

张琳娜,郭锐. 2014. 2012 年冬季北京三种高影响天气的关联与成因分析. 气象, 40(5):598-604.

# 2012 年冬季北京三种高影响天气 的关联与成因分析<sup>\* 1</sup>

张 琳 娜   郭   锐

北京市气象台, 北京 100089

**提 要:** 2012 年冬季, 北京地区经历了 12 月持续低温寒冷、2013 年 1 月持续雾霾和 1 月 31 日突发冻雨三种高影响天气。这三种高影响天气给北京这座特大型城市带来了许多不利影响, 一度成为全社会关注的焦点。文章利用常规气象观测资料和大气成分观测资料, 分析了这三种高影响天气的成因以及它们之间的内在联系, 结果表明: (1) 冷空气活动频繁并且强度偏强是持续低温的主要原因, 并且此次持续低温寒冷是导致后期雾霾频发和冻雨的重要原因。 (2) 从大气稳定度角度对雾霾的发生所作的气象学分析, 发现: 水平稳定度上, 冷暖平流表现出的水平稳定度对应了污染物浓度的高低, 暖平流对应了污染物浓度增加, 并在暖平流转为冷平时堆积到最大值, 而冷平流对应了污染物浓度的降低, 冷平流转为暖平时浓度最低; 垂直稳定度上, 前期低温寒冷导致的边界层气温偏冷和空中干暖平流共同造成的边界层顶强逆温极强烈地抑制了污染物垂直方向的扩散, 对于雾霾堆积起了很大作用。 (3) 从大气温湿层结角度对冻雨的发生做了分析, 发现: 低空偏冷和空中回暖造成了 1 月 31 日 08 时空中逆温的层结结构, 而温湿层结正好使饱和层的温度在  $-10\sim 0^{\circ}\text{C}$  之间, 并且有足够厚的  $-4\sim 0^{\circ}\text{C}$  的饱和层使得过冷水含量很高, 是冻雨发生的充分条件。上述三种天气虽然是极端天气, 但关注前期低温寒冷导致的低空偏冷和空中快速回暖都能使雾霾和冻雨具有一定的预报性。而一个极端天气的出现, 其可能引发的其他极端天气事件也要引起关注。

**关键词:** 高影响天气, 持续低温, 雾霾, 冻雨

**中图分类号:** P458      **文献标志码:** A      **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.05.010

## Analyses on Relationship and Causes for the Three High-Influence Weather Events in Beijing in Winter 2012

ZHANG Linna   GUO Rui

Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089

**Abstract:** During the winter 2012, Beijing suffered 3 high-influence weather events: lasting cold weather in December, continuous fog and haze in January 2013 and freezing rain on 31 January 2013. The three events brought many adverse effects to Beijing, and have become the focus of the whole society. Using conventional observation data and the atmospheric component data, the causes for the three extreme events are studied, and the intrinsic relations among them are analyzed. The results show that: (1) Frequent cold air activities and intensity are the main cause for the continuous low temperature event, which leads to continuous fog, haze and freezing rain. (2) From the atmospheric stability analysis, we find that the horizontal stability of cold and warm advection is corresponding to the level of pollutant concentration; and, vertically, the low temperature in boundary layer and dry warm advection to the top of the boundary layer play an important role for the accumulation of haze. (3) Low temperature in low level and warm air in the sky contribute to a freezing rain stratification. Therefore, one extreme weather event that may lead to other ex-

<sup>\*</sup> 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006010)、北京市气象局气象科技研发专项(2012BMBKYZX10)和北京市气象局精细化预报创新团队(CX201103)共同资助  
2013 年 3 月 12 日收稿;    2013 年 10 月 11 日收修定稿  
第一作者: 张琳娜, 主要从事天气预报与分析研究工作. Email: zln\_zhang@sina.com

extreme weather events should be concerned about.

**Key words:** high-influence weather event, continuous low temperature, fog and haze, freezing rain

## 引言

高影响天气气候事件是指可能造成严重灾害,从而对社会有重大影响的天气气候现象或异常(李崇银,2009)。这类事件出现概率虽小,但其影响却制约着社会和经济的发展、生态环境,甚至威胁到人类生命。北京这座特大型城市,随着社会发展、城市扩张、人口增加,在面对极端天气气候事件时承受灾害能力越发脆弱。针对北京多发的冬季极端灾害天气,首都气象工作者也做了大量研究(李书严等,2012;廖晓农等,2013;段丽等,2011;郭锐等,2012)。然而,2012年冬季(2012年12月至2013年2月),北京遭遇了多年未见的低温寒冷、持续雾霾和突发冻雨这三种高影响天气,其发生和影响再次把气象工作推到了社会关注的焦点。

对于上述三种灾害天气的成因和影响,国内气象工作者也做了大量研究。大雾的研究目前主要集中在其气候特征季节变化、天气形势特点、大雾发生的水汽输送和逆温特征等方面,王丽萍等(2006)利用中国604站40年的地面观测雾日资料,分析了我国雾的地理分布,讨论了不同区域雾的月年变化特征。其他省、市和地区的大雾特征,气象工作者也做了大量研究(魏文华等,2008;贺皓等,2004;靳利梅等,2008;童尧青等,2009)。针对北京地区,王继志等(2002)对北京及周边地区的能见度和雾特征及其演变进行了研究,指出北京地区的能见度变化存在显著的季节性差异且近10年雾日数显著增加。针对大雾天气的形成机理,张恒德等(2011)研究发现,地面风速维持在 $1\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,低层辐散、负涡度及垂直上升运动弱是形成雾的动力条件,低层相对湿度大,温度露点差小,对流层中层相对较干,低层逆温层的存在和大气层结稳定构成了雾形成的稳定性条件。张燕光(1999)通过对雾的变化规律研究,归纳出春季华南沿海地区形成雾时的天气系统背景及预报指标。冻雨是北京地区极少出现的天气事件(欧建军等,2011),其多出现在我国南方部分地区。漆梁波(2012)研究指出了我国冬季冻雨和冰粒天气的形成机制及预报着眼点,暖层出现是冻雨天气的重要特征。宗志平等(2011)研究发现逆温层强度与冻雨强度变化之间有明显联系。通过对冻雨过程的

数值模拟研究表明,深厚而稳定的逆温层和低空冷层的存在是大范围冻雨出现的直接原因(陶珉等,2012;黎惠金等,2011;赵德龙等,2011)。

2012年冬季北京的这三种高影响天气,在灾害天气划分上都不算是典型的灾害天气,尤其是持续雾霾低能见度天气算不上典型的大雾或重度霾天气,冻雨的发生只在城区几个站观测到。但它们的影响巨大,并且三种高影响天气之间存在着相互联系。上述国内关于大雾和冻雨的研究主要是一事一议,针对一种灾害天气进行深入的分析,从而揭示该天气的成因、特征等,从气象角度对霾的研究也还比较少。而对于发生在同一段时间的低温寒冷、持续雾霾以及冻雨之间相互关系的研究还没有。本文利用北京常规观测资料和大气成分观测资料,从大气水平和垂直扩散条件角度,揭示造成细颗粒物浓度变化的气象条件的变化以及三种高影响天气之间的关系。

## 1 北京地区2012年冬季出现的三种高影响天气实况及影响

### 1.1 2012年12月持续低温寒冷天气概况

2012年冬季(2012年12月至2013年2月),北京地区平均气温为 $-5.2^{\circ}\text{C}$ ,比常年(1981—2010年)冬季的平均气温 $-3.1^{\circ}\text{C}$ 偏低 $2.1^{\circ}\text{C}$ 之多,是1986年以来的最低值。其中,2012年12月平均气温为 $-6.4^{\circ}\text{C}$ ,比常年偏低 $3.5^{\circ}\text{C}$ ,是北京地区自1951年有气象记录以来的最低值。

从2012年冬季北京观象台(54511站)气温较常年的距平值来看(图1),该年冬季北京地区出现了三次气温明显低于常年值的持续低温事件,分别是12月1—13日,12月17日至1月10日和2月4—17日。其中12月17日至1月10日的持续低温时间最长,并且偏低幅度最大,平均偏低 $4^{\circ}\text{C}$ 以上。这次低温寒冷让北京体验了自1985年以来最寒冷的天气,对群众生活产生了极大的影响,也给北京城市供暖系统带来了巨大的压力。

### 1.2 2013年1月持续雾霾天气概况

2013年1月,北京南郊观象台共记录出现雾霾

天气 18 d, 加上北京其他观测站观测记录, 则共有雾霾天气 25 d, 是 1954 年以来历史同期雾霾天气最多的年份。同时, 此次雾霾多表现为持续的雾霾天气, 该期间共出现了 5 次能见度低于 10 km 的持续雾霾天气过程(图 2), 分别出现在 2013 年 1 月 6—7 日、10—14 日、18—19 日、22—23 日、27—30 日。这种雾霾天气明显偏多, 并且长时间持续的情况在历史上也是非常罕见。



图 1 2012 年 12 月至 2013 年 2 月北京观象台日平均气温较常年距平值

Fig. 1 Anomalies between daily average temperature and the normal in Beijing from December 2012 to February 2013

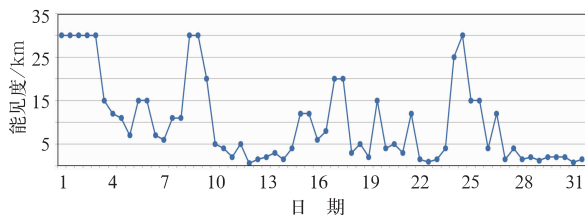


图 2 2013 年 1 月北京观象台能见度日变化

Fig. 2 Daily variation of visibility in Beijing in January 2013

该期间北京的持续雾霾成了全社会关注的焦点。污染物浓度不断升高, 呼吸科病人不断攀升, 群众不敢出门。机场和高速公路一度因能见度太低而被迫关闭, 整个城市都笼罩在雾霾之中。市政府停驶 30% 的公务用车, 103 家重点排污企业停产, 停止各类施工工地的土石方、拆迁作业和露天施工作业, 停止所有渣土运输车上路行驶。持续的雾霾天气, 给人民群众的健康、生产生活带来巨大不利影响。

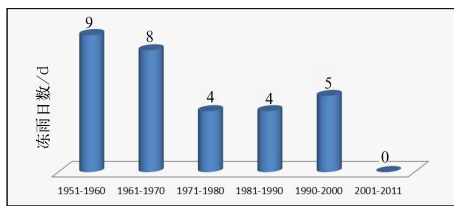


图 3 北京观象台冻雨气候统计

Fig. 3 Climatic statistics for freezing rain in Beijing

### 1.3 1 月 31 日突发冻雨天气概况

1 月 31 日早晨, 北京的朝阳、丰台、大兴站 08 时观测到冻雨天气, 城区大部分地区出现了明显的冻雨, 冻雨导致的路面湿滑对当天城区的交通产生了极大的影响: 当天上午路面湿滑导致的交通事故多达 2000 余件, 至少 4 人死亡。

冻雨由过冷水滴组成, 是落下后与温度低于的  $0^{\circ}\text{C}$  物体接触立即冻结的降水, 是冬半年降水中的一种特殊情况(大气科学辞典, 1994), 多发生在我国贵州、湖南等地。

北京自 1951 年开始有正规气象记录以来, 南郊观象台在 1951—2011 年的 61 年中共出现过 30 个冻雨日, 平均 2 年才会发生一次冻雨事件。然而在最近的 11 年中, 南郊观象台却从未发生过冻雨(图 3)。所以, 2013 年 1 月 31 日早晨北京的突然冻雨, 是一次非常小概率的极端天气。

## 2 三种高影响天气的成因分析

### 2.1 持续低温寒冷天气的成因

2012 年 12 月 17 日到 2013 年 1 月 9 日, 北京出现了持续低温寒冷天气。本文仅从短期内可预报的物理量讨论此次寒冷天气的成因。由于大气边界的平均高度在地面上空 1000 m, 高出边界层并且最接近边界层的高空探测资料和模式计算层在 850 hPa, 所以, 温度预报业务中一直使用 850 hPa 气温的变化来表示空中冷空气活动的强弱, 在地面气温的预报中, 它是最重要的因子。该期间北京地区 850 hPa 气温有两点特征: 第一, 冷空气活动频繁, 有 4 次强冷空气活动影响北京; 第二, 冷空气强度很强, 850 hPa 的降温幅度大。12 月 22 日前后的冷空气致使 850 hPa 降温幅度超过  $20^{\circ}\text{C}$ , 28 日前后的降温幅度超过  $13^{\circ}\text{C}$ 。比较后期的情况, 12 月 17 日至

1 月 9 日 850 hPa 平均气温仅为  $-12^{\circ}\text{C}$ ; 而 1 月 10—31 日的平均气温则为  $-6^{\circ}\text{C}$ 。所以,12 月 17 日至 1 月 9 日期间,冷空气活动频繁、强度偏强是导致持续低温的直接原因(图 4)。

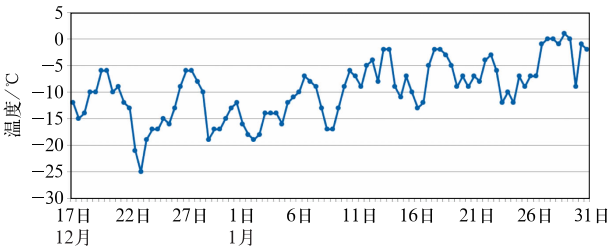


图 4 北京观象台 2012 年 12 月 17 日到 2013 年 1 月 31 日 850 hPa 气温  
Fig. 4 850 hPa temperature in Beijing from 17 December 2012 to 31 January 2013

2.2 雾霾发生原因的大气稳定度分析

2012 年 1 月频发的雾霾天气不是严格意义的大雾或者重度霾的天气,而是华北中部一带异于常年的低能见度天气,从大气成分的观测对比看,这种低能见度与空气中污染物浓度含量高(本文用  $\text{PM}_{2.5}$  观测值)和水汽含量高有很大关系。而这种高浓度是污染物粒子、水汽在空气中堆积的结果。造成堆积的主要原因就是大气稳定度。本文不讨论环流形势上这种天气的成因,而是从本地大气稳定度角度来讨论扩散的气象条件。这也为这类天气预

报提供了一种思路。  
雾霾天气形成的主要气象原因是气象条件不利于雾霾的扩散,从而导致污染物及水汽的堆积积累。不利于雾霾扩散的条件有两个:一是水平条件;二是垂直条件。

2.2.1 水平扩散条件

在地面气压倾向方程中,如果假定地面平坦,大气上界密度为 0,

则: 
$$\frac{\partial p_{z0}}{\partial t} = - \int_0^{\infty} g \mathbf{V} \cdot \nabla \rho dz - \int_0^{\infty} \rho g \nabla \cdot \mathbf{V} dz$$

右边第一项为密度平流,如果在等压的条件下则为温度平流,即冷暖平流与地面气压变化的关系。所以,日常业务中,可以用温度平流的变化来判断地面气压倾向。本文使用 850 hPa 温度平流的变化来定性分析地面气压变化,从地面气压变化情况讨论地面的水平稳定度。地面明显加压则大气水平流动性强,利于空气中污染物扩散;而地面减压则水平流动性弱,大气辐合,不利空气中污染物扩散。

从 1 月 850 hPa 温度时序图和北京市气象局宝联体育公园大气成分观测站 1 月每天 08 时和 20 时  $\text{PM}_{2.5}$  浓度监测时序图对应关系可以看出(图 5,有个别数据缺测),850 hPa 有 5 次气温回升的峰值;5 次气温回升的时间段内,地面  $\text{PM}_{2.5}$  浓度也有 5 次超过  $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  的峰值。这表明,每一次大气回暖都会造成不利于扩散的气象条件,从而导致雾霾天气的发生。

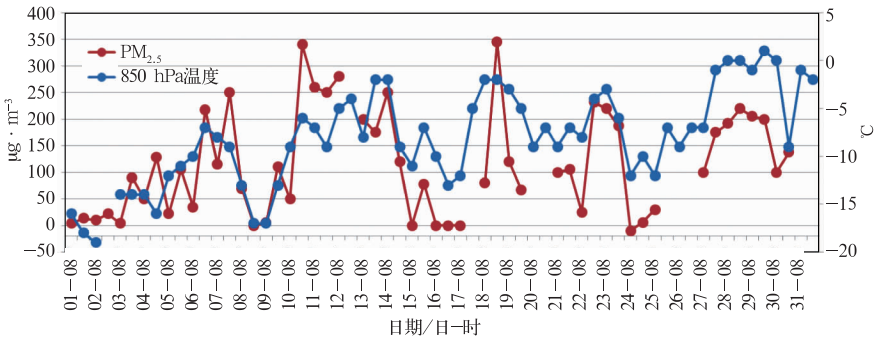


图 5 2013 年 1 月  $\text{PM}_{2.5}$  浓度和 850 hPa 温度图  
Fig. 5 850 hPa temperature and  $\text{PM}_{2.5}$  concentration in Beijing in January 2013

大气的水平扩散条件主要与冷暖平流有关。利用 850 hPa 气温变化特征从水平方向解释其峰值与  $\text{PM}_{2.5}$  峰值对应的原因。  
在水平方向上,不利于污染物扩散的条件是大气水平流动性差,在大气动力学上表现为本站变压不大,而变压又是冷暖平流的表现形式。低空暖平

流会导致海平面气压场出现负变压,当低空出现暖平流时,海平面气压场开始降低,当暖平流达到最大时,海平面气压减压到最低值。此时空气水平流动性最差,水平扩散条件最差。从  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的变化来看,完全对应了上述的水平扩散条件的变化:当低空转为暖平流、地面气压场转为减压时, $\text{PM}_{2.5}$  浓度

开始积累增大;当暖平流达到顶点、气压减压到最低时,PM<sub>2.5</sub> 浓度也达到最大值。

当冷空气开始侵入,低空转为冷平流时,地面开始加压,气流流动性开始增大,此时的水平扩散条件也逐渐转好。直到冷空气主体到达的时刻,也就是气温最低点,海平面气压增加到最大,水平扩散条件最好。同样 PM<sub>2.5</sub> 浓度的变化来看:当低空转为冷平流、海平面气压场转为加压时,PM<sub>2.5</sub> 浓度也开始逐渐降低;当冷平流达到顶点、气压加压到最强时,PM<sub>2.5</sub> 浓度也达到最低值。

2.2.2 垂直扩散条件

垂直方向上,1 月的 5 次持续雾霾天气最严重日当天,其探空曲线特征具有很强的相似性:即,边界层顶都存在一个极强的逆温层。1 月 23 日 08 时的北京探空图(图 6a)可以清楚地看到:尽管在 850 hPa 上,温度有回暖,但由于边界层的气温更多地受地面温度影响,所以 1 月的每次 850 hPa 温度回暖都伴随了在边界层上部的平流逆温的发生。几次高空回暖还有一个特点:暖空气是干性的。干暖的空气除了造成平流逆温,也会导致高空湿度变小,从而形成晴朗的夜空,加剧夜间辐射降温,因而进一步加剧逆温的程度。这样的大气垂直温度层结极大的抑制了污染物的垂直扩散。

综合以上分析,雾霾天气的发生是由于大气水平垂直两个方向上都具有不利于污染物和水汽扩散的气象条件,而这两方面的条件都是相同原因造成的:较冷的地面温度和空中快速回暖的干空气。

图 6b 给出了在垂直方向上边界层顶形成强逆温的示意图。在 2013 年 1 月的雾霾天气过程中,边界层顶都存在这样的强逆温,它的形成主要有两个方面原因。一是夜间的辐射降温;二是空中的暖干平流。而白天辐射升温的能力一般仅局限在边界层湍流交换的范围内,要同时破坏辐射降温和暖干平流形成的逆温层难度非常大,所以每次伴有空中回暖的逆温层总是很难被破坏。

2.2.3 稳定度分析小结

从水平和垂直两个方向的稳定度分析都表明,空中暖平流在水平和垂直方向均是这几次稳定天气产生的原因。只有伴随冷空气的侵入,这种稳定状况才能从两个方向均得到缓解。而垂直稳定度增强除了空中干暖平流,前期下垫面偏冷也是原因之一。

2.3 冻雨发生的特征

Pruppacher 等(1997)对前人的观测资料做了整理后发现,在不同的温度下,云中所含的冰相粒子数有如下的特征:当温度在-4~0℃时,云中降水粒子主要以过冷水状态存在;当温度在-10~-4℃时,为冰水混合层;只有当温度低于-10℃时,云中的冰相粒子含量才能超过 70%以上。所以,介于-10~0℃的温度是雨夹雪和冻雨产生的主要温度范围。

从图 7a 看,800 hPa 以下为饱和层,所以降水发生的关键层就在这个层,最关键的是,800 hPa 以下由过冷水和冰水混合组成,饱和层这样的粒子成分必然会导致复杂的降水形态。地面到 950 hPa 温度在-4~0℃之间,该层内碰并的降水粒子主要是过冷水;在 950~890 hPa 层上,温度为-8~-4℃之间,形成的降水粒子主要以冰相粒子和过冷水混合的状态存在;再往上的 890~800 hPa 层内,出现了一个逆温层,这个层次气温略偏高,又回升到-4~0℃之间,所以这个层内的降水粒子也主要为过冷水。

出现这种层结的原因同样也是前期近地面温度较低和空中快速大幅回暖这个两个原因。在 30 日 20 时探空(图 7b)中,边界层顶 900 hPa 以上存在一个极强的逆温,逆温差超过 15℃。由于 900~

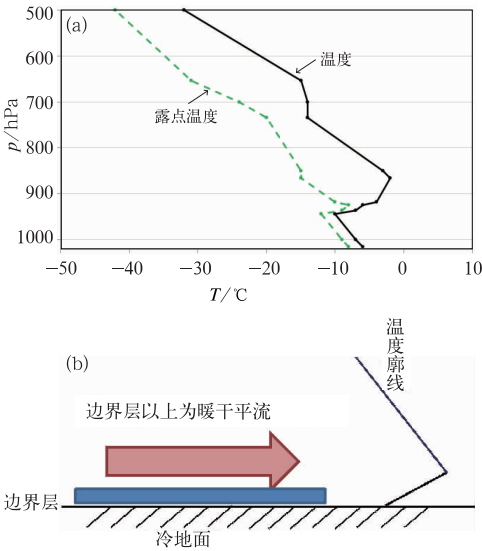


图 6 2013 年 1 月 23 日 08 时北京观象台探空(a)和逆温成因示意图(b)

Fig. 6 Sounding at 08:00 BT 23 January in Beijing (a) and diagram of mechanism of temperature inversion (b)



700 hPa 气温大部分在 0℃ 以上,所以,当该层有冷空气侵入,造成一定降温,例如 850 hPa 降温幅度在 4~10℃ 时,气温降至 -4~0℃,该层的降水粒子将主要为过冷水,极易形成冻雨。实际的降温情况正

如预测,到 31 日 08 时,850 hPa 层上下的气温正好降至 -4~0℃ 区间,以过冷水为主,是冻雨发生的重要因素。

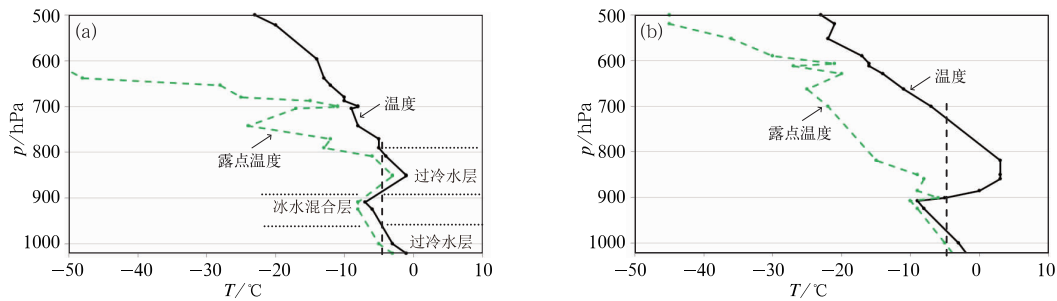


图 7 2013 年 1 月 31 日 08 时(a)和 1 月 30 日 20 时(b)北京观象台探空  
Fig. 7 Soundings in Beijing at 08:00 BT 31 January (a) and at 20:00 BT 30 January (b) 2013

图 7a 为北京南郊观象台的探空曲线,这个探空形态与南方冻雨的经典探空形态极为相似。南郊观象台在 08 时观测的天气现象是雪,到 8 时 30 分观测到的为雨夹雪。在这种冰相粒子和过冷水混合存在的情况下,观测到的天气现象必然会复杂多变,但是可以肯定,当天出现雨、雪、雨夹雪或者冻雨等降水相态的可能性都很大。

而对于实际观测到雨淞的观测站,当天早晨地表气温都在 0℃ 以下,所以冻雨的发生也与观测点地面温度关系极大。当地面温度较低时,落下的冰水混合物会凝冻在路面和物体上,易发生冻结现象。

3 雾霾和冻雨天气的可预报性

通过上述分析可以发现,与这次频发的持续雾霾天气和冻雨的发生关系密切的原因有两点:一是前期持续低温导致的地表温度偏低;二是空中快速的回暖。从天气预报角度来看,这两点在实际预报工作中都具有较好的预报能力。所以,像 2013 年 1 月这样频发的持续雾霾天气和冻雨天气还是具有一定的可预报性。总结北京地区 2013 年这两种高影响天气发生的特征,从预报角度重点关注的也是这两点:第一,前期的低温;第二,快速的大幅度回暖。

3.1 对冬季前期低温的关注

通过详细分析 2012 年 12 月的北京地区气温变化情况,可以看出当气温明显偏低于常年平均气温超过半个月以上,甚至更长时间时,也就是发生极端低

温事件后,低温引发的地表气温降低从而导致边界层气温不易升高的影响要引起足够强的重视。

3.2 空中气温回暖可能带来的变化

当前期气温明显偏低一段时间后,即将出现快速大幅度回暖时,要从大气稳定度方面引起注意。当回暖发生,并且持续时间较长的时候,容易发生近地面辐射降温 and 空中暖平流两方面综合作用造成的强逆温。

夜间辐射降温造成的逆温层,在白天天空晴好的状况下是很容易被破坏的。如图 8,对比 27 日 08 和 20 时的探空可见,到 20 时,由于白天辐射增温导致近地面的气温有明显回升,回升在一定程度上破坏了近地面的逆温;但如果逆温是由空中暖平流和辐射降温共同作用下造成的,则逆温层就很难被破坏。所以在逆温层顶,由于暖干平流造成的逆温在

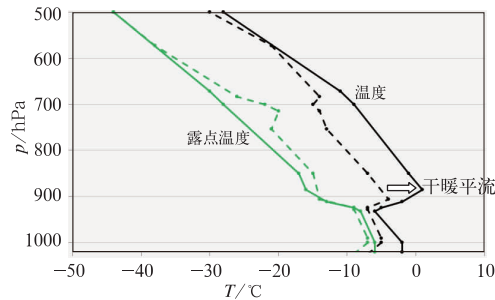


图 8 2013 年 1 月 27 日 08 时(虚)和 20 时(实)温(深色)湿(浅色)北京观象台(54511 站)探空廓线  
Fig. 8 Sounding in Beijing at 08:00 BT (dotted line), 20:00 BT (solid line) 27 January 2013

没有强冷空气到来前持续存在,对于污染物扩散极为不利。如果要破坏这样的逆温,必须有强冷空气的侵入,这也是预报这类雾霾天气结束的要害。

## 4 结论和讨论

2012年冬季,北京遭遇了持续低温寒冷天气、1月持霾天气频发和1月31日冻雨天气三种高影响天气事件。

(1) 持续低温天气是由于该期间冷空气活动频繁并且强度偏强造成的。

(2) 1月雾霾天气的频发与前期持续低温和空中快速大幅度回暖有很大的关系,1月每次回暖过程都对应了持续雾霾的发生。暖平流代表了海平面减压,当回暖幅度达到最大,也就是暖平流为0时,气压场降到最低,变压最小,大气最稳定,此时水平扩散条件最差,易于污染物堆积。与此同时,垂直方向上,前期持续低温会导致夜间边界层辐射逆温加强,而空中暖干气流造成的回暖会强烈加大逆温的程度,这种逆温极不易被破坏,从而强烈抑制污染物和水汽扩散,加重雾霾程度。

(3) 冻雨的发生与前期的持续低温和空中回暖也有很大关系。持续低温和空中回暖使得北京地区大气层结出现了较罕见的空中逆温,即暖层的出现,而31日的这次冻雨饱和层气温正好都在 $-10\sim 0^{\circ}\text{C}$ 之间。这个层次是过冷水和冰相粒子混合层;其中关键的一 $4\sim 0^{\circ}\text{C}$ 层具有一定的厚度,这就保证了空中过冷水的含量。当过冷水落在地表温度低于 $0^{\circ}\text{C}$ 表面时,就会发生冻雨。

(4) 雾霾和冻雨天气的发生都具有一定的可预报性。持续低温天气,空中暖干平流造成的回暖,发生降水时大气垂直层结是否有逆温的存在,饱和层的温度是否在 $-10\sim 0^{\circ}\text{C}$ 之间, $-4\sim 0^{\circ}\text{C}$ 层是否具有一定的厚度和地表气温都是关注的重点。并且当一个极端天气事件发生时,要关注该事件对其他事件的影响,从而进一步提高北京特大型城市应对高影响天气事件的能力。

## 参考文献

- 《大气科学辞典》编委会. 1994. 大气科学辞典. 北京: 气象出版社, 156.
- 段丽, 张琳娜, 王国荣, 等. 2011. 2009年深秋北京大雪过程的成因分析. 气象, 37(11): 1343-1351.
- 郭锐, 张琳娜, 李靖, 等. 2012. 2010年冬季北京初雪预报难点分析. 气象, 38(7): 858-867.
- 贺皓, 吕红, 徐虹. 2004. 陕西省大雾的气候特征. 高原气象, 23(3): 407-411.
- 靳利梅, 史军. 2008. 上海雾和霾日数的气候特征及变化规律. 高原气象, 27(增刊): 138-143.
- 李崇银. 2009. 我国重大高影响天气气候灾害及对策研究. 北京: 气象出版社, 172-175.
- 李书严, 马京津, 轩春怡, 等. 2012. 1951—2008年北京极端天气事件分析. 气候与环境研究, 17(2): 244-250.
- 黎惠金, 李江南, 林文实, 等. 2011. 2008年初南方冻雨云物理过程的模拟研究. 高原气象, 30(4): 942-950.
- 廖晓农, 张琳娜, 何娜, 等. 2013. 2012年3月17日北京降水相态转变的机制讨论. 气象, 39(1): 28-38.
- 欧建军, 周毓茎, 杨棋, 等. 2011. 我国冻雨时空分布及温湿结构特征分析. 高原气象, 30(3): 692-699.
- 漆梁波. 2012. 我国冬季冻雨和冰粒天气的形成机制及预报着眼点. 气象, 38(7): 769-778.
- 陶珣, 史月琴, 刘卫国. 2012. 2008年1月南方一次冰冻天气中冻雨区的层结和云物理特征. 大气科学, 36(3): 507-522.
- 童尧青, 银燕, 许遵祯, 等. 2009. 南京地区雾的气候特征. 南京气象学院学报, 32(1): 115-120.
- 王继志, 徐祥德, 杨元, 琴. 2002. 北京城市能见度及雾特征分析. 应用气象学报, 13(特刊): 160-169.
- 王丽萍, 陈少勇, 董安祥. 2005. 中国雾区的分布及其季节变化. 地理学报, 60(4): 689-697.
- 魏文华, 邓斌. 2008. 近50年合肥地区大雾分析. 安徽农业科学, 36(9): 3776-3779.
- 张恒德, 饶晓琴, 乔林. 2011. 一次华东地区大范围持续雾过程的诊断分析. 高原气象, 30(5): 1255-1260.
- 张燕光. 1999. 华南沿海春季大雾的分析和预报. 气象, 25(2): 53-55.
- 宗志平, 马杰. 2011. 2008年初冻雨强度变化以及与逆温层之间的关系. 气象, 37(2): 156-160.
- 赵德龙, 金莲姬, 覃军, 等. 2011. 污染大气对冻雨过程影响的数值模拟. 大气科学学报, 34(4): 490-496.
- Pruppacher H R, Klett J D. 1997. Microphysics of Clouds and Precipitation. Second Revision: Kluwer Academic Publishers, 954.