

郭丽君, 郭学良. 2016. 北京 2009~2013 年期间持续性大雾的类型、垂直结构及物理成因 [J]. 大气科学, 40 (2): 296–310. Guo Lijun, Guo Xueliang. 2016. The type, vertical structure and physical formation mechanism of persistent heavy fog events during 2009–2013 in the Beijing region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (2): 296–310, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1505.14275.

北京 2009~2013 年期间持续性大雾的类型、 垂直结构及物理成因

郭丽君^{1,2} 郭学良¹

¹ 中国气象科学研究院云雾物理环境重点实验室, 北京 100081

² 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

摘 要 北京地区持续性大雾天气近几年呈显著增加趋势,但由于缺乏高时间分辨率的雾微物理和大气廓线数据,限制了对大雾垂直结构和物理成因的深入了解。本文基于美国 Radiometrics 公司生产的 35 通道 MP-3000A 型微波辐射计廓线仪 (Microwave Radiometer Profiler, 简称 MWRP) 及常规气象和卫星观测资料分析研究了 2009~2013 年期间北京地区 13 次大雾天气过程的类型、垂直结构特征及其产生的物理成因。按照雾产生的基本条件,将 13 次大雾天气主要划为平流雾和蒸发雾两类,辐射雾存在于持续性大雾过程中,不做单独划分。平流雾的平均雾顶高度不超过 1.0 km,而蒸发雾的平均雾顶高度在 0.5~1.5 km 之间。平流雾主要是由来自西南和东南的暖湿平流移经北京地区冷下垫面后冷却降温过程产生,强逆温的形成有利于雾的持续发展。而蒸发雾是由本地区降水蒸发冷却形成,或是冷平流移经暖湿下垫面形成。按照微波辐射计连续观测的雾宏微观垂直结构特征,将 13 次大雾天气过程又划分为单一雾结构和云雾共存结构,并采用卫星和地面气象观测数据对部分典型雾个例进行了比较验证研究。结果表明,在 13 次大雾天气中,平流雾和蒸发雾各占 69%和 31%。由此说明北京地区持续性大雾天气主要是由暖湿平流过程和降水蒸发冷却过程造成,与天气过程的异常密切相关。单一雾结构仅占 15%,而云雾共存结构占近 85%,且持续三天以上的大雾天气基本具有云雾共存结构。

关键词 雾类型 垂直结构特征 地基 35 通道微波辐射计 北京地区

文章编号 1006-9895(2016)02-0296-15

中图分类号 P426.4

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1505.14275

The Type, Vertical Structure and Physical Formation Mechanism of Persistent Heavy Fog Events during 2009–2013 in the Beijing Region

GUO Lijun^{1,2} and GUO Xueliang¹

¹ Key Laboratory for Cloud Physics, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

² Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract The tendency of heavy fog events has increased rapidly in recent years in the Beijing region. A better

收稿日期 2014-09-28; **网络预出版日期** 2015-05-20

作者简介 郭丽君,女,1987 年出生,博士研究生,主要从事云降水物理的研究。E-mail: taojia992@163.com

通讯作者 郭学良, E-mail: guoxl@mail.iap.ac.cn

资助项目 公益性行业(气象)科研专项 GYHY200806001,江苏省普通高校研究生科研创新计划项目 CXZZ13_0511,中国气象科学研究院基本科研业务专项 2011Z005

Founded by the Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant GYHY200806001), the Postgraduates Research Innovation of Jiangsu Higher Education Institutions (Grant CXZZ13_0511), the Special Foundation of Chinese Academy of Meteorological Sciences (Grant 2011Z005)

understanding of the vertical structure and physical formation mechanism of these heavy fog events is limited due to a lack of high temporal resolution data of fog microphysics and atmospheric profiling data. In this study, we investigated the type, vertical structure and physical formation mechanism of 13 fog events in autumn and winter in Beijing based on the atmospheric profiling data of Microwave Radiometer Profiles (MWRPs) with 35 channels produced by Radiometrics Corporation and routine meteorological and satellite data. We classified the 13 fog events into advection fog and evaporation fog from their basic formation processes. Radiation fog as part of the persistent process was not listed alone. The average top height of advection fog was less than 1.0 km, and that of precipitation evaporation fog was between 0.5 km and 1.5 km. Advection fog in the Beijing region was mainly caused by the cooling process of warm and wet flow advection from the southwest and southeast moving over a cold underlying surface. The strong inversion formed was favorable to the sustained development of the fog events. Evaporation fog was caused by the cooling process of water vapor evaporated from falling raindrops, or the cooling process due to cold air advection. We also categorized the 13 fog events into those with single fog structure and those with fog-cloud structure, based on the vertical structure observed by MWRP. Some typical cases were further verified by satellite and surface meteorological observation data. The results show that advection fog and evaporation fog accounted for 69% and 31% of the 13 fog episodes, respectively, indicating that the heavy long-lasting fog events in Beijing were mainly caused by advection and precipitation processes, which was closely related to the abnormal weather process. The proportion of single-structure fog was only about 15%, while that with a co-existing structure of low-level fog and high-level cloud reached about 85%. Severe fog events, lasting for more than three days, were almost all characterized by a fog-cloud structure.

Keywords Fog type, Vertical structure, Multi-channel microwave radiometer profiler, Beijing

1 引言

雾是近地面空气中悬浮的大量水滴或冰晶微粒而使水平能见度降到 1 km 以下的天气现象。在稳定的大气边界层结构下, 污染物的长时间累积和雾水环境会产生物理化学反应过程, 对人类健康会造成严重的危害。近几年, 我国雾霾天气频发, 有关雾的微物理、数值模拟和产生条件研究也呈现增加趋势(何晖等, 2009; 吴彬贵等, 2010; 陆春松等, 2010; 李子华等, 2011; 贾星灿和郭学良, 2012; 张舒婷等, 2013; 岳岩裕等, 2013; 于华英等, 2015)。

雾天气的统计研究表明, 雾的类型、垂直结构及产生机理非常复杂, 与辐射、天气过程、边界层结构、下垫面状况、气溶胶含量等密切相关。依据雾产生的物理成因, 主要分为冷却雾和蒸发雾(李子华等, 2008)。冷却雾主要包括辐射雾和平流雾。辐射雾由辐射降温引起, 一般发生在反气旋和均压场内, 晴夜、静风和高相对湿度有利于辐射雾的形成(Roach et al., 1976; Meyer and Lala, 1990)。平流雾是暖湿平流经过冷下垫面冷却形成, 一般发生在地面气旋暖区、冷海面 and 海岸附近, 风速较辐射雾更大(Koraćin et al., 2014)。蒸发雾是冷平流移经暖湿下垫面, 由暖湿下垫面蒸发的水汽进入冷区凝结形成, 或者是降水在冷区蒸发冷却形成。蒸发雾可以发生在湖面和海面上(Koraćin et al., 2014), 降水蒸发雾常发生在锋面暖区。Tardif and Rasmussen

(2008) 总结了降水蒸发雾的物理成因, 并统计了发生在纽约附近降水蒸发雾的天气形势, 在 9 种天气形势中暖锋前部和弱槽型发生的频率最高, 都高达 17%。Tardif and Rasmussen (2007) 在纽约雾的统计分析中考虑了云底高度、云量和降水等信息, 根据成因将雾分为 5 类, 除了常见的辐射雾和平流雾外, 还有降水雾、蒸发雾、云接地雾, 并发现云接地雾发生在有降水并伴随近地面温度下降的情况下, 出现在冬季和春季的可能性较大。

平流雾和降水雾往往具有云雾共存结构特征。在层云接地的过程中, 云顶的辐射降温会引起云内的不稳定, 冷却的空气和云滴以湍流涡动的形式向下传输, 云底之下蒸发的水汽在冷却的环境下导致层云接地(Oliver et al., 1978; Pilić et al., 1979)。在低云向海雾转化的研究中, 云顶的辐射降温是低云和海洋层混合和冷却的重要机制(Koraćin et al., 2001)。Westcott and Kristovich (2009) 对伴有低云和降水的陆地浓雾进行了气候学统计分析, 发现 57% 的雾都发生在有低云存在的情况下, 并通过个例分析得到, 浓雾发生在弱降水之后, 降水的蒸发加湿了低层大气并达到饱和状态, 冷却作用克服了弱暖平流的增温并使低层大气达到过饱和, 同时红外云图表明, 发展深厚的云随着低压系统移到雾发生地点演变成低云, 低云的辐射降温促进了凌晨浓雾的形成。尹球和徐绍祖(1994)在数值研究辐射雾的生消机制时发现, 云层具有增加向下长波辐射

通量起保温的作用,也具有阻挡太阳辐射的作用。1.5 km 处的云层能有效阻止雾的形成并加快雾的消散,而 4.5 km 处的云层未能阻止雾的形成反而阻碍了雾的消散。

雾的垂直结构不仅受局地气象要素变化的影响,还受平流、降水、低云和天气系统的影响,如辐射雾顶高度一般在几百米左右,而平流雾受暖湿平流的影响具有更高的顶高度。由于观测手段的限制,雾的垂直结构研究比较困难,目前的一些观测研究一般借助气象铁塔或系留气艇获取温湿廓线,以揭示产生雾的边界层结构(Fuzzi et al., 1992, 1998; 吴彬贵等, 2008)。Pinnick et al. (1978) 利用球载光散射气溶胶计数器研究了雾滴和霾粒子的数浓度和尺度分布的垂直结构特征。Egli et al. (2015) 利用系留汽艇获取温度、湿度、液态水含量、雾滴数浓度和有效半径的垂直廓线,分析了雾在不同发展阶段的微物理垂直结构特征。此外,一些主动遥感设备也应用到雾的垂直结构研究中,如激光雷达、毫米波雷达和云高仪等。Tomine et al. (1991) 利用移动式激光雷达调查了云雾衰减系数的垂直结构特征,发现衰减系数与温度和风的变化有密切关系,同时衰减系数的分层指示了雾的分层结构。Boers et al. (2013) 利用 35 GHz 雷达研究了雷达反射率和能见度的关系,结果表明即使能见度低于 100 m, 雷达反射率也不会超过 -25 dBZ, 在雾形成和蒸发阶段雷达反射率和能见度的关系不同。Hamazu et al. (2003) 利用 35 GHz 雷达观测辐射雾、平流雾和海雾,获得了雷达反射率因子的水平和垂直分布。Nowak et al. (2008) 结合云雷达和激光云高仪探测雾和低云的边界,云高仪可以有效探测到云(雾)底高度,云雷达更适合探测云顶高度,并且干燥环境时比降水条件时的探测效果更好。

大量雾的研究基本局限在地面观测试验,如雾滴谱、含水量等(Li et al., 1994; Niu et al., 2010; Quan et al., 2011; Lu et al., 2013)。通过探空可以获取大气温湿层结状况,但很难直接获取雾微物理垂直分布结构。气象铁塔可获取 300 m 以下的气象要素廓线信息,但依然存在探测高度受限的问题。因此目前对雾垂直微物理结构特征的了解不多。

最近几年多通道微波辐射计已经开始应用在雾的监测和数值模式验证研究中,如 Ware et al. (2003) 研究了发生在 2001 年 2 月 16 日科罗拉多

州 Boulder 市的一次上坡雾过程,对比了 MM5 (Mesoscale Model 5) 模式预报和微波辐射计探测的温湿度和液态水廓线结构,结果表明,微波辐射计可以清晰地反映雾的温湿结构和液态水含量的垂直结构,而模式预报的却是云过境的过程,Knupp et al. (2009) 对同一个例的研究中发现,相对湿度和液态水路径的急剧变化指示了雾的形成和发展。Gultepe and Milbrandt (2007) 在安大略湖南部一次暖雾的研究中,从微波辐射计的相对湿度和液态水含量廓线变化中看出层云被抬升至 1 km 以上,1 km 以下雾的相对湿度接近 100%。Guo et al. (2015) 在中国华北一次持续性雾霾的研究中通过相对湿度廓线的变化揭示了辐射雾向平流雾的转化过程。虽然关于微波辐射计反演液态水含量精度有待进一步提高(Solheim et al., 1998; Crewell et al., 2009),但液态含水量的垂直分布有助于判断云雾的发展高度和强度。

尽管多通道微波辐射计廓线仪可获得高时间分辨率的温湿度廓线数据,对揭示雾的结构、演变过程和物理成因非常重要,但目前大部分研究工作仅限于个例研究。近几年北京地区大雾天气呈显著增加趋势,但由于缺乏比较系统的雾观测数据,对该地区雾的类型、垂直结构及相应的物理成因研究不足。为进一步提高对北京持续性大雾天气形成原因的认识,本文利用美国 Radiometrics 公司生产的 35 通道 MP-3000A 型微波辐射计在 2009~2013 年期间观测的北京地区秋冬季的 13 次大雾天气过程,分析了雾的类型、垂直结构及产生机理,并依据卫星、地面气象观测数据和探空数据对部分典型个例进行了检验研究。

2 观测数据及处理

本研究使用的 Radiometrics 公司生产的两台 35 通道 MP-3000A 型微波辐射计廓线仪(MicroWave Radiometer Profiler, 简称 MWRP) 型号分别为 MP-3055A 和 MP-3069A (简称为 3055 和 3069), 观测试验期间分别安装在河北省涿州市气象局和北京市海淀区国家气象局大院。3055 从 2009 年 4 月至 2010 年 10 月在北京观测,从 2010 年 11 月至 2012 年 7 月在涿州观测,3069 从 2010 年 5 月至 2013 年 12 月一直在北京观测。本研究统计分析了两台微波辐射计在涿州和北京观测到的 13 次雾天气过程。

MWRP 的 35 个通道包括 V 波段(51~59 GHz)的 14 个通道和 K 波段(22~30 GHz)的 21 个通道, 实际探测中只用到了其中的 22 个通道。两台 MWRP 均采用相同的神经网络反演算法, 反演产品包括: 可降水量(PWV)、液态水路径(LWP), 以及温度(T)、水汽密度(ρ)、相对湿度(RH)和液态水含量(LWC)的垂直廓线, 廓线数据具有 58 个高度层, 0.5 km 以下、0.5~2 km 之间和 2~10 km 之间的高度分辨率分别是 50 m、100 m 和 250 m。

PWV 和 LWP 是单位面积内垂直路径上水汽和液态水总量。其反演技术已经有三十多年的历史, PWV 的均方根误差大致在 1 mm 以内(Westwater et al., 2005)。刘红燕等(2009)对比了北京地区微波辐射计与探空和 GPS 测量水汽的差异, MWRP 反演 PWV 与探空和 GPS 的平均偏差分别为 0.281 cm 和 0.322 cm。由于缺乏对云水的外场观测使得 LWP 的验证比较困难(Westwater et al., 2005)。MWRP 可以实时获取温湿度和 LWC 廓线, 但数据的准确性直接影响分析结果的可靠性。MWRP 以天顶方向垂直遥感大气廓线时, 落在天线罩上的降水会影响大气发射的辐射, 导致反演结果出现错误(Ware et al., 2013), 因此, 本文研究中, 剔除了强降水导致反演异常的数据。

MWRP 对温湿度廓线的反演是通过神经网络算法建立温湿度和亮温之间的关系, 再由观测的多通道亮温反演出高达 10 km 的温湿度廓线。本研究中 3069 探测的 10 个雾个例时次(08:00 和 20:00, 北京时, 下同)的温湿度廓线的反演精度已由常规气象探空数据检验, 3055 探测的 1 个雾个例的边界层内温湿度廓线反演精度已由系留气艇探空数据检验(郭丽君和郭学良, 2015)。但受探测能力的限制, 对 LWC 廓线的检验比较困难。Ware et al.(2003)

曾对比探空测量和 MWRP 反演的 LWC 廓线, 两者对云探测的一致性在 50%左右, 但 Crewell et al. (2009)认为微波辐射计不具备提供准确液态水垂直分布的能力。由于 MWRP 只能获取最低一层云的 LWC 廓线(Ware et al., 2003; Westwater et al., 2005), 因此云雾共存时, MWRP 只能探测到雾的 LWC 廓线, 需要 RH 垂直廓线补充雾层以上的水汽饱和程度情况, 然后通过 Terra/Aqua-Modis[Terra 和 Aqua 卫星上搭载的中分辨率成像光谱仪(MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer), 简称 Terra/Aqua-Modis]的可见光云图、FY-2E(风云 2E 静止卫星)IR1 通道(10.3~11.3 μm)的红外云图检验云存在的情况。

使用 2011 年 12 月 4 日在河北涿州开展的典型雾—霾观测试验期间的雾滴谱仪(Fog Monitor, 简称 FM)的 LWC 数据对 MWRP MP-3055A 近地面的 LWC 进行检验。MWRP 反演的 LWC 数据产品的精度是 10^{-3} g m^{-3} , 远小于雾滴谱仪的精度(10^{-6} g m^{-3})。2011 年 12 月 4 日 04:45~04:58 的 13 分钟内, LWC 从 10^{-5} g m^{-3} 急剧增加到 10^{-2} g m^{-3} 量级, MWRP 的 LWC 变化较为平缓, 虽然两者不能完全一一对应, 但是在量级的变化上较为一致, 对应 RH 的变化特征, 当 RH=100%时 MWRP 的 LWC 均达到了 0.02 g m^{-3} 以上。MWRP 的 LWC 廓线数据是通过神经网络算法建立先验 LWC 和亮温之间的关系, 再由观测的多通道亮温反演出 LWC 廓线, LWC 的准确性受亮温的探测精度、先验 LWC 算法和神经网络算法的影响, 很难达到直接探测的精度。

另外, 本文还使用了地面气象观测数据、探空数据和 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)/NCAR(National Center for Atmospheric Research)再分析资料数据。

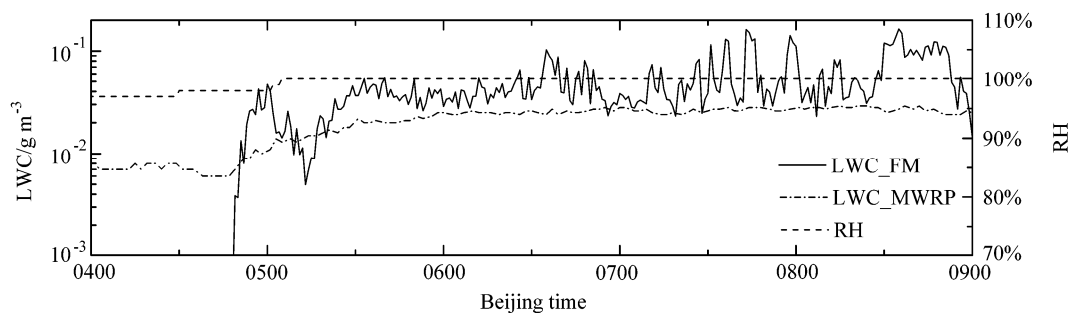


图1 2011年12月4日MWRP反演的地面LWC和FM探测的LWC对比

Fig. 1 Comparison between liquid water content (LWC) retrieved from MWRP (Microwave Radiometer Profiler) and LWC observed by FM (Fog Monitor) on 4 December 2011

3 持续性大雾的一般特征

在统计雾过程时,对持续几天的雾天气过程中出现的短暂减弱和降水情况没有分开进行统计,而是视为一个雾过程。雾的类型依据其形成的物理成因划分。13 次雾过程的微波辐射计观测型号,雾开始时间、持续时间、类型以及云雾共存情况和物理成因见表 1。

通过对表 1 中 13 次雾的成因分析可知,平流雾是北京地区持续性大雾的主要类型,其比例高到 69%,来自西南和东南方向的持续性暖湿平流是造成雾持续性发展、影响范围大的主要原因,通常持续平流雾的西侧边界受太行山影响边界清晰。蒸发雾发生的比例占 31%,由降水蒸发冷却形成,或是冷平流移经暖湿下垫面形成。13 次持续性大雾发展的过程中也存在辐射降温影响,如个例 6 是在先有辐射雾形成的情况下,降水的发生促使了降水蒸发雾的发展。所以,在雾发展演变的过程中,往往存在多种形成机制。

在 13 次雾过程中,持续时间均达到了 13 h 以上,都具有持续性发展的特点,对于长达几十小时甚至 100 h 以上的雾天气,其间存在暂时雾减弱或消散的现象。单层辐射雾往往存在于持续性大雾过程中,由于持续时间短,没有作为单独类型列出。

为方便统计分析,以 $LWC \geq 0.02 \text{ g m}^{-3}$ 定义为雾区的范围,雾区的最高边界则为雾顶高度。该阈值的选择主要基于第 2 节中对 LWC 的检验结果,目的是获取强雾区。RH 作为另一参考量,若只有雾存在,水汽饱和区域的最高边界为雾顶高度,若

有云存在,水汽饱和区的最高边界为云顶高度,所以 $RH=100\%$ 区域的最高边界表示雾或云顶高度。针对每次雾天气过程,统计整个过程中的平均雾顶高度、最低雾顶高度和最高雾(云)顶高度,以及在不考虑强降水的异常观测时每次过程中最大和平均的 PWV 和 LWP,以及每次过程中最强的逆温强度、厚度及所在高度。表 2 给出了 13 次雾过程中用 LWC 表示的最低、最高和平均雾顶高度 ($H_{LWC, \min}$ 、 $H_{LWC, \max}$ 和 $H_{LWC, \text{ave}}$) 以及用 RH 表示的最低、最高和平均云顶高度 ($H_{RH, \min}$ 、 $H_{RH, \max}$ 和 $H_{RH, \text{ave}}$),分为以下两种情况:

(1) 以 $LWC \geq 0.02 \text{ g m}^{-3}$ 表示雾区时,雾区的最高边界表示雾顶,所有个例的平均雾顶高度 $H_{LWC, \text{ave}}$ 在 640 m 左右,其中最低的雾顶高度 $H_{LWC, \min}$ 在 350 m,最高的雾顶高度 $H_{LWC, \max}$ 在 1.8 km。无云存在时平流雾的 $H_{LWC, \text{ave}}$ 分别为 0.660 km (个例 1) 和 0.527 km (个例 2),云雾共存时不同平流雾个例的 $H_{LWC, \text{ave}}$ 变化区间为 0.481~0.818 km,蒸发雾的 $H_{LWC, \text{ave}}$ 变化区间为 0.473~1.458 km 之间。

(2) 由于 RH 和 LWC 的反演原理不同,参考以 $RH=100\%$ 表示水汽达到饱和的区域。以往的研究中以相对湿度 90% 左右作为云边界的阈值 (Crewell et al., 2009; Ware et al., 2003; Knupp et al., 2009),而通过 MWRP 和探空资料的误差分析可知 MWRP 反演 RH 在 2~5 km 偏高(郭丽君和郭学良, 2015),本研究选择 100% 作为阈值以避免 MWRP 过高的虚假反演,所以在低层水汽饱和区比雾区范围小。以 $RH=100\%$ 表示雾区时计算平均云(雾)

表 1 北京 2009~2013 年 13 次雾过程的微波辐射计型号、雾开始时间、持续时间、类型、云存在情况和物理成因

Table 1 MWRP (Microwave Radiometer Profiler) observation models, occurrence times, durations, types, cloud conditions, and physical mechanisms for 13 foggy processes in the Beijing region

个例	型号	发生时间	持续时间	类型	云雾共存情况	物理成因
1	3055	2009 年 11 月 25 日 12:00	24 h	平流雾	否	西南暖湿平流
2	3055	2010 年 11 月 29 日 09:00	72 h	平流雾	否	偏东暖湿平流
3	3055	2011 年 12 月 1 日 22:00	134 h	平流雾	是	4 日前为西南暖湿平流, 4 日后为东南暖湿平流
4	3069	2010 年 9 月 15 日 17:00	24 h	降水蒸发雾	是	降水蒸发冷却形成
5	3069	2011 年 10 月 30 日 06:00	48 h	平流雾	是	西南暖湿平流
6	3069	2012 年 10 月 26 日 02:00	31 h	降水蒸发雾	是	降水蒸发冷却形成
7	3069	2012 年 12 月 12 日 00:00	120 h	蒸发雾	是	降水蒸发(升华)冷却形成, 冷平流移经暖湿下垫面
8	3069	2012 年 12 月 20 日 14:00	13 h	蒸发雾	是	降水蒸发(升华)冷却形成, 冷平流移经暖湿下垫面
9	3069	2012 年 12 月 28 日 01:00	13 h	平流雾	是	西南暖湿平流
10	3069	2013 年 1 月 11 日 00:00	110 h	平流雾	是	西南暖湿平流
11	3069	2013 年 1 月 19 日 19:00	35 h	平流雾	是	偏东暖湿平流
12	3069	2013 年 1 月 22 日 22:00	17 h	平流雾	是	西南暖湿平流
13	3069	2013 年 1 月 27 日 18:00	78 h	平流雾	是	西南暖湿平流

顶高度的数据量比用 LWC 表示时偏少，不足以代表整个雾过程的平均雾顶高度。如果是单一雾结构，水汽饱和区的上边界表示的是雾顶高度，如果是云雾共存结构，其上边界表示的是云顶高度，所以用 $RH=100\%$ 表示的云顶高度 H 可以弥补 LWC 有限的反演高度。单一雾结构时 RH 表示的雾顶高度 H_{RH} 与 LWC 表示的雾顶高度 H_{LWC} 有一定的差异，雾顶高度的两种表现方式的差异来源于 MWRP 对 LWC 和 RH 的反演原理的差异和算法的误差。本研究雾个例中，云雾共存结构占总雾个例 85% 左右， $H_{RH,max}$ 在表示云雾共存结构的最高云顶高度时均在 3.5 km 以上，最低云底高度 $H_{RH,max}$ 为 0 km 说明雾在发展过程中近地面达到水汽饱和。

表 2 北京地区 13 次雾个例的雾（云）顶高度统计
Table 2 The statistics of fog or cloud top heights for 13 cases in the Beijing region

个例	雾类型	$H_{LWC,ave}$ /km	$H_{LWC,min}$ /km	$H_{LWC,max}$ /km	$H_{RH,ave}$ /km	$H_{RH,min}$ /km	$H_{RH,max}$ /km
1	平流雾	0.660	0.350	1.400	1.794	1.400	2.000
2	平流雾	0.527	0.350	0.900	0.367	0.000	1.200
3	平流雾	0.522	0.350	1.600	2.066	0.000	5.000
4	降水蒸发雾	1.458	0.500	1.800	2.391	1.400	3.750
5	平流雾	0.481	0.400	1.200	0.935	0.600	3.500
6	降水蒸发雾	0.640	0.350	1.600	1.668	0.400	4.750
7	蒸发雾	0.632	0.350	1.500	3.675	0.000	5.000
8	蒸发雾	0.473	0.350	1.200	4.923	4.500	5.250
9	平流雾	0.516	0.350	0.600	4.823	4.500	5.250
10	平流雾	0.553	0.350	1.400	2.396	0.000	4.750
11	平流雾	0.587	0.350	1.500	5.103	4.500	7.000
12	平流雾	0.491	0.350	0.600	1.467	0.000	4.750
13	平流雾	0.818	0.350	1.500	2.750	0.300	5.000

注：个例序号与表 1 中一致， H 表示雾或云顶高度，下标 LWC、RH 分别代表以 LWC 和 RH 表示的雾或云顶高度，下标 ave、min、max 分别表示该次过程的平均、最低和最高的雾（云）顶

通过以上的统计分析可知，平流雾的平均雾顶高度一般不超过 1 km，而蒸发雾的平均雾顶高度与其发展程度密切相关，最低为 0.5 km 左右，最高可以达到 1.4 km 以上。用微波辐射计的 LWC 阈值表示雾区的上边界来定义雾顶高度更合理，但有降水时的 LWC 偏高，不能反映雾水的含量。以 $RH=100\%$ 表示的雾区范围偏小，云雾共存结构的 $H_{RH,ave}$ 已经不能代表平均雾顶高度，但 $H_{RH,max}$ 可以补充雾区以上的云顶高度信息。表 3 给出了 13 次雾过程中最大、平均 PWV 和 LWP，以及最强逆温强度、逆温厚度和逆温层底高度。

PWV 和 LWP 的变化与外界输送和局地产生有

关，LWP 在一定程度上指示和反映了雾和云的发展强度。在秋季（9~11 月）雾个例中（个例 1~2、4~6），云雾共存结构的 $PWV_{max}(PWV_{ave})$ 在 2.17~6.54 cm (1.50~6.11 cm) 之间，单一雾结构的 $PWV_{max}(PWV_{ave})$ 在 1.19~2.23 cm (0.78~1.56 cm) 之间。冬季（12 月到次年 2 月）雾个例中（个例 3、7~13），都是云雾共存结构， $PWV_{max}(PWV_{ave})$ 在 0.73~1.96 cm (0.43~1.06 cm)。单一雾结构时 LWP 代表的是垂直方向上雾水的垂直累积含量，当有云存在时，代表整层大气内雾水和云水在垂直方向上的共同累积含量。 $LWP_{max}(LWP_{ave})$ 与 $PWV_{max}(PWV_{ave})$ 具有相似的特点，冬季时比秋季较低，秋季时单一雾结构总体上比秋季云雾共存结构的 $LWP_{max}(LWP_{ave})$ 偏低。 LWC_{max} 反映了每次雾发展过程中的最强阶段，个例 3~8 中都有云系产生了降水，导致 LWC_{max} 高达 0.13 g m^{-3} 以上（除个例 8 降雪较弱外），而其他个例中雾的 LWC_{max} 都在 $0.04\sim0.11\text{ g m}^{-3}$ 之间。

逆温层是雾产生的重要条件，是影响雾发展强度和持续时间的重要因素，在整层大气中，可存在多层逆温层的可能。表 3 给出每一次雾过程中出现的最强逆温。强逆温的厚度在 50~200 m 之间，主要以近地面的逆温为主，也存在高层逆温的情况（个例 1、9、11、12）。

表 3 北京地区 13 次雾个例的 PWV、LWP、LWC 和最强逆温的统计
Table 3 The statistics of PWV(Precipitable Water Vapor), LWP (Liquid Water Path), LWC (Liquid Water Content), and the strongest inversion for 13 cases in the Beijing region

个例	雾类型	PWV_{max} (PWV_{ave})/ cm	LWP_{max} (LWP_{ave})/ mm	LWC_{max} / g m^{-3}	$I/^{\circ}\text{C}$ (100 m) $^{-1}$	H_{Π} /km	H_{IB} /km
		cm	mm	/ g m^{-3}	(100 m) $^{-1}$	/km	/km
1	平流雾	2.231 (1.563)	0.772 (0.249)	0.059	1.0	0.050	0.450
2	平流雾	1.185 (0.777)	0.352 (0.073)	0.060	3.2	0.200	0.000
3	平流雾	1.887 (0.777)	0.705 (0.058)	0.158	2.1	0.100	0.000
4	降水蒸发雾	6.543 (6.106)	2.108 (0.416)	0.581	1.1	0.050	0.000
5	平流雾	2.166 (1.498)	0.422 (0.078)	0.271	0.9	0.050	0.000
6	降水蒸发雾	3.677 (1.975)	0.750 (0.085)	0.216	2.2	0.100	0.000
7	蒸发雾	1.588 (0.805)	0.624 (0.151)	0.127	1.2	0.050	0.000
8	蒸发雾	1.240 (0.819)	0.307 (0.072)	0.059	0.8	0.050	0.000
9	平流雾	0.761 (0.624)	0.231 (0.132)	0.042	1.1	0.100	0.900
10	平流雾	0.944 (0.425)	0.424 (0.057)	0.076	2.2	0.100	0.000
11	平流雾	1.962 (1.063)	0.541 (0.137)	0.108	0.8	0.100	0.900
12	平流雾	0.726 (0.572)	0.216 (0.120)	0.038	0.7	0.050	0.350
13	平流雾	1.455 (0.729)	0.569 (0.157)	0.107	2.0	0.100	0.000

注：个例序号与表 1 中一致，下标 max、ave 分别表示该次过程的物理量的最大值和平均值， I 表示该次过程中最大逆温强度，单位为 $^{\circ}\text{C} (100\text{ m})^{-1}$ ， H_{Π} (Inversion Thickness) 表示逆温的厚度， H_{IB} (Inversion Base) 表示逆温底所在高度

4 典型大雾的垂直结构特征

微波辐射计提供了温湿度和液态水含量的时空分布特征,结合地面气象观测数据、探空数据、NCEP/NCAR 再分析资料和卫星云图等资料,可分析不同典型类型雾的形成机制及垂直结构特征。10 km 内的高度可能存在多层逆温结构,但对逆温的计算只选取某时间时的最强逆温层。本文选取具有代表性云雾共存结构的持续性大雾天气个例 7、10、13,持续时间均达到 78 h 以上,研究了垂直结构特征。

4.1 蒸发雾

蒸发雾是冷平流移经暖湿下垫面,由暖湿下垫面蒸发的水汽进入冷区后凝结形成,或者是降水在冷区蒸发冷却形成(本文称前种情况为蒸发雾,后种情况为降水蒸发雾)。2012 年 12 月 12~16 日北京、天津、河北南部等地经历了大范围雨雪和雾天气。

由每 3 小时一次地面气象观测资料可知,北京地区 12 月 12 日 08:00~14:00、12 日 17:00 至 13 日 17:00、13 日 20:00 至 14 日 14:00、14 日 17:00 至 16 日 02:00、16 日 05:00~17:00 和 16 日 20:00 期间交替出现雪、雾霾、雪、雾、雪和雾天气现象,图 2a、b 给出了其中两次比较明显的云系移动影响到北京的卫星红外云图。三次发生雾霾的时段 12 日 17:00~13 日 17:00、14 日 17:00 至 16 日 02:00 和 16 日 20:00 的前期均出现降雪过程,降雪与雾交替出现。

第一次雾发生的天气形势如图 3a 和 b,由于地面受到前期降雪的影响,北京及周边河北、天津地区的地面相对湿度较高(90%以上),温度较低(-10°C 左右),而 925 hPa 层的湿度较低(85%左右),温度较高(-7°C 左右),这种结构有利于雪升华过程产生的水汽在向上扩散过程中,发生凝结而形成雾滴,1400~2000 m 之间逆温层的形成使水汽凝结过程发生在近地面,从而形成大雾天气,因此,此次雾应该属于蒸发雾,如果伴随降雪过程,亦可称为降水蒸发雾。第二次雾过程中,15 日 14:00 925 hPa 层受西北弱冷平流的影响,出现干冷层(图 3c),而地面受前期降水的影响,仍然处于暖湿状态,而且温度高于 0°C (图 3d),导致地面融化雪水蒸发水汽上升冷却凝结成雾滴,地面观测到雾天气是由于冷平流移经暖湿下垫面形成的雾,属于比较典型

的蒸发雾。第三次雾过程与第二次雾过程产生机理相似,这里不再继续讨论。

由此可见,在此次持续性的大雾天气过程出现的雾过程,其产生机制并不完全相同。第一次雾过程类似于上层暖下层冷的结构中,暖雨滴下落到近地面蒸发形成降水雾,其本质是蒸凝过程(王鹏飞和李子华,1989;严文莲等,2010)。

图 4a 给出了 PWV、LWP 和云雾顶高度随时间的演变特征。降雪刚结束时雾顶高度 H_{LWC} 较高,随着平流的影响, H_{LWC} 逐渐降低。由图 4b 可知,整个蒸发雾过程中,最大逆温强度不超过 $1.2^{\circ}\text{C}(100\text{ m})^{-1}$,整个过程中多次出现多层逆温,这与高层的暖平流影响和雾顶的辐射降温有关。

4.2 平流雾结构特征

2013 年 1 月华北地区经历了多次强雾霾天气过程,具有持续时间长、范围广、部分地区雾强度大等特点(张人禾等,2014;王跃思等,2014)。2013 年 1 月共有 4 次雾过程:11~15 日、19~21 日、22~23 日和 27~31 日。

10~15 日雾形成和发展过程:该次雾霾天气持续时间长达 110 h,影响了中国中东部大部分地区,包括华北地区、山东西部、河南东部和苏皖大部分地区。地面天气形势表明,华北地区主要受弱高压控制,其间不断受到弱低气压系统影响。925 hPa 的气象要素场表明,西南暖湿平流的增强和西北干冷平流的侵入呈现不断反复交替的特点,以 2013 年 1 月 13 日为例说明平流雾过程(图 5a、b)。13 日 08:00 925 hPa 上来自西北方向的干冷气团强度减弱,西南暖湿气流影响到北京、天津等地,提供了充足的水汽条件,同时地面温度偏低,有利于暖湿平流移经冷下垫面形成雾。发展到 14 日 02:00 西北弱冷空气再次影响到华北地区,雾的强度减弱,但并没有改变大的天气形势,到 14 日 20:00 冷空气的减弱和暖湿空气的增强再次出现如图 5a、b 的天气形势特点。所以该次大雾天气过程是受天气系统影响的平流雾类型。

图 6 给出了 MWRP 探测的气象要素廓线的时间演变情况。由图 6a 可知,雾发生时 1 km 以下的温度都是在 0°C 以下,属于冷雾。图 6b 中雾期间近地面水汽密度 ρ 可高达 3 g m^{-3} 。图 6c 显示的 RH 与图 6d 显示的 LWC 的变化比较一致,最强的 LWC 出现在 1 月 13 日凌晨。在 ρ 和 RH 垂直分布图中,三次雾过程中近地面雾区上空对应 4.5 km 高

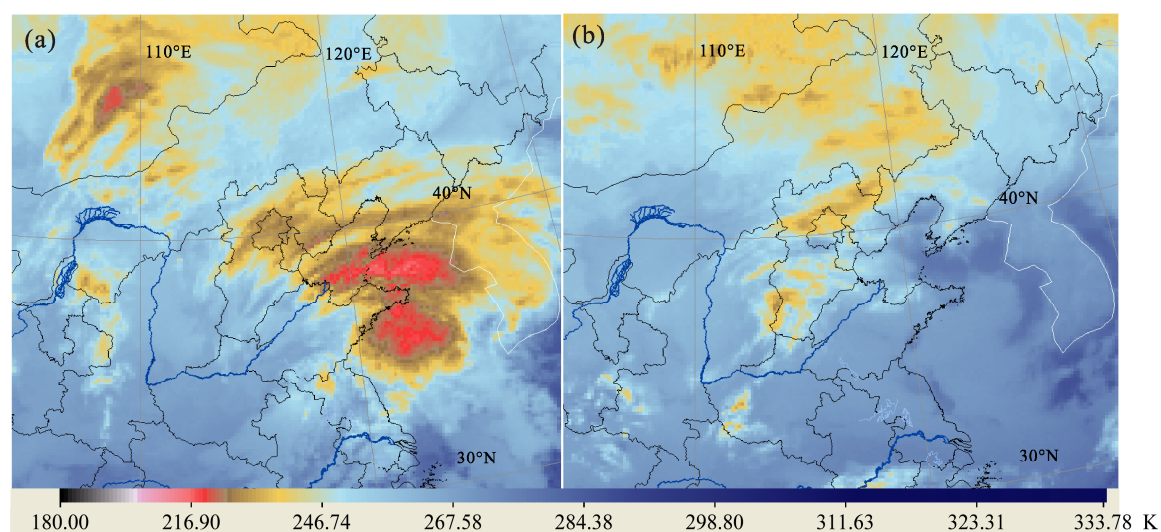


图 2 风云 2E 静止卫星红外 1 通道云图 (色标为亮温值, 单位: K): (a) 2012 年 12 月 13 日 22:00; (b) 2012 年 12 月 15 日 22:00

Fig. 2 FY-2E (geostationary satellites) IR1 (Infrared Radiation 1) infrared cloud images (color bar represents the value of brightness temperature, units: K) at (a) 2200 BT (Beijing Time) 13 December 2012 and (b) 2200 BT 15 December 2012

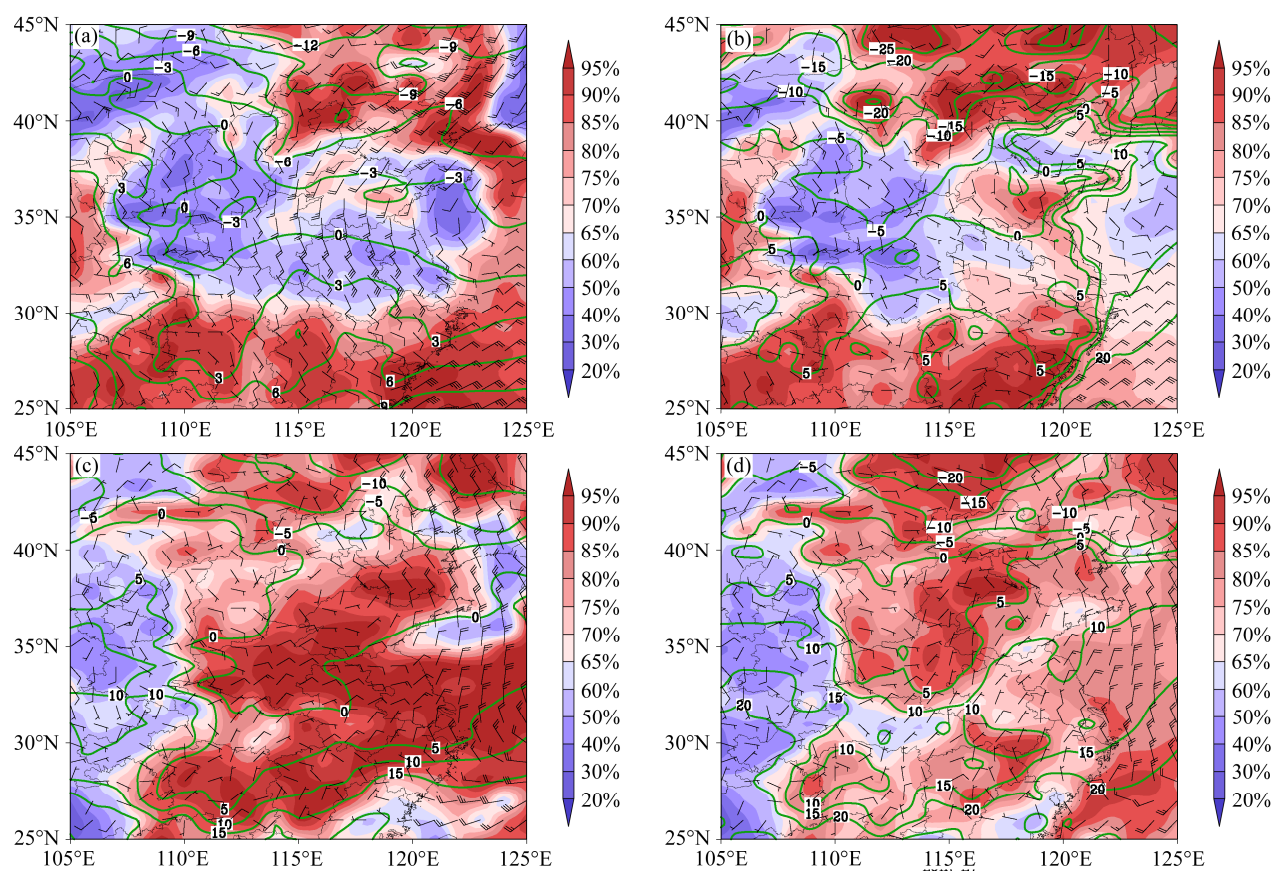


图 3 2012 年 12 月 (a, b) 12 日 20:00、(c, d) 15 日 14:00 925 hPa 等压面 (左列) 和地面 (右列) 的温度场 (绿色等值线, 单位: °C)、相对湿度场 (颜色填充) 和风场 (风羽)

Fig. 3 Temperature (green isoline, units: °C), RH (relative humidity, color shading), and wind (wind barbs) distribution at (a, c) 925 hPa and (b, d) the surface at (a, b) 2000 BT 12 December 2012 and (c, d) 1400 BT 15 December 2012

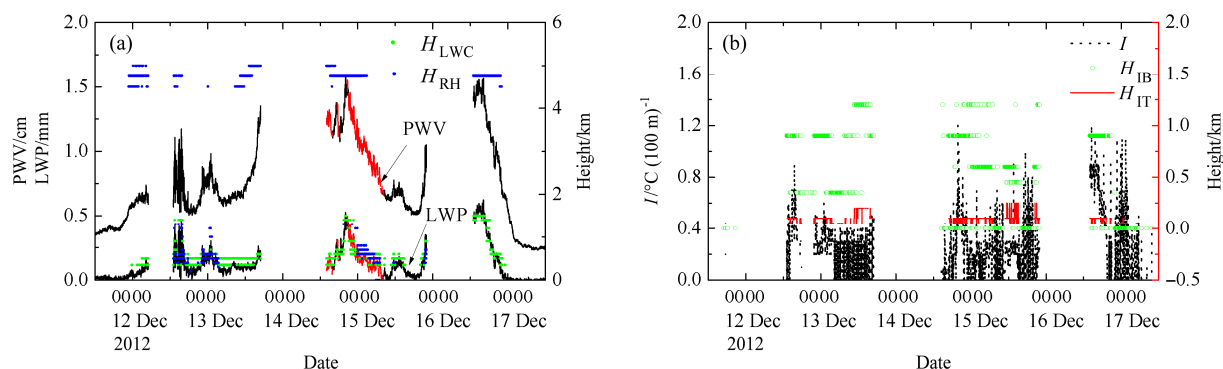


图4 2012年12月11~17日云雾参数的时间演变情况:(a)绿色散点代表LWC表示的雾顶高度,蓝色散点代表RH表示的云顶高度,上、下实线分别代表PWV(单位:cm)和LWP(单位:mm),其中黑色实线代表无降水时段,红色实线代表有降水时段;(b)逆温强度 I [单位: $^{\circ}\text{C} (100 \text{ m})^{-1}$],逆温厚度 H_{IT} (Inversion thickness,单位:km)和逆温底所在高度 H_{IB} (Inversion base,单位:km)

Fig. 4 Temporal cloud and fog physical parameters during 11–17 December 2012: (a) The top height of fog related to LWC (green dots), the top height of fog related to RH (blue dots), the upper and lower solid lines are PWV (Precipitable Water Vapor, units: cm) and LWP (Liquid Water Path, units: mm), respectively, with the black part representing PWV and LWP during the non-precipitation period and the red part PWV and LWP during the precipitation period. (b) Intensity, thickness and base of inversion

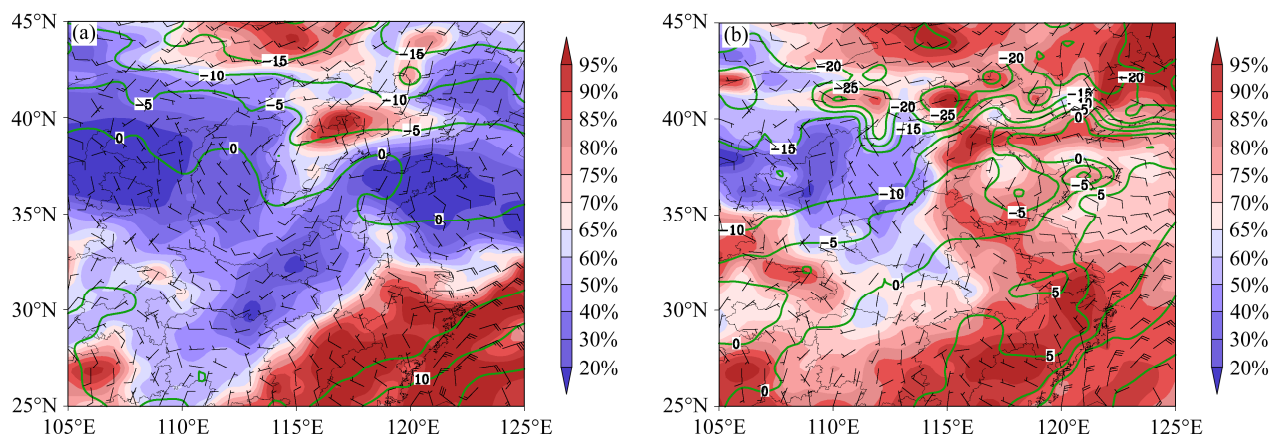


图5 2013年1月13日08:00 (a) 925 hPa等压面和 (b) 地面的温度场(绿色等值线,单位: $^{\circ}\text{C}$)、相对湿度场(颜色填充)以及风场(风羽)

Fig. 5 Temperature (green isoline, units: $^{\circ}\text{C}$), RH (color shading), and wind (wind barbs) distribution at 0800 BT 13 January 2013 at (a) 925 hPa and (b) the surface

度处均出现了短暂的高湿区,有FY-2E IR1云图可以判断11日上午高空存在零星的云,也可以判断从14日夜晩到15日上午有来自西南方向的云系影响到北京。

用LWC表示的平均 H_{LWC} 在550 m,而RH表示的云顶高度在4.5 km左右(见图7a)。从图7b可以看出,强逆温主要出现在周期性雾的间隔期,即两次雾过程之间,且发生在近地面附近,这说明稳定的边界层结构是促使雾形成和再次发展的重要原因。而雾发展的过程中逆温通常是发生在0.4 km和1 km附近,这主要与925 hPa暖平流的影响有关。

27~31日雾形成和发展过程与10~15日大雾天气的主要差别在于不同天气系统的影响和云雾共存的垂直结构。一个差别是受不同天气系统的影响,北京受西北高压向东南方向移动的影响,从27日晚到31日,先是受到稳定的高压控制,后受到高压后部的影响,地面风向由偏西风转为偏东风。由图8可知,925 hPa上华北地区受到洋面高压后部的控制,并在西南气流的影响下输送了充足的水汽,暖湿平流移动到冷下垫面形成平流雾。另一个差别在于,同样具有云雾共存的垂直结构特点,但该次雾过程先有平流雾生成,后又有云系移到雾区的上空。

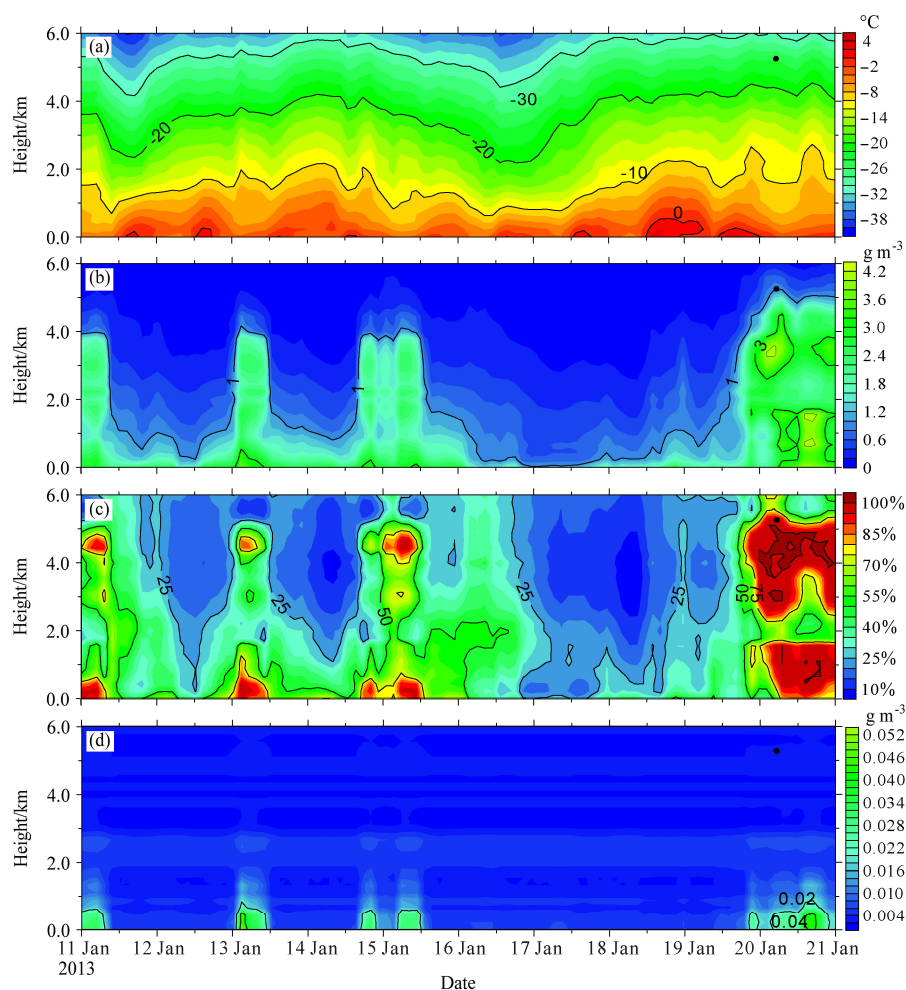


图 6 2013 年 1 月 11~20 日北京站 MP-3069A 型号微波辐射计廓线仪的 (a) T (单位: $^{\circ}\text{C}$)、(b) ρ (单位: g m^{-3})、(c) RH 和 (d) LWC (单位: g m^{-3}) 廓线随时间的演变, 图中黑色横杠代表降水时段

Fig. 6 Time-height distributions of (a) T (Temperature, units: $^{\circ}\text{C}$), (b) ρ (vapor density, units: g m^{-3}), (c) RH, and (d) LWC (units: g m^{-3}) from MWRP (MicroWave Radiometer Profiler) MP-3069A at Beijing during 11–20 January 2013. The black bar denotes the precipitation period

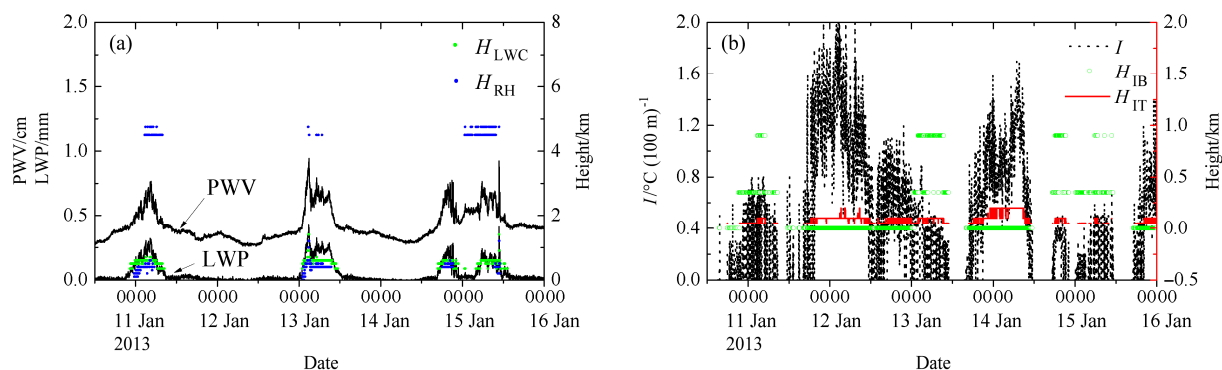


图 7 同图 4, 但为 2013 年 1 月 11~15 日

Fig. 7 Same as Fig. 4, but for 11–15 January 2013

由图 9a 和图 10a 可见, 2013 年 1 月 29 日平流雾的范围覆盖华北东南部、山东和河南北部等地区。由图 9b 和图 10b 可知, 在地面有雾的情况下,

30 日云区覆盖了华北、山东和河南北部等地区。1 月 29 日地面观测天气现象是雾, 对比 29 日可见光云图 (图 9a) 和红外云图 (图 10a), 由于 29 日深

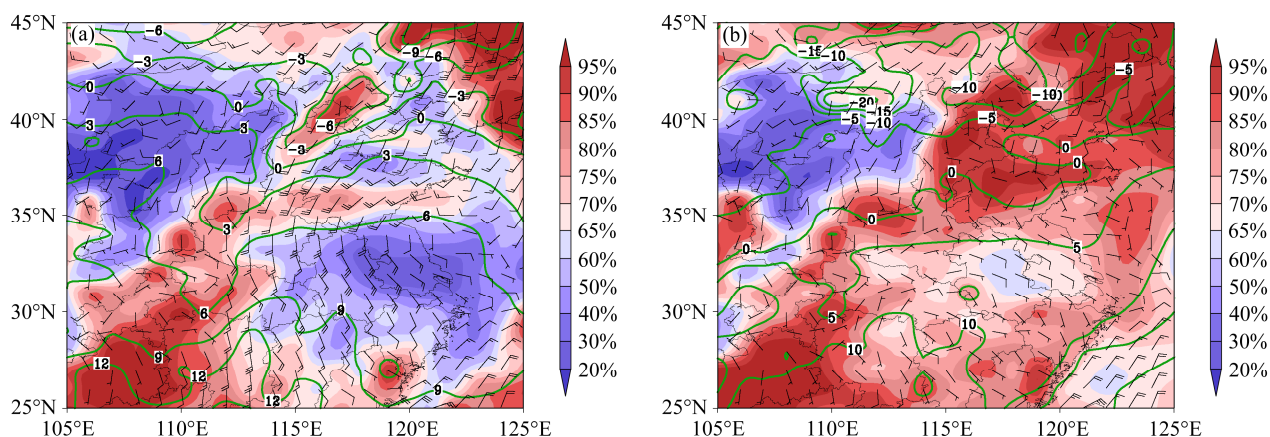


图 8 2013 年 1 月 30 日 08:00 (a) 925 hPa 等压面和 (b) 地面的温度场 (绿色等值线, 单位: °C)、相对湿度场 (颜色填充) 和风场 (风羽)

Fig. 8 Temperature (green isoline, units: °C), RH (color shading), and wind (wind bars) distribution at 0800 BT 30 January 2013 at (a) 925 hPa and (b) the surface

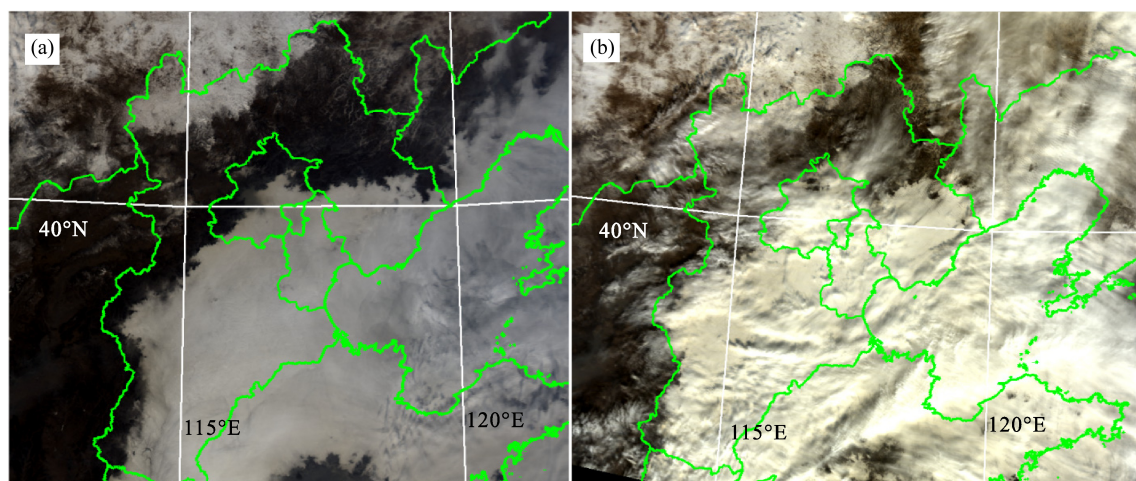


图 9 Terra/Aqua-Modis 可见光云图: (a) 2013 年 1 月 29 日 13:30; (b) 2013 年 1 月 30 日 10:55

Fig. 9 Visible cloud image of Terra/Aqua-Modis (Terra/Aqua-MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) at (a) 1330 BT 29 January 2013 and (b) 1055 BT 30 January 2013

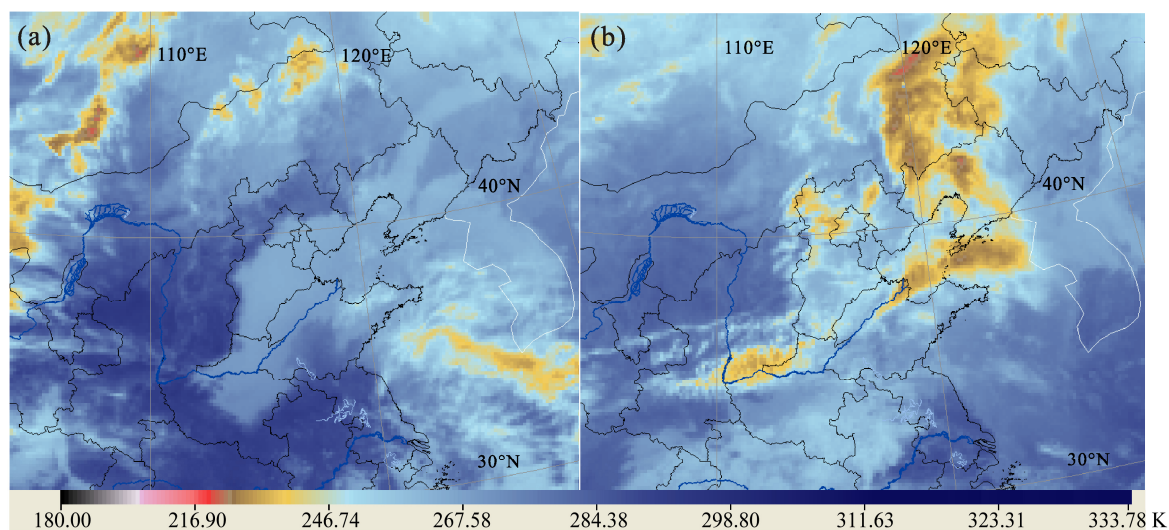


图 10 风云 2E 静止卫星红外 1 通道云图 (色标为亮温值, 单位: K): (a) 2013 年 1 月 29 日 13:30; (b) 2013 年 1 月 30 日 11:00

Fig. 10 FY-2E IR1 infrared cloud images (color bar represents the value of brightness temperature, units: K) at (a) 1330 BT 29 January 2013 and (b) 1100 BT 30 January 2013

厚的平流雾在可见光云图上呈现白亮的特点, 而红外云图呈现色调较暗的均匀云区。而 30 日的可见光云图(图 9b)上纹理清晰, 红外云图(图 10b)也呈现不均匀的色调, 均具有云的特点。从 FY-2E IR1 红外云图动画(图略)可以判断, 2013 年 1 月 30 日 00:00~16:00 有来自西侧的云系, 和 2013 年 1 月 31 日 14:00 到 2 月 1 日 08:00 来自西南方向的盾状云系边缘影响北京。

27~31 日的雾过程首先在 27 日晚上形成雾, 28 日午后减弱, 29 日午后再次发展成平流雾, 随着 30~31 日两次云系的影响, 构成云雾共存的平流雾结构特征, 发展到 31 日有降水形成。由图 11a、b 可知, 29 日午后 2 km 以下的高度层内温度逐渐升高、水汽不断增强, 具备“暖湿”条件, 与 925 hPa 气象要素场的分析结果一致。由温度层结可知, 1 km 高度附近处存在逆温, 这与暖平流的影响有关, 提供了稳定的边界层条件。与 RH 和 LWC 表示的

雾区很一致, 由于平流雾的发展较深厚, LWC 达到 0.08 g m^{-3} , 雾顶高度达到 1.5 km 左右。近地面平流雾发展深厚, 且有云系覆盖, 由于云的阻挡作用, 减弱了太阳辐射对稳定边界层结构的破坏, 减少了雾滴的蒸发。同时由于云发射向下的长波辐射, 增加了云雾共存体系内的温度, 增强了分子的热运动, 促使水汽的向上扩散凝结成雾滴, 导致雾不断向上发展, 雾层变厚(见图 11d)中 30 日雾区由低到高的变化趋势)。31 日受高层云系的影响产生降雪(水), 导致高 LWC 值。

PWV 和 LWP 的变化与云雾的演变过程基本一致(图 12)。27 日晚到 28 日上午雾的 H_{LWC} 在 500 m 左右, 29 日平流雾的 H_{LWC} 也在 350~500 m 左右, 但是随着平流雾的发展, 30 日受云的影响雾顶高度逐渐升高, H_{LWC} 上升到 1.5 km 以上, 而云顶高度 H_{RH} 在 5 km 左右。整个过程中最强的逆温发生在 28 日下午到 29 日上午之间, 即前一次雾后和下一

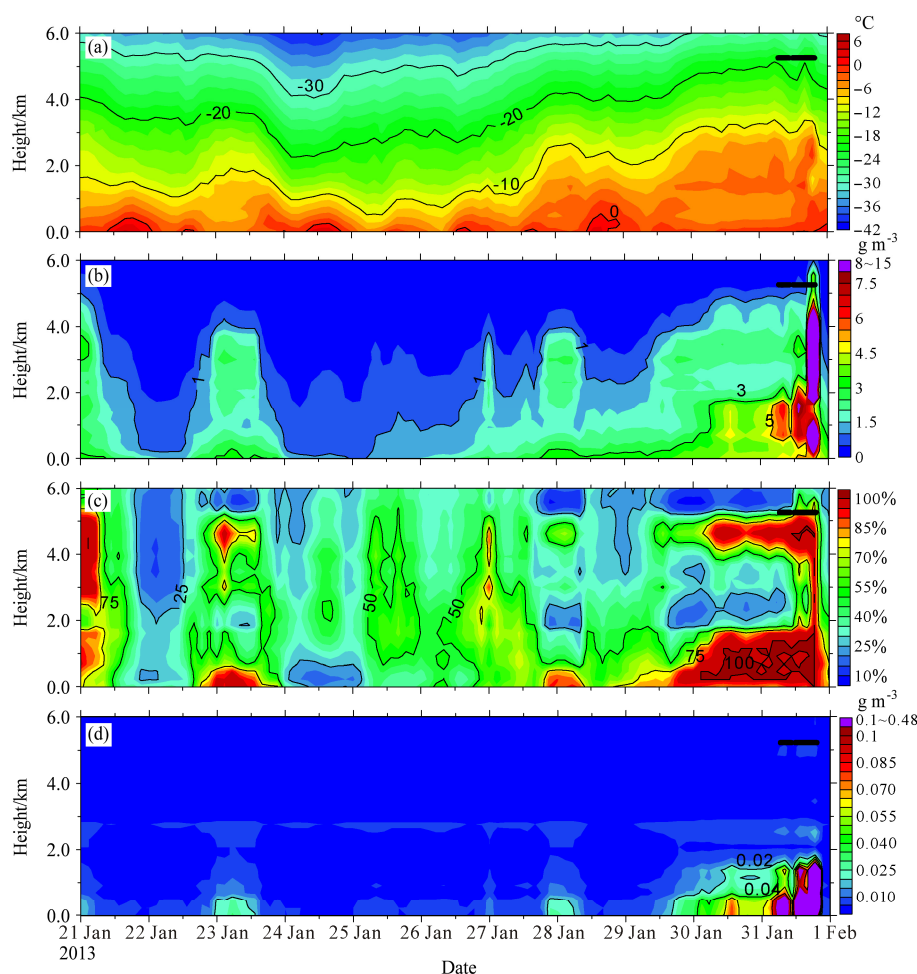


图 11 同图 6, 但为 2013 年 1 月 21~31 日

Fig. 11 Same as Fig. 6, but for 21–31 January 2013

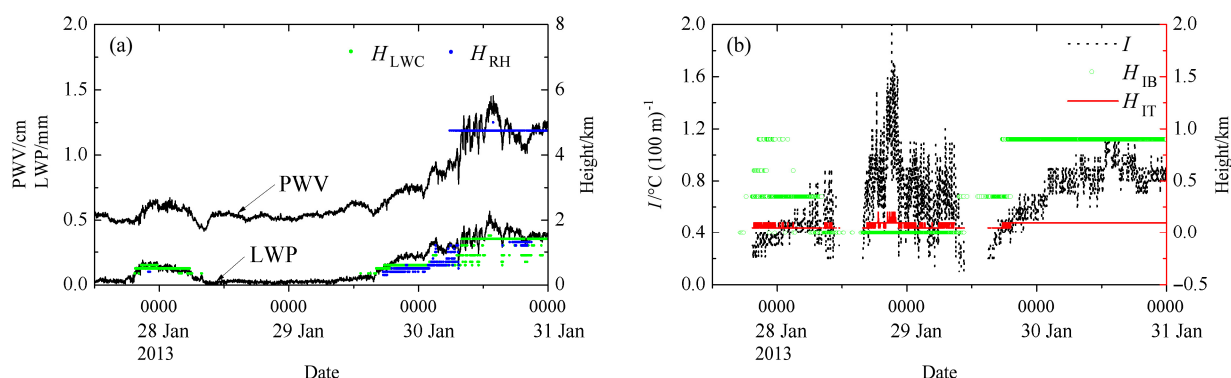


图 12 同图 4, 但为 2013 年 1 月 27~30 日

Fig. 12 Same as Fig. 4, but for 27–30 January 2013

次雾前的间隔期, 近地面逆温有利于 29 日雾的形成, 30 日以后发展成云雾共存结构以后, 依然受暖平流影响逆温存在于 1 km 左右。

5 结论与讨论

本文统计了北京地区 2009~2013 年秋冬季微波辐射计观测的持续性大雾天气过程的数据, 结合 NCEP/NCAR 再分析资料、探空资料和地面气象观测数据划分了北京地区雾的主要类型, 并针对典型雾个例进行了比较深入的分析, 探讨了雾的形成发展的物理机制。主要结论如下:

(1) 通过北京地区秋冬季 13 次雾个例的统计和分析, 依据雾形成的物理机理, 将雾主要划分为平流雾和蒸发雾, 再依据云存在情况, 划分为单一雾结构和云雾共存结构。结果表明, 北京地区持续性大雾天气以平流雾为主, 比例高达 69%, 其次是蒸发雾占 31%, 而其中云雾共存结构占到 85%, 说明该地区频发的持续性大雾天气与天气过程的异常变化有密切的关系。

(2) 北京地区雾的垂直结构和持续时间的统计结果表明, 平流雾的平均雾顶高度不超过 1 km, 而蒸发雾的平均雾顶高度与其发展程度有关。对同类型雾, 强逆温有利于雾的维持和发展。持续性天气系统的影响是导致雾持续性发展的主要原因, 通常伴有云雾共存结构, 导致大雾的持续时间可以达到 100 h 以上。

(3) 云雾共存结构是北京地区持续性大雾天气的重要垂直结构特征, 它是由边界层雾和高层云共同构成的系统。

(4) 典型持续性大雾天气个例研究表明: 蒸发雾发展过程中存在多种雾的形成机制, 包括降水粒

子蒸发(升华)冷却凝结和弱冷平流移经暖下垫面使蒸发水汽冷却凝结形成雾滴。两次平流雾都是西南暖湿气流移经北京地区冷下垫面造成的, 但都伴随高层有云形成, 云的存在对平流雾的持续发展有促进作用, 导致雾顶高度升高, 同时高层逆温的形成也有利于雾的维持。

参考文献 (References)

- Boers R, Baltink H K, Hemink H J, et al. 2013. Ground-based observations and modeling of the visibility and radar reflectivity in a radiation fog layer [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 30 (2): 288–300, doi: 10.1175/JTECH-D-12-00081.1.
- Crewell S, Ebell K, Löhnert U, et al. 2009. Can liquid water profiles be retrieved from passive microwave zenith observations? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36 (6): L06803, doi: 10.1029/2008GL036934.
- Egli S, Maier F, Bendix J, et al. 2015. Vertical distribution of microphysical properties in radiation fogs—A case study [J]. *Atmos. Res.*, 151: 130–145, doi:10.1016/j.atmosres.2014.05.027.
- Fuzzi S, Facchini M C, Orsi G, et al. 1992. The Po Valley fog experiment 1989 [J]. *Tellus B*, 44 (5): 448–468, doi:10.1034/j.1600-0889.1992.t01-4-00002.x.
- Fuzzi S, Laj P, Ricci L, et al. 1998. Overview of the Po Valley fog experiment 1994 (CHEMDROP) [J]. *Contrib. Atmos. Phys.*, 71 (1): 3–19.
- Gultepe I, Milbrandt J A. 2007. Microphysical observations and mesoscale model simulation of a warm fog case during FRAM project [J]. *Pure Appl. Geophys.*, 164 (6–7): 1161–1178, doi: 10.1007/s00024-007-0212-9.
- Guo L J, Guo X L, Fang C G, et al. 2015. Observation analysis on characteristics of formation, evolution and transition of a long-lasting severe fog and haze episode in North China [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 58 (3): 329–344, doi: 10.1007/s11430-014-4924-2.
- 郭丽君, 郭学良. 2015. 利用地基多通道微波辐射计遥感反演华北持续性大雾天气温、湿度廓线的检验研究 [J]. *气象学报*, 73 (2): 368–381.
- Guo Lijun, Guo Xueliang. 2015. Verification study of the atmospheric temperature and humidity profiles retrieved from the ground-based multi-channels microwave radiometer for persistent foggy weather events

- in northern China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 73 (2): 368–381, doi: 10.11676/qxxb2015.025.
- Hamazu K, Hashiguchi H, Wakayama T, et al. 2003. A 35-GHz scanning Doppler radar for fog observations [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 20 (7): 972–986, doi: 10.1175/1520-0426(2003)20<972:AGSDRF>2.0.CO;2.
- 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 Sciences* (in Chinese), 33 (6): 1174–1186, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2009.06.05.
- 贾星灿, 郭学良. 2012. 人为大气污染物对一次冬季浓雾形成发展的影响研究 [J]. *大气科学*, 36 (5): 995–1008. Jia Xingcan, Guo Xueliang. 2012. Impacts of anthropogenic atmospheric pollutant on formation and development of a winter heavy fog event [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (5): 995–1008, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11200.
- Knupp K R, Coleman T, Phillips D, et al. 2009. Ground-based passive microwave profiling during dynamic weather conditions [J]. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 26 (6): 1057–1073, doi: 10.1175/2008JTECHA1150.1.
- Koraćin D, Lewis J, Thompson W T, et al. 2001. Transition of stratus into fog along the California coast: Observations and modeling [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58 (13): 1714–1731, doi: 10.1175/1520-0469(2001)058<1714:TOSIFA>2.0.CO;2.
- Koraćin D, Dorman C E, Lewis J M, et al. 2014. Marine fog: A review [J]. *Atmos. Res.*, 143: 142–175, doi: 10.1016/j.atmosres.2013.12.012.
- Li Z H, Zhang L M, Zhang Q H. 1994. The physical structure of the winter fog in Chongqing metropolitan area and its formation process [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 8 (3): 316–328.
- 李子华, 杨军, 石春娥, 等. 2008. 地区性浓雾物理 [M]. 北京: 气象出版社, 13. Li Zihua, Yang Jun, Shi Chun'e, et al. 2008. *The Physics of Regional Dense Fog* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 13.
- 李子华, 刘端阳, 杨军. 2011. 辐射雾雾滴谱拓宽的微物理过程和宏观条件 [J]. *大气科学*, 35 (1): 41–54. Li Zihua, Liu Duanyang, Yang Jun. 2011. The microphysical processes and macroscopic conditions of the radiation fog droplet spectrum broadening [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35 (1): 41–54, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.01.04.
- 刘红燕, 王迎春, 王京丽, 等. 2009. 由地基微波辐射计测量得到的北京地区水汽特性的初步分析 [J]. *大气科学*, 33 (2): 388–396. Liu Hongyan, Wang Yingchun, Wang Jingli, et al. 2009. Preliminary analysis of the characteristics of precipitable water vapor measured by the ground-based 12-channel microwave radiometer in Beijing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (2): 388–396, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2009.02.16.
- Lu C S, Liu Y G, Niu S J, et al. 2013. Examination of microphysical relationships and corresponding microphysical processes in warm fogs [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 27 (6): 832–848.
- 陆春松, 牛生杰, 杨军, 等. 2010. 南京冬季一次雾过程宏观结构的突变特征及成因分析 [J]. *大气科学*, 34 (4): 681–690. Lu Chunsong, Niu Shengjie, Yang Jun, et al. 2010. Jump features and causes of macro and microphysical structures of a winter fog in Nanjing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34 (4): 681–690, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.04.02.
- Meyer M B, Lala G G. 1990. Climatological aspects of radiation fog occurrence at Albany, New York [J]. *J. Climate*, 3 (5): 577–586, doi: 10.1175/1520-0442(1990)003<0577:CAORFO>2.0.CO;2.
- Niu S J, Lu C S, Yu H Y, et al. 2010. Fog research in China: An overview [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 27 (3): 639–662, doi: 10.1007/s00376-009-8174-8.
- Nowak D, Ruffieux D, Agnew J L, et al. 2008. Detection of fog and low cloud boundaries with ground-based remote sensing systems [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 25 (8): 1357–1368, doi: 10.1175/2007JTECHA950.1.
- Oliver D A, Lewellen W S, Williamson G G. 1978. The interaction between turbulent and radiative transport in the development of fog and low-level stratus [J]. *J. Atmos. Sci.*, 35(2): 301–316. doi: 10.1175/1520-0469(1978)035<0301:TIBTAR>2.0.CO;2.
- Pilić R J, Mack E J, Rogers C W, et al. 1979. The formation of marine fog and the development of fog-stratus systems along the California coast [J]. *J. Appl. Meteor.*, 18 (10): 1275–1286.
- Pinnick R G, Hoihjelle D L, Fernandez G, et al. 1978. Vertical structure in atmospheric fog and haze and its effects on visible and infrared extinction [J]. *J. Atmos. Sci.*, 35 (10): 2020–2032.
- Quan J, Zhang Q, He H, et al. 2011. Analysis of the formation of fog and haze in North China Plain (NCP) [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 11 (15): 8205–8214, doi: 10.5194/acp-11-8205-2011.
- Roach W T, Brown R, Caughey S J, et al. 1976. The physics of radiation fog: I. A field study [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102 (432): 313–333.
- 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 Sci.*, 33 (2): 393–404, doi: 10.1029/97RS03656.
- Tardif R, Rasmussen R M. 2007. Event-based climatology and typology of fog in the New York City region [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 46 (8): 1141–1168, doi: 10.1175/JAM2516.1.
- Tardif R, Rasmussen R M. 2008. Process-oriented analysis of environmental conditions associated with precipitation fog events in the New York City region [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47 (6): 1681–1703, doi:10.1175/2007JAMC1734.1.
- Tomine K, Michimoto K, Hikiji I, et al. 1991. The vertical structure of fog observed with a lidar system at Misawa Airbase, Japan [J]. *J. Appl. Meteor.*, 30 (8): 1088–1096, doi:10.1175/1520-0450(1991)030<1088:TVSOFO>2.0.CO;2.
- 王鹏飞, 李子华. 1989. 微观云物理学 [M]. 北京: 气象出版社, 35–39. Wang Pengfei, Li Zihua. *The Micro Cloud Physics* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 35–39.
- 王跃思, 姚利, 王莉莉, 等. 2014. 2013 年元月我国中东部地区强霾污染成因分析 [J]. *中国科学: 地球科学*, 44 (1): 15–26. Wang Yuesi, Yao Li, Wang Lili, et al. 2014. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 57 (1): 14–25.
- Ware R, Carpenter R, Güldner J, et al. 2003. A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid [J]. *Radio Sci.*, 38 (4): 1035–1048, doi: 10.1029/2002RS002656.

- 8079, doi: 10.1029/2002RS002856.
- Ware R, Cimini D, Campos E, et al. 2013. Thermodynamic and liquid profiling during the 2010 Winter Olympics [J]. *Atmos. Res.*, 132–133: 278–290, doi: 10.1016/j.atmosres.2013.05.019.
- Westcott N E, Kristovich D A R. 2009. A climatology and case study of continental cold season dense fog associated with low clouds [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 48 (11): 2201–2214, doi: 10.1175/2009JAMC1999.1.
- Westwater E R, Crewell S, Mätzler C, et al. 2005. Principles of surface-based microwave and millimeter wave radiometric remote sensing of the troposphere [J]. *Quaderni Della Società Italiana di Elettromagnetismo*, 1 (3): 50–90.
- 吴彬贵, 张宏升, 张长春, 等. 2008. 天津南部地区平流雾过程塔层气象要素特征分析 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 44 (5): 744–750. Wu Bingui, Zhang Hongsheng, Zhang Changchun, et al. 2008. Analysis of the micro-meteorologic element during the advection fog period in the south of Tianjin City [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese)*, 44 (5): 744–750, doi: 10.3321/j.issn:0479-8023.2008.05.013.
- 吴彬贵, 张宏升, 张长春, 等. 2010. 华北地区平流雾过程湍流输送及演变特征 [J]. *大气科学*, 34 (2): 440–448. Wu Bingui, Zhang Hongsheng, Zhang Changchun, et al. 2010. Characteristics of turbulent transfer and its temporal evolution during an advection fog period in North China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (2): 440–448, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.02.17.
- 严文莲, 刘端阳, 濮梅娟, 等. 2010. 南京地区雨雾的形成及其结构特征 [J]. *气象*, 36 (10): 29–36. Yan Wenlian, Liu Duanyang, Pu Meijuan, et al. 2010. Formation and structure characteristics of precipitation fog in Nanjing [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 36 (10): 29–36.
- 岳岩裕, 牛生杰, 赵丽娟, 等. 2013. 湛江地区近海岸雾产生的天气条件及宏微观特征分析 [J]. *大气科学*, 37 (3): 609–622. Yue Yanyu, Niu Shengjie, Zhao Lijuan, et al. 2013. Study on the synoptic system and macro-micro characteristics of sea fog along the Zhanjiang coastal area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (3): 609–622, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12009.
- 于华英, 牛生杰, 刘鹏, 等. 2015. 2007 年 12 月南京六次雨雾过程宏、微观结构演变特征 [J]. *大气科学*, 39 (1): 47–58. Yu Huaying, Niu Shengjie, Liu Peng, et al. 2015. Evolution of the macro- and microphysical properties of precipitation fog in December 2007 in Nanjing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39 (1): 47–58, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1404.13284.
- 尹球, 徐绍祖. 1994. 辐射雾生消的数值研究 (II)——生消机制 [J]. *气象学报*, 52 (1): 60–67. Yin Qiu, Xu Shaozu. 1994. A numerical study on the formation and dissipation of radiation fog (II) —The physical mechanism of radiation fog [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 52 (1): 60–67.
- 张人禾, 李强, 张若楠. 2014. 2013 年 1 月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析 [J]. *中国科学: 地球科学*, 44 (1): 27–36. Zhang Renhe, Li Qiang, Zhang Ruonan. 2014. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013 [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 57 (1): 26–35, doi: 10.1007/s11430-013-4774-3.
- 张舒婷, 牛生杰, 赵丽娟. 2013. 一次南海海雾微物理结构个例分析 [J]. *大气科学*, 37 (3): 552–562. Zhang Shuting, Niu Shengjie, Zhao Lijuan. 2013. The microphysical structure of fog droplets in a sea fog event in the South China Sea [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (3): 552–562, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11204.