和风廓线仪中间。各种观测设备相对位置参见图 1。

2.1 微波辐射计

架设在海淀区车道沟的十二通道 TP/WVP-3000 微波辐射计系统(北京市气象局业务楼顶)从美国 Radiometrics 公司引进,2006 年 5 月纳入气象业务运行,24 小时连续监测大气温度、湿度、水汽和云液水的演变(Solheim et al., 1998)。该系统是一种便携式被动式大气遥感的超光谱辐射仪,可在晴朗或多云时连续监测地面至高空 10 km 共 47 个高度层(1 km 以下间隔 100 m, 1 km 以上间隔 250 m)的温度,水汽、云液态水廓线以及积分水汽和云液水量,每分钟一个数据。仪器包含一个降雨影响减弱系统,拥有风干器和防雨罩,可减少辐射计天线屏蔽器上液态水累积,并将水膜造成的影响减至最小,满足几乎所有天气条件下观测需要。内置的气象传感器还可测量地面气温、相对湿度、大气压以及降水。

2.2 边界层风廓线仪

CFL-03 型边界层风廓线仪由中国航天科工集团公司二院 23 所研制,2005 年 6 月安装在北京市海淀区海淀公园内,为业务运行每日 24 小时提供业务数据。采用全固态发射机、数字中频接收机等先进技术,能够连续地获取从距地面 100 m 到 3600 m 高度范围每 60 m 高度层上的风速、风向等气象数据。该系统通过与无线电声探测系统相结合,还可以获得 100~1500 m 高度范围内的大气温度数据,用于气象预报、监测大气污染扩散以及机场飞行气象保障等。作为一种先进的气象探测系统,风廓线仪通过获得大范围内的低空急流和降水前的风场信息,对改善中小尺度天气,预报雷暴的发展和

移动等有重要作用,可明显提高短期和短时天气预报能力(王欣等,2005)。

3 雨雾共生天气个例气象要素分析

2007 年 10 月 26 日,受高空槽和地面冷锋共同影响,一条近东西向的冷锋云系逐渐东移,其后部冷空气向南扩散,影响我国北方大部分地区。清晨北京、河北中东部、天津、辽宁、渤海湾、辽东湾、山东、安徽、江苏、浙江北部地区出现大雾天气,这也是入秋以来卫星监测到的范围最大、影响最为严重的大雾天气事件[图 2(见文后彩图)]。

3.1 地面气象要素变化

10 月 26 日白天,京津冀、苏皖地区许多地方的水平能见度不足百米。从图 3a 地面逐小时水平能见度变化易看出,26 日 06 时前后大雾最为严重,能见度只有 80 m。到了 27 日 10 时以后,能见度迅速好转,大雾也随之快速消散。

空气湿度是雾形成与维持最重要影响因子之一。图 3a 中能见度与相对湿度呈明显的反相关且非常显著,由

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

计算的相关系数超过 0.8。低能见度的生成与相对湿度和相对湿度的变化趋势都密切相关。虽然能见度与地面风速间的关系比较复杂,二者相关系数不到 0.3,但大雾形成时地面风速通常都较弱,基本上都小于 2.0 m/s 或为静风(图 3b)。

微波辐射计测量(第一层,海拔 75 m)的近地面层含水量也与能见度的关系较密切。含水量越多,水平能见度往往也越差。二者相关系数约 0.6。此次,大雾维持时低层含水量一般都低于 0.2 g/m³。至于 27 日 07:20 后液水含量出现的短时的跃增(最大达 1.4 g/m³),与该时段降雨有关。

10 月 26 日夜间至 27 日白天,受东移云带影响北京地区天气转阴,上空云量较多并伴有零星小雨,部分地区水平能见度依然较差。TP/WVP-3000 微波辐射计的雨水感应器监测显示,27 日 05:44~08:18 和夜间分别监测到明显的降水物。自 25 日 00 时~27 日 20 时,车道沟自动气象站也仅在 27 日 06 时~08 时和 12 时分别观测到 0.1~0.6 mm 的 6 分钟雨

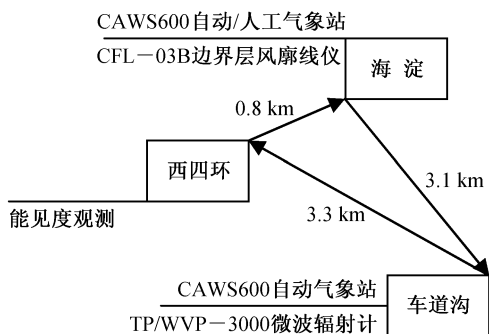


图 1 观测设备基本情况示意图

Fig. 1 Sketch map of the observation devices and their locations

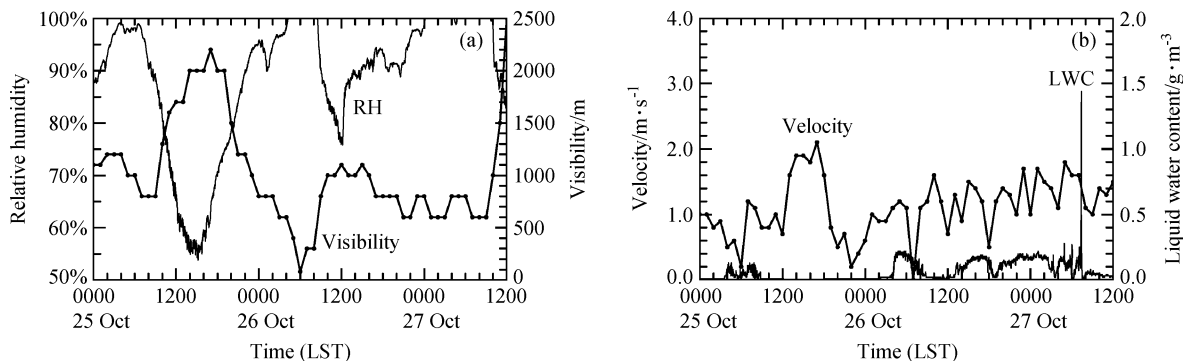


图3 2007年10月25~27日地面相对湿度与水平能见度变化(a)和地面的风速、含水量变化(b)

Fig. 3 Time series of (a) surface relative humidity, horizontal visibility, and (b) surface velocity, liquid water content from 0000 LST 25 Oct to 1200 LST 27 Oct 2007

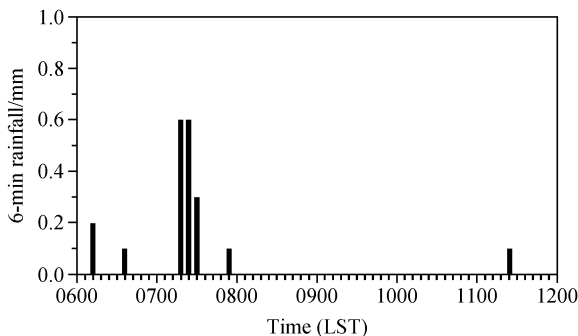


图4 2007年10月27日车道沟自动气象站6分钟降雨量变化

Fig. 4 Time series of the 6-min rainfall at AWS (automatic weather station) Chedaogou on 27 Oct 2007

量(图4),其中07:18~07:30时之间雨量最多,6分钟雨量最大0.6 mm,等效于最大降雨强度6 mm/h。从地面水平能见度和降雨量变化的时间配置分析,27日06时地面水平能见度约800 m,弱降雨发生后,07时能见度观测下降至600 m并一直维持到09时。由此可见,在雾的维持过程中,零星的弱降雨对改善能见度没有显著作用。

10月27日夜间,冷空气补充南下,晚21时起京城还普降了雷雨,能见度逐渐好转,大雾减弱。

3.2 高空气象要素变化

风廓线仪探测的垂直速度还与降水强度存在一定的关系(Ecklund et al., 1995; 阮征等, 2002)。在有降水时,风廓线仪探测的朝向风廓线仪垂直速度(为正值)越大,降水往往越强。以4 m/s的垂直速度作为判断降水的阈值(杨引明和陶祖钰, 2003),从风廓线仪探测的垂直速度廓线随时间变化可见[图5a(见文后彩图)],07:18时之后,2.0

km以下垂直速度开始增大,07:30时以后均大于4 m/s,说明低层出现明显的降雨。而在地面降雨发生前,07:18时高层的垂直速度向上逐渐增大,这是降水粒子增长下落的结果。降雨强度在07:30时前后最大,700 m附近最大垂直速度近7 m/s。此后,高低层垂直速度迅速减小,至08:06时整个探测范围垂直速度均小于4 m/s,明显的降雨过程基本结束。风廓线仪探测显示的降雨量变化时间与车道沟自动气象站观测基本一致。

比较风廓线仪探测的垂直速度(降雨),从图5b(见文后彩图)微波辐射计遥测的液水含水量廓线可以看出,在没有降雨发生时,雾含水量较大,例如,07:06时雾含水量在1.5 km以下接近0.6 g/m³;此后雾上方云层液水含量逐渐增多,6.0 km以下范围液水含量普遍高于0.5 g/m³,最大含量位于4.75 km高度,为1.6 g/m³。07:18~07:30时这段时间,2.0 km以下风廓线仪探测垂直速度逐步增大,意味着地面降雨逐步临近,至07:30时已经产生降水,此时段低层1.5 km以下范围液水含量不断减小,从0.4 g/m³减小到接近0;降雨出现后,高层液水含量也迅速减小,在降雨最强时最大含水量只有0.5 g/m³;至降雨基本结束时,6.0 km以下范围各层液水含量大小接近,仅约0.1 g/m³。也就是说,在没有产生地面降雨时雾含水量达到了接近0.6 g/m³的较高值,而降雨发生期间雾含水量明显减少。这也表明了降雨对雾确有冲刷作用。

2007年10月26日~28日雨雾共生天气中,在观测到有明显降雨时段,图6a(见文后彩图)位于2.5 km高度以下微波辐射计遥测的气温都高于

0℃。另外,在 600~900 m 附近还存在逆温层。由此可见,本次共生雾主要是暖雾。从 10 月 27 日温度廓线的时间变化还可以看出,07:06 至 07:42 时段,大约 2 km 高度以上,气温经历了整层升高和降低的过程。07:18 时整层气温最高,同一高度上的气温变化最大近 20℃,例如在 6 km 高度上,07:06 时温度约为 -21.8℃,07:18 时上升到 -1.7℃,温度大幅升高。07:30 时整层气温降低,到 07:42 时整层气温与 07:06 时差不多。整层气温的一升一降与降水过程有关。从图 5b 微波辐射计遥测的液水含量垂直分布看,07:06~07:18 时,2 km 以上高空含水量明显增加,极大值大约位于 3~7 km 高度间,尤其是 07:18 时云内含水量极大值达到 1.6 g/m³,云层高达 10 km,而此时整层气温也最高。可以认为气温的整层升高,除与天气系统有关外,由于云层中含水量有大幅增加,应该说与降水粒子形成增长过程中释放大量潜热使空气增温也有一定关系。降雨出现时,整层气温从最高值开始回落,伴随降水高层含水量也开始减小,云和降水形成微物理过程趋于减弱,整层气温迅速降低。

从图 6b(见文后彩图)微波辐射计遥测的相对湿度廓线来看,在 07:06~07:42 时段,相对湿度的垂直分布发生了明显变化:在 1.5~4.5 km 高度层,明显降水发生前,07:06 时前后 4.5 km 以下整层空气湿度高于 90%,接近饱和,但云中含水量并不高;07:18 时,云层中相对湿度大幅降低,降至 60%~80%,但含水量达到了极大值,从 0.1 g/m³ 增加到 1.6 g/m³,同时云层也发生了显著增温现象。水汽、温度和相对湿度相互影响。从含水量、温度和相对湿度的变化看,云层中水汽发生了大量凝结,凝结过程释放的潜热增加了气温,消耗的水汽和增温又降低了相对湿度。在 1.5 km 高度以下,基本上一直维持着 100% 的湿度,加上地面风速小,雾故此非常浓厚。

此外,地面降雨发生后,高层空气湿度仍然比开始时(07:06 时)低。而从最强降雨出现到明显降雨基本结束时,2.5 km 高度以下气层中一直存在空气湿度达到了饱和(100%)的气层,且饱和层上界高度随着降雨的加强有所抬高,即饱和层的厚度加大,这可能是降水粒子在地面附近气层蒸发的影响。近地面层大雾内维持着很高的空气湿度,这也使得地面水平能见度无法得以改善。降水对雾一

方面有冲刷作用,另一方面降水蒸发所增加的湿度又有利于雾的维持。

4 雪雾共生天气个例气象要素分析

2007 年 12 月 26 日,我国华北和东北地区南部由于冷空气势力较弱,加之低层大气水汽充分,出现了持续性大雾天气。连续的大雾也造成了北京市 2007 年入冬以来首次重度污染天气。27 日北京部分地区大雾能见度不足百米。随着蒙古气旋云系东移,受冷暖空气共同影响,28 日凌晨 02 时开始,北京大雾天气中同时出现了降雪现象,05 时左右降雪强度加大,降雪开始密集,08 时前后陆续停止。上午 09 时,随着强冷空气主体到来,大雾很快也全部被吹散。

根据融雪测站统计,本次雪雾天气最大降雪量出现在怀柔,达 2.5 mm。北京城区则是小雪,降雪量多在 0.5~1.0 mm。其中,海淀气象站至 28 日 08 时降雪结束时累计降雪量 1.2 mm,而车道沟自动气象站因非融雪测站降雪无法计量。TP/WVP-3000 微波辐射计雨水感应器在 28 日 03:15~08:34 时段也一直监测到有明显的降水物落下。

4.1 地面气象要素变化

图 7a 显示,12 月 26 日 09~10 时地面观测水平能见度已减为 1000 m,随后缓慢增加,至 16 时改善至 1500 m。而此后能见度又逐渐降低,到了 27 日 09 时形成大雾并长时间地维持。大雾维持期间,在 28 日 06 时前后能见度有所提高,但很快又变差,即 04~08 时水平能见度经历了先增又减的过程。09 时之后,随着冷空气主体到来,能见度陡增到 3500 m,大雾随之很快消散殆尽。

与前述雨雾共生例相同,高湿和小风仍然是造成雪雾和低能见度的主要气象条件。图 7a 地面相对湿度与能见度反相关比较显著,二者相关系数近 0.9。从 12 月 27 日 09 时开始,在大雾发展、能见度逐渐减小期间,相对湿度不断增加,一直达到饱和;地面风速较小,大多小于 2.0 m/s(图 7b),但到了 09 时以后,风速增强很快。近地面层的含水量与能见度之间也存在很好的反相关,相关系数约 0.9,在能见度降低大雾发展时,含水量也在不断增大。

比较地面降雪和水平能见度变化的时间可以发现,在降雪相对密集的时段,即 28 日 05 时之后,地

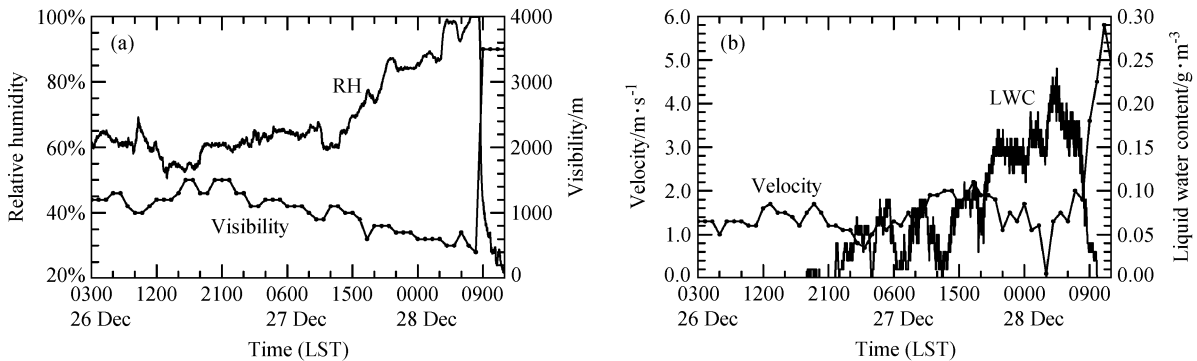


图7 2007年12月26~28日地面相对湿度与水平能见度变化(a)和地面的风速、含水量变化(b)

Fig. 7 Time series of (a) surface relative humidity, horizontal visibility, and (b) surface velocity, liquid water content from 0300 LST 26 Dec to 1200 LST 28 Dec 2007

面能见度从 500 m 增加到 06 时的 700 m, 提高了 200 m, 再之后能见度又迅速减小, 08 时降至 400 m。由于地面水平能见度的增加在时间上与降雪相对应, 降雪过程对雾的冲刷可能提高了能见度。

4.2 高空气象要素变化

从图 8a 风廓线仪探测的垂直速度廓线变化看, 12 月 28 日降雪主要时段是 05~08 时, 从 04 时开始降雪强度在不断加大。04 时边界层内主要存在微弱的上升运动, 降水粒子下落不明显。而 05 时, 3300 m 高度以下基本上都存在明显的下沉运动, 1200~3300 m 下沉速度随高度呈抛物线分布, 最大下沉速度位于约 2400 m 高度, 约为 0.8 m/s, 表明有明显的降水粒子下落; 从 06 时垂直速度廓线看, 此时之前降雪强度又经历了加大的过程, 06~07 时前后垂直速度最强, 1700 m 以下下沉速度都达到了 1.0 m/s 以上, 反映出此时段地面降雪也相对较强。

对应风廓线仪探测的垂直速度, 微波辐射计监测的空中液水含量变化也显示, 随着降雪临近, 6 km 以下液水含量逐渐增多, 04 时到 05 时降雪明显发生时, 整层含水量大幅度增加, 同时极大值都位于近地面层。在 300 m、700 m、1500 m 和 3000 m 高度分别监测到 0.4 g/m³、0.5 g/m³、0.3 g/m³ 和 0.1 g/m³ 四个峰值, 低层液水含量较大。伴随降雪加强, 低层液水含量随之也迅速减少。至 08 时, 仅 300 m 高度以下还监测有明显液水, 最大含量仅 0.1 g/m³。若将近地层液水含量视作雾的含水量, 可见降雪对雾的冲刷作用促使了雾含水量有所降低。

从微波辐射计监测的不同时次温度廓线变化来看(图 9a), 本次雪雾共生例地面至高空整层气温都低于 0℃, 属冷雾; 700 m 高度以下位于冷雾层, 气温变化不明显, 层结稳定。同时也可以看到, 高层温度总体随时间趋于降低, 变化幅度较小, 不似前述雨雾共生例高层温度存在的大幅增降过程。

图 9b 相对湿度廓线变化表明, 在 5 km 以下高度, 相对湿度在降雪过程中经历了先增加后降低的过程。04 时, 接近 50% 的最小相对湿度位于 4 km 附近。随着降雪强度加大; 到了 05 时, 5 km 以下整层相对湿度明显增加; 06~07 时降雪又持续加强, 4 km 高度以下相对湿度又有所增大; 08 时前后降雪结束, 5 km 高度以下相对湿度开始大幅度降低, 最小值不到 40%, 这是中层干冷空气侵入的结果。而不管降雪强度高低, 2.5 km 高度以下一直存在饱和层, 且饱和层的顶部随降雪过程变化。自 04 时至 07 时, 随着降雪强度的加大, 饱和层顶部不断抬高, 亦即相对湿度为 100% 的气层厚度在不断加大。从 04 时约 1500 m 抬升到 07 时的 2500 m 以上, 也就是饱和层的厚度增加超过 1000 m。而 08 时后降雪结束时, 水汽饱和层的顶部又回落到比原来顶高稍高的位置。

5 结论和讨论

本文通过对 2007 年秋冬季雨雾、雪雾两次共生雾天气的地面和高空气象要素变化分析, 获得如下结果:

(1) 高湿、小风是雨雾和雪雾生成并造成地面低能见度的主要气象条件。大雾形成与维持过程

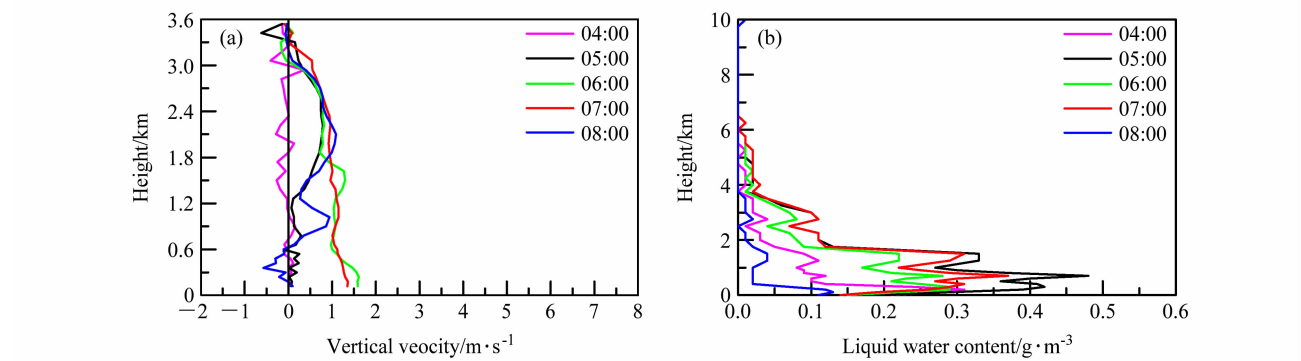


图 8 2007 年 12 月 28 日风廓线仪探测垂直速度廓线 (a) 与微波辐射计遥测液水含量廓线 (b) 随时间变化
Fig. 8 Changes of (a) vertical velocity observed from the wind profiler and (b) the liquid water content derived from the radiometer at different time on 28 Dec 2007

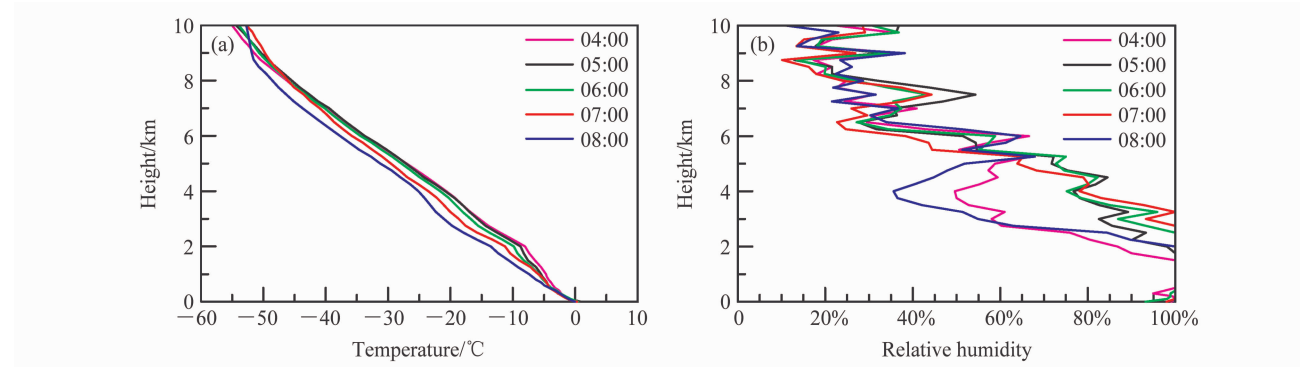


图 9 2007 年 12 月 28 日微波辐射计遥测的温度廓线 (a) 和相对湿度廓线 (b) 随时间变化
Fig. 9 Profiles of (a) temperature and (b) relative humidity detected from the radiometer at different time on 28 Dec 2007

中，地面水平能见度与相对湿度的反相关关系非常显著；能见度越低时，雾含水量也越高，也呈显著的反相关关系；大雾形成时，地面风速通常都较弱。

(2) 降雨或降雪过程对雾确有冲刷作用。较弱的降雨和降雪可以促使雾含水量减少，提高能见度，但降雨或降雪蒸发所增加的湿度又有利于雾的维持，对改善近地面层雾能见度不能起到显著的作用。

(3) 雨雾个例在降雨过程中，微波辐射计监测到高层气温经历了大幅增降现象。除与天气系统有关外，其与云层中水汽凝结释放的大量潜热和含水量大幅度增加也有关系。雪雾个例在降雪过程中，高层温度总体随着时间趋于降低，且变化幅度较小。

(4) 雨雾和雪雾在降雨、降雪过程中低层一直存在水汽饱和层，且饱和层顶部伴随降雨和降雪强度的加大而抬升，厚度不断加大，造成地面水平能见度进一步下降。这可能是降水蒸发增加空气湿度的结果。

基于以上分析结果，较弱的降雨或降雪过程对消除暖雾、冷雾的影响有限，对改善地面水平能见度的作用并不显著。这意味着采用播撒催化剂（吸湿剂或成冰剂等）的方法消雾，激发出的降水和碰并冲刷过程必须达到一定强度。催化剂的播撒剂量、形成的降水强度和造成的冲并作用可以用数值试验的方法做进一步研究。此外，干冷空气驱散大雾的快速且作用显著，这也表明人工消除暖雾或冷雾实践中可以综合考虑动力和热力效应。

致谢 感谢北京市气候中心轩春怡和北京市气象台魏东提供的相关地面自动/人工气象站观测资料。

参考文献 (References)

Bankova N J, Koloskov B P, Krasnovskaya L I, et al. 2003. Development of the automated system of ground nitrogen generators for dissipation of the supercooled fogs on highway [C]. 8th WMO Scientific Conference on Weather Modification, WMO/TD No. 1146: 385–388.

Brown R, Roach W T. 1976. The physics of radiation fog. Part II: A numerical study [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 102: 335–

- 354.
- 董剑希, 雷恒池, 胡朝霞, 等. 2006. 北京及其周边地区一次大雾的数值模拟及诊断分析 [J]. 气候与环境研究, 11 (2): 175–184.
- Dong Jianxi, Lei Hengchi, Hu Zhaoxia, et al. 2006. Numerical simulation and diagnosis of a dense fog in Beijing and its penumbra [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (2): 175–184.
- Duynerkerke P G. 1999. Turbulence, radiation and fog in Dutch stable boundary layers [J]. Bound.-Layer Meteor., 90: 447–477.
- Ecklund W L, Gage K S, Williams C R. 1995. Tropical precipitation studies using a 915 MHz wind profiler [J]. Radio Sci., 30: 1055–1064.
- Fukuta N. 1996. Project mountain valley sunshine—Progress in science and technology [J]. J. Appl. Meteor., 35: 1483–1493.
- Fuzzi S, Facchini M C, Lind J A, et al. 1992. The Po valley fog experiment 1989: An overview [J]. Tellus, 44B: 448–468.
- 高建秋, 王广河, 关立友, 等. 2008. 新型消暖雾催化剂与传统吸湿性催化剂消雾性能的室内对比试验 [J]. 干旱气象, 26 (2): 67–73.
- Gao Jianqiu, Wang Guanghe, Guan Liyou, et al. 2008. Experiment on the capability of a new warm fog dissipation agent in the laboratory [J]. Arid Meteorology (in Chinese), 26 (2): 67–73.
- 郭恩铭, 刘钟源, 蒋瑞滨. 1990. 人工影响暖雾试验研究 [J]. 气象学报, 48 (2): 232–241.
- Guo Enming, Liu Zhongyuan, Jiang Ruibin. 1990. An experimental study on warm fog modification [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 48 (2): 232–241.
- 何晖, 郭学良, 刘建忠, 等. 2009. 北京一次大雾天气边界层结构特征及生消机理观测与数值模拟研究 [J]. 大气科学, 33 (6): 1174–1186.
- He Hui, Guo Xueliang, Liu Jianzhong, et al. 2009. Observation and simulation study of the boundary layer structure and the formation, dispersal mechanism of a heavy fog event in Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 33 (6): 1174–1186.
- 黄庚, 关立友, 苏正军. 2006. 液氮消冷雾微结构的演变分析 [J]. 气象, 32 (3): 27–31.
- Huang Geng, Guan Liyou, Su Zhengjun. 2006. Microstructure characteristics of cold fog before and after artificial seeding LN [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 32 (3): 27–31.
- 黄建平, 李子华, 黄玉仁, 等. 2000. 西双版纳地区雾的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 24 (6): 821–834.
- Huang Jianping, Li Zihua, Huang Yuren, et al. 2000. A three-dimensional model study of complex terrain fog [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 24 (6): 821–834.
- Jean P C. 2005. Fog dissipation [R]. Report of the Twenty First Session of the CAS Working Group on Physics and Chemistry of Clouds and Weather Modification Research. WMO/TD No. 1294, 23–27.
- 李子华. 2001. 中国近 40 年来雾的研究 [J]. 气象学报, 59 (5): 616–624.
- Li Zihua. 2001. Studies of fog in China over the past 40 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 59 (5): 616–624.
- 马雁军, 左洪超, 张云海, 等. 2005. 辽宁中部城市群大气能见度变化趋势及影响因子分析 [J]. 高原气象, 24 (4): 623–628.
- Ma Yanjun, Zuo Hongchao, Zhang Yunhai, et al. 2005. Analyses on variation trends of atmospheric visibility and its effect factor in multi-cities in central Liaoning [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (4): 623–628.
- Möller D, Wiprecht W, Hofmeister J, et al. 2003. Fog dissipation by nucleation scavenging using particle blasting [C]. 8th WMO Scientific Conference on Weather Modification, WMO/TD No. 1146, 389–392.
- Musson-Genon L. 1987. Numerical simulation of a fog event with a one-dimensional boundary layer model [J]. Mon. Wea. Rev., 115: 592–607.
- 濮江平, 魏阳春, 王伟民, 等. 2001. 涡喷消雾装置试验研究 [J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 2 (5): 87–91.
- Pu Jiangping, Wei Yangchun, Wang Weimin, et al. 2001. Performance analysis of jet engine device for fog clearing [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (in Chinese), 2 (5): 87–91.
- Roach W T, Brown R, Caughey S J, et al. 1976. The physics of radiation fog. Part I: A field study [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 102: 313–333.
- 阮征, 葛润生, 吴志根. 2002. 风廓线仪探测降水云体结构方法的研究 [J]. 应用气象学报, 13 (3): 330–338.
- Ruan Zheng, Ge Runsheng, Wu Zhigen. 2002. Method for detecting rain cloud structure with wind profilers [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (3): 330–338.
- Solheim F, Godwin J R, Westwater E R, et al. 1998. Radiometric profiling of temperature, water vapor, and cloud liquid water using various inversion methods [J]. Radio Science, 33: 393–404.
- 王淑英, 张小玲, 徐晓峰. 2003. 北京地区大气能见度变化规律及影响因子统计分析 [J]. 气象科技, 31 (2): 109–114.
- Wang Shuying, Zhang Xiaoling, Xu Xiaofeng. 2003. Analysis of variation features of visibility and its effect factors in Beijing [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 31 (2): 109–114.
- 王伟民, 卢伟, 黄培强, 等. 2002. 几种消暖云 (雾) 催化剂性能的实验研究 [J]. 气象科学, 20 (4): 478–486.
- Wang Weimin, Lu Wei, Huang Peiqiang, et al. 2002. An experimental study on specific property of several catalytic agent applied in artificial warm cloud and fog dissipation [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 20 (4): 478–486.
- 王欣, 卞林根, 彭浩, 等. 2005. 风廓线仪系统探测试验与应用 [J]. 应用气象学报, 16 (5): 693–698.
- Wang Xin, Bian Lin'gen, Peng Hao, et al. 2005. The atmospheric wind profiler and ratio acoustic sounding system with its applications [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 16 (5): 693–698.
- 徐怀刚, 邓北胜, 周小刚, 等. 2002. 雾对城市边界层和城市环境的影响 [J]. 应用气象学报, 13 (特刊): 170–176.
- Xu Huaigang, Deng Beisheng, Zhou Xiaogang, et al. 2002. Effect of fog on urban boundary layer and environment [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (Special Issue): 170–176.

- 许绍祖,尹球. 1988. 雾能见距离和光衰减系数的参数化公式 [J]. 气象科学, 4: 62-68. Xu Shaozu, Yin Qiu. 1988. The parameterization of visibilities and extinction coefficients in fogs [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 4: 62-68.
- 闫敬华,徐建平. 2001. 华南地区降水与雾的关系初探 [J]. 广东气象, 2: 19-21. Yan Jinghua, Xu Jianping. 2001. A study on the relationship between fog and rainfall over South China [J]. Guangdong Meteorology (in Chinese), 2: 19-21.
- 杨引明,陶祖钰. 2003. 上海 LAP-3000 边界层风廓线雷达在强对流天气预报中的应用初探 [J]. 成都信息工程学院学报, 18 (2): 155-160. Yang Yinming, Tao Zuyu. 2003. Application of Lap-3000 boundary wind profile radar to severe convective weather forecast [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese), 18 (2): 155-160.
- 周小刚,王强,邓北胜,等. 2004. 北京市一次大雾过程的边界层结构的模拟研究 [J]. 气象学报, 62 (4): 468-475. Zhou Xiaogang, Wang Qiang, Deng Beisheng, et al. 2004. Numerical simulation on the boundary layer structure during a heavy fog process over Beijing metropolitan area [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (4): 468-475.

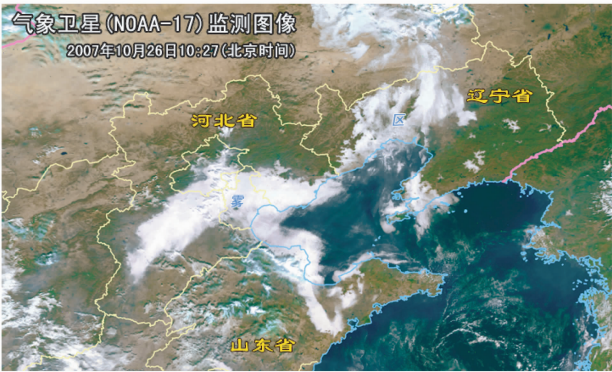


图 2 2007 年 10 月 26 日 10:27 (北京时, 下同) 气象卫星雾的监测
Fig. 2 Fog monitoring from the satellite NOAA-17 at 1027 LST 26 Oct 2007

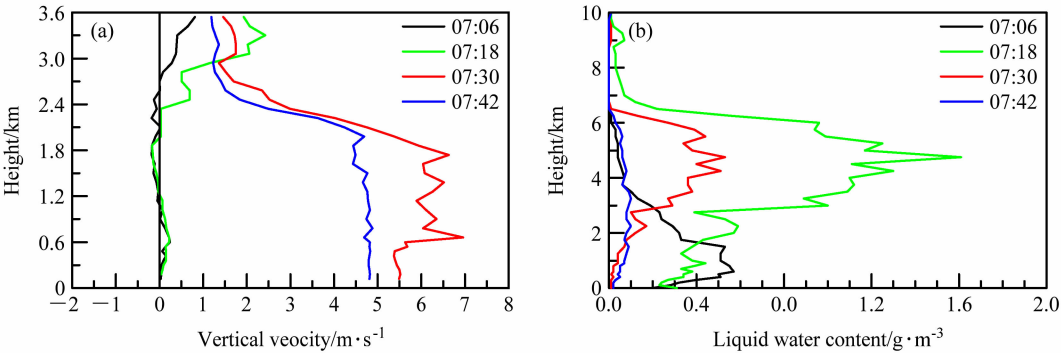


图 5 2007 年 10 月 27 日风廓线仪探测垂直速度廓线 (a) 与微波辐射计遥测液水含量廓线 (b) 随时间变化
Fig. 5 Changes of (a) vertical velocity observed from the wind profiler and (b) the liquid water content derived from the radiometer at different time on 27 Oct 2007

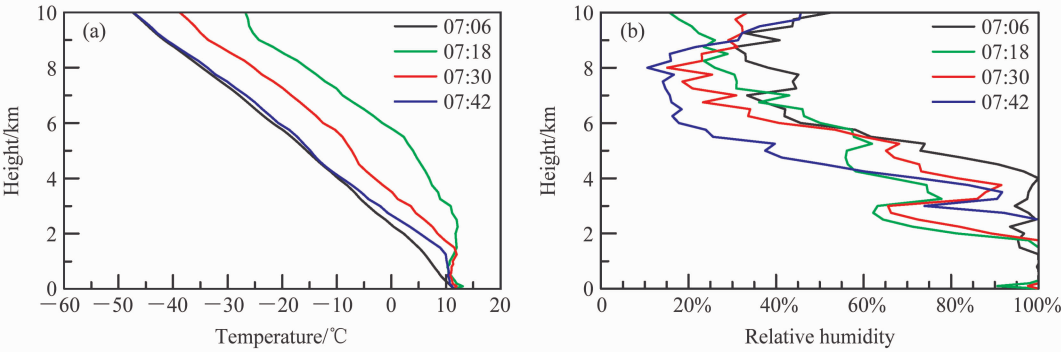


图 6 2007 年 10 月 27 日微波辐射计遥测的温度廓线 (a) 和相对湿度廓线 (b) 随时间变化
Fig. 6 Profiles of (a) temperature and (b) relative humidity detected from the radiometer at different time on 27 Oct 2007