

尤凤春,付桂琴,刘卓,等. 2015. 北京地区冻雨时空分布及探空温湿特征分析. 气象, 41(12):1488-1493.

# 北京地区冻雨时空分布及探空温湿特征分析<sup>\*1</sup>

尤凤春<sup>1,2</sup> 付桂琴<sup>3</sup> 刘卓<sup>1</sup> 古月<sup>1</sup>

1 北京市气象台,北京 100089

2 中国气象局北京城市气象研究所,北京 100089

3 河北省气象服务中心,石家庄 050021

**提 要:** 利用 1955 年 1 月至 2013 年 4 月北京地区常规地面观测和南郊观象台探空资料,根据地面观测冻雨记录,分析了时空分布规律;依据冻雨发生时探空资料,初步分析了温湿结构特征和形成的物理机制类型。选取 2000—2013 年 11 月至次年 4 月常规地面观测和南郊观象台探空资料,根据地面观测降雨、雨夹雪、降雪记录,分析了与其对应的南郊观象台平均探空温湿结构,并与冻雨进行比较。结果表明,北京地区冻雨多发生在西北部和东南部,从 11 月开始至次年 4 月结束,并以暖雨机制为主(86.4%);850 hPa 以下温度层结曲线准垂直,且  $<0^{\circ}\text{C}$  是北京地区冻雨的主要特征;雨夹雪和冻雨的主要差异在 850 hPa 以下,低层雨夹雪气温高于冻雨。

**关键词:** 冻雨, 时空分布, 探空, 温湿特征

**中图分类号:** P467

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.12.006

## Analysis of Spatio-Temporal Distribution and Sounding Temperature-Humidity Characteristics of Freezing Rain in Beijing Area

YOU Fengchun<sup>1,2</sup> FU Guiqin<sup>3</sup> LIU Zhuo<sup>1</sup> GU Yue<sup>1</sup>

1 Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089

2 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

3 Hebei Meteorological Service Centre, Shijiazhuang 050021

**Abstract:** The spatio-temporal distribution of freezing rain in Beijing is analyzed by using the surface observation data and sounding data from 1 January 1955 to 30 April 2013. The temperature-humidity structure and the formation mechanism type of freezing rain are studied using the sounding data. Comparative analysis of the temperature-humidity structure and its difference from freezing rain, rainfall, sleet and snow is done using the observation data collected from November to April in 2000—2013. The results show that freezing rain is prone to occur in the northeast and southeast of Beijing, from November to the next April, of which about 86.4% is warm-rain mechanism. The temperature stratification curve under 850 hPa is nearly in vertical and the temperature is below  $0^{\circ}\text{C}$ , which is the main characteristics of Beijing regional freezing rain. The main difference between sleet and freezing rain is the temperature under 850 hPa, the temperature of sleet is higher than the freezing rain.

**Key words:** freezing rain, spatio-temporal, sounding, temperature-humidity characteristic

\* 中央级公益性科研院所基本科研业务专项基金项目(IUMKY201304PP0104)资助  
2014 年 7 月 22 日收稿; 2015 年 9 月 17 日收修定稿  
第一作者: 尤凤春, 主要从事灾害性天气预报技术研究. Email: youfc@sohu.com

## 引 言

冻雨是由过冷水滴组成、与温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  的物体碰撞立即冻结的降水,是冬半年降水中的一种特殊情况。温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  的雨滴在温度略低于  $0^{\circ}\text{C}$  的空气中能够保持过冷状态,其外观同一般雨滴相同,当它落到温度为  $0^{\circ}\text{C}$  以下的物体上时,立刻冻结成外表光滑而透明的冰层,称为雨淞(冻雨)(《大气科学辞典》编委会,1994)。北京地区冻雨天气出现的次数虽不多,但由于立交桥较多,常常比降雪天气对交通造成的影响还严重。2013 年 1 月 31 日早晨,北京朝阳、丰台、大兴等观测站 08 时观测到冻雨天气,城区内大部分地区也出现了明显的冻雨天气,导致路面湿滑,对当天城区的交通产生了极大影响,出现 2000 余起交通事故,至少 4 人死亡(张琳娜等,2014)。

国外,对冻雨研究起步较早,从形成的物理机制出发进行了研究,利用探空观测等资料进行相态识别,对冻雨出现时的天气环流形势及冻雨出现的地理位置分布等进行了研究,得到一些成果。Huffman 等(1988)利用美国 48 个测站 10 年探空资料发现冻雨发生机制有两种:冰相机制和暖雨机制。此外,Bochieri(1980)、Zerr(1997)和 Bourgozin(2000)利用探空资料,设定温湿参数对降雨相态进行分析。Rauber 等(2000)通过对 25 年探空资料进行统计,发现暖雨机制冻雨占总数的 47%。

国内,针对南方冻雨及低温雨雪冰冻天气的研究成果较多(高守亭等,2014;杜小玲等,2014;江漫等,2014;王志云等,2008;马中元等,2011;许丹等,2003;李登文等,2009;吴古会等,2012;徐辉等,2010;宗志平等,2011;2013;姚蓉等,2014;隋玉秀等,2015)。以往主要从环流形势、影响系统和各种物理量场分布以及成因等方面对冻雨天气进行分析研究,过多的强调逆温层中暖层的融化作用,主要关注冰相机制冻雨。但是,专门针对北方地区冻雨的相关研究成果较少(顾光芹等,2012)。

近年来,针对北京地区冬季降雪和降水相态转换的相关研究工作已有很多(李青春等,2011;董林等,2012;郭锐等,2012;廖晓农等,2013;李峰等,2014;施红蓉等,2014)。但是,北京地区冻雨方面的研究成果只见个例分析(张琳娜等,2014),还缺乏针对大量历史个例较系统的分析研究。

本文利用北京地区常规地面观测资料和南郊观象台探空资料,根据地面观测冻雨记录,分析冻雨时空分布规律;依据冻雨发生时的探空资料,初步分析研究冻雨温湿结构特征和形成的物理机制类型;并与降雨、降雪、雨夹雪探空温湿结构进行比较,可为今后预报冻雨及其他降水相态提供参考。

## 1 资料与方法

选取 1955 年 1 月 1 日至 2013 年 4 月 30 日北京地区 20 个国家气象观测站常规地面观测资料及同期南郊观象台 08 和 20 时单站探空资料,利用地面观测资料确定各站的冻雨个例。当某日全市有 2 站及以上同时出现冻雨天气时,就定为一个冻雨个例,共出现 22 个冻雨个例。

从 1978 年起,北京地区 20 个国家气象观测站全部建设完毕,观测记录齐全。所以在分析冻雨空间分布时,选取了 1978 年 1 月 1 日至 2013 年 4 月 30 日冻雨观测资料。

与降雨、雨夹雪、降雪天气探空温湿结构进行比较时,因其出现频次明显比冻雨多,所以选取的资料年代较冻雨短。选取 2000—2013 年 11 月至次年 4 月常规地面观测资料和同期南郊观象台探空资料进行对比分析,其中降雨 20 例,雨夹雪 10 例,降雪 25 例。

## 2 北京地区冻雨时空分布特征

### 2.1 北京地区冻雨空间分布

利用 1978 年 1 月 1 日至 2013 年 4 月 30 日北京地区 20 个国家气象观测站常规地面观测资料,对各站冻雨出现日数分别进行统计,得出北京地区冻雨日数呈西北—东南带状分布,其中主要出现在西北部和东南部地区,西北部延庆佛爷顶出现日数最多(9 d),东南部南郊观象台次多(8 d),而东北部和西南部出现日数较少( $\leq 2$  d)(图略)。

### 2.2 北京地区冻雨时间分布

利用 1955 年 1 月 1 日至 2013 年 4 月 30 日北京地区国家级气象观测站常规地面观测资料,分年代统计出北京地区冻雨出现日数和站数,给出冻雨年代际变化趋势图(图 1)。

年代际变化:由图1可见,20世纪90年代以前冻雨日数和站数均较多,其中50年代冻雨日数最多,80年代冻雨站数最多(可能与北京地区20个国家气象观测站全部建设完毕,观测记录齐全有关),90年代以来冻雨日数和站数均呈明显减少的变化趋势。

另外,由南郊观象台单站自1951年建站以来的资料可以看出,冻雨也呈减少趋势。2001年以前冻雨出现日数较多,2001—2013年南郊观象台从未观测到冻雨天气(图略)。

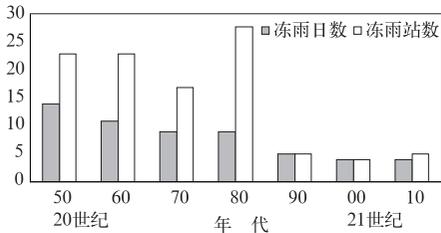


图1 1955年1月1日至2013年4月30日北京地区冻雨日数和站数年代际变化

Fig. 1 The interdecadal variation of freezing rain days and number of stations in Beijing from 1 January 1955 to 30 April 2013

年际变化:由北京地区冻雨日数和站数逐月统计结果(图2)可见,冻雨出现在11月至次年4月。从11月开始冻雨日数逐渐增多,3月最多,4月最少;冻雨站数也是从11月开始逐渐增多,2月最多,3月开始下降,4月最少。

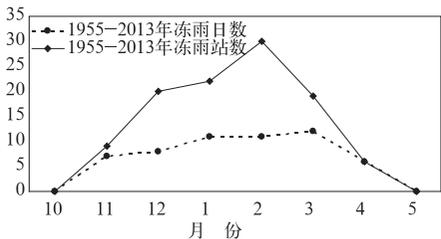


图2 1955年1月1日至2013年4月30日北京地区冻雨日数和站数年际变化

Fig. 2 The interannual variation of freezing rain days and number of stations in Beijing from 1 January 1955 to 30 April 2013

另外,位于西南部的南郊观象台与位于西北部的佛爷顶由于海拔高度不同,其冻雨出现月份也有所不同。南郊观象台冻雨出现在11月至次年3月,其中11月最少,3月最多;而佛爷顶冻雨出现在11

月和次年3—4月,其中3月最少,4月最多,12月至次年2月无冻雨出现(图略)。

### 3 北京地区冻雨探空特征分析

冰相机制:即大气温度垂直结构呈上下冷、中间暖的状态,自上而下分别为冰晶层、暖层和冷层。固态冰晶或雪花降落过程中在暖层内融化为液态,当液滴到达冷层时冷却到 $0^{\circ}\text{C}$ 以下,保持为过冷却状态,碰到地物或地面即发生冻结。当云顶高度在暖层以下时,则不属于冰相机制,而属于暖雨机制(欧建军等,2011)。暖雨机制:即大气垂直结构没有 $>0^{\circ}\text{C}$ 的暖层,雨滴以过冷却水形式降落到地面冻结(Huffman et al,1988)。

针对北京地区22个冻雨个例,应用同期北京南郊观象台探空资料,分别制作出探空曲线,根据大气垂直结构有无 $>0^{\circ}\text{C}$ 的暖层及云顶高度所处的位置(在暖层上或下),即可判断冻雨形成机制。

在22个冻雨个例中,只有4例存在暖层,占全部个例的18%。其中云顶高度在暖层以下的1例,不属于冰相机制。在4例中冰相机制只有3例,均出现在平原地区,占13.6%。

在22个冻雨个例中,无暖层的有18例,占全部个例的82%。其中存在逆温或等温层的有14例,无逆温或等温层的只有4例。暖雨机制共有19例,占86.4%,可见北京地区冻雨以暖雨机制为主,与漆梁波(2012)关于北方地区冻雨机制的结论略有不同。

为分析有暖层、无暖层(有逆温或等温、无逆温或等温)冻雨探空温湿结构特征,分别对有暖层、无暖层个例各层探空资料进行统计、平均,得出各类冻雨的平均探空图(图3)。

由有暖层冻雨平均探空图(图3a)可见,从低到高温为冷、暖、冷的配置,其中暖层大致在800~900 hPa,暖层最高温度平均为 $4.3^{\circ}\text{C}$ ;低层湿度大,中高层湿度相对较小;低层湿,且1000 hPa气温 $<0^{\circ}\text{C}$ 。

由无暖层(有逆温或等温)冻雨平均探空图(图3b)可见,从低层到850 hPa气温随高度下降幅度很小( $<5^{\circ}\text{C}$ ),基本处于准垂直状态;850 hPa以上,气温随高度下降明显。其逆温或等温层顶高度大致在700~900 hPa,平均在803 hPa,逆温或等温层顶温度在 $-10.5\sim 6.9^{\circ}\text{C}$ ,平均为 $-2.6^{\circ}\text{C}$ ;

850 hPa 以下湿度大,850 hPa 以上湿度有所减小;低层湿,气温低,1000 hPa 低于有暖层气温值。

低层和高层相对中层气温随高度下降较明显;从低层到高层湿度变化不明显;低层气温低,1000 hPa 均低于有暖层和无暖层(有逆温或等温)气温值。

由无暖层(无逆温或等温)冻雨平均探空图(图 3c)可见,从低层到高层气温随高度下降,其中

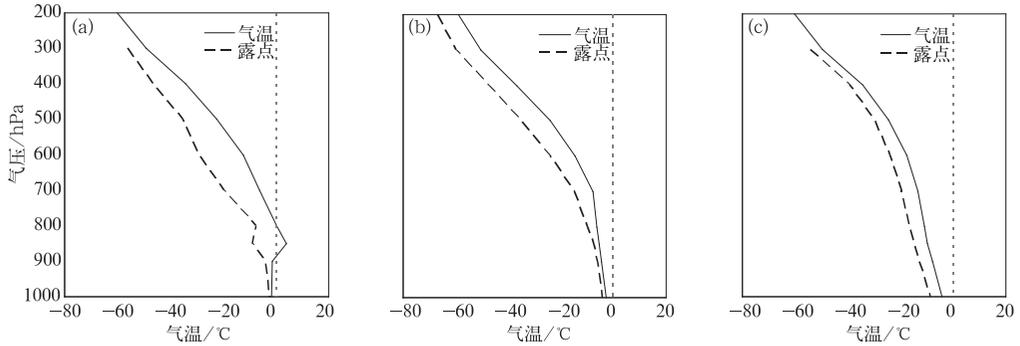


图 3 有暖层(a)、无暖层(有逆温或等温层,b)和无暖层(无逆温或等温层,c)冻雨两个例平均探空图

Fig. 3 Average sounding charts of warm layer freezing (a), no warm layer (temperature inversion or isothermal layer) freezing (b) and no warm layer (no temperature inversion or isothermal layer) freezing (c) rain cases

### 4 冻雨与其他降水相态探空特征比较

为便于将北京地区冻雨与同期降雨、雨夹雪及降雪的探空温湿结构进行比较,利用 2000—2013 年 11 月至次年 4 月常规地面观测资料和同期南郊观象台探空资料,从常规地面观测资料中选取逐年与冻雨出现时间相同月份的降雨、雨夹雪和降雪个例(降雨 20 例,雨夹雪 10 例,降雪 25 例),再分别统计不同降水相态南郊观象台探空各层气象要素平均值,制作出不同降水相态的平均探空图(图 4),与 22 例冻雨平均探空图进行对比分析,找出各自特征。

由冻雨两个例平均探空图(图 4a)可见,低层 900 hPa 以下较冷湿,气温、露点均  $< 0^{\circ}\text{C}$ ,且温度露点差很小;850 hPa 以下气温随高度变化不大,但温度露点差随高度增大;850 hPa 以上气温随高度呈明显下降的趋势,但温度露点差随高度变化并不明显。

由降雨两个例平均探空图(图 4b)可见,低层暖湿,气温、露点均  $> 0^{\circ}\text{C}$ ;中高层 700 hPa 以下温度露点差较小,700 hPa 以上温度露点差随高度呈逐渐加大的趋势,其湿层厚度大于冻雨;气温从低层到高层呈逐渐降低的趋势,但 850 hPa 以下气温均  $> 0^{\circ}\text{C}$ 。

由雨夹雪个例平均探空图(图 4c)可见,低层较

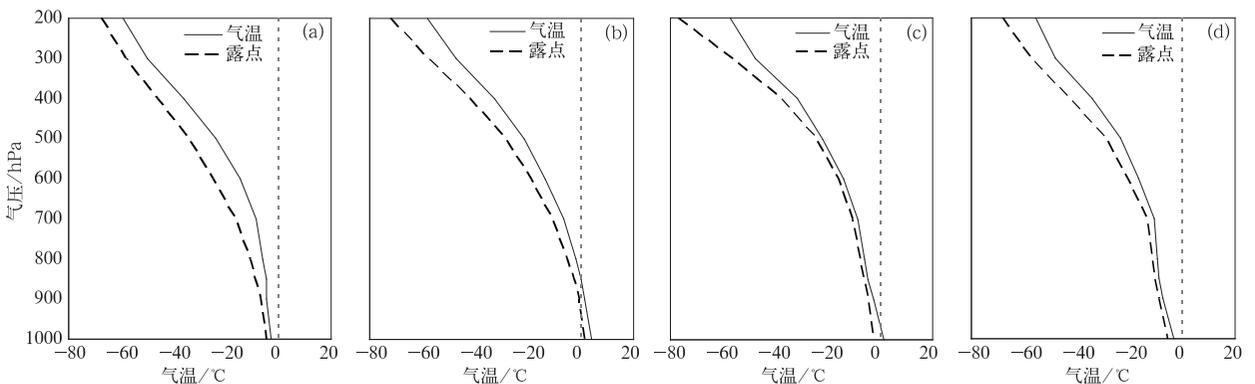


图 4 冻雨(a)、降雨(b)、雨夹雪(c)和降雪(d)平均探空图

Fig. 4 Average sounding charts of freezing rain (a), rainfall (b), sleet (c) and snow (d)

暖湿,气温 $>0^{\circ}\text{C}$ ,但露点 $<0^{\circ}\text{C}$ ;500 hPa 以下温度露点差均较小,500 hPa 以上温度露点差随高度逐渐加大,但湿层很厚;气温从低层到高层也呈逐渐降低的趋势,但气温 $>0^{\circ}\text{C}$ 的层次低于降雨,在950 hPa 以下。

由降雪个例平均探空图(图 4d)可见,低层冷湿,气温、露点均 $<0^{\circ}\text{C}$ ,且比冻雨更冷湿;700 hPa 以下温度露点差均较小,700 hPa 以上温度露点差随高度逐渐加大,湿层较厚;气温从低层到高层也呈逐渐降低的趋势,与冻雨不同的是700 hPa 以下气温随高度降低更明显,与冻雨一样整层气温、露点均 $<0^{\circ}\text{C}$ 。

由不同降水相态探空温度层结曲线合成图(图 5a)可见,在700 hPa 以下其差异较明显,但在700 hPa 以上并不明显。所以,在找降水相态预报指标时应关注中低层气温要素的差异。在700 hPa 以下,降雨时气温均高于雨夹雪、冻雨及降雪;降雪时气温均低于降雨、雨夹雪及冻雨,只是在最低层与冻雨接近;而雨夹雪和冻雨探空温度层结曲线均在

降雨与降雪之间。

雨夹雪和冻雨探空温度层结曲线的差异主要在850 hPa 以下,以上基本重合。所以,在区分雨夹雪和冻雨时应考虑850 hPa 以下的气温要素,其主要区别是雨夹雪在低层比冻雨的气温高,雨夹雪1000 hPa 气温 $>0^{\circ}\text{C}$ ,冻雨1000 hPa 气温 $<0^{\circ}\text{C}$ ,并且在1000 hPa 接近降雪气温值;另一特征是在850 hPa 以下冻雨探空温度层结曲线准垂直,气温随高度变化很小,且均 $<0^{\circ}\text{C}$ ,说明在850 hPa 附近暖平流作用较明显。

由不同降水相态探空露点温度层结曲线合成图(图 5b)可见,在800 hPa 以下其差异较明显,但在800 hPa 以上并不明显。所以,在找降水相态预报指标时应关注低层露点温度要素。在800 hPa 以下,探空露点温度层结曲线自右向左依次排列是降雨、雨夹雪、冻雨及降雪。只有降雨时1000 hPa 露点温度 $>0^{\circ}\text{C}$ ,而雨夹雪、冻雨和降雪均 $<0^{\circ}\text{C}$ ,其中降雪时露点温度最低。冻雨与不同降水相态探空温湿结构主要差异见表 1 所示。

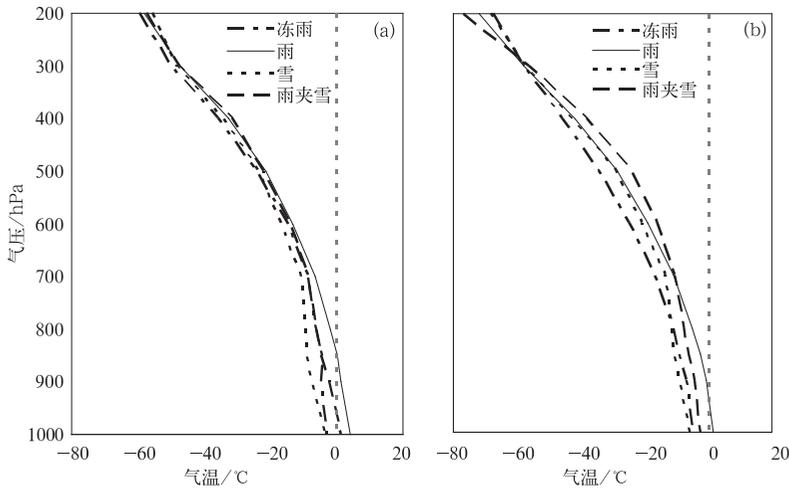


图 5 冻雨与不同降水相态探空温度(a)和露点温度(b)层结曲线合成图

Fig. 5 Integrated stratification curve charts of freezing rain and different precipitation phase temperature (a) and dew temperature (b)

表 1 冻雨与不同降水相态探空温湿结构主要差异

Table 1 The difference between freezing rain and the different precipitation phases in sounding temperature-humidity structure

降水种类	1000 hPa 气温	1000 hPa 露点	低层温湿状况	气温垂直变化情况
雨	气温 $>0^{\circ}\text{C}$	露点 $>0^{\circ}\text{C}$	低层暖湿	随高度降低
雨夹雪	气温 $>0^{\circ}\text{C}$	露点 $<0^{\circ}\text{C}$	低层较暖湿	随高度降低
冻雨	气温 $<0^{\circ}\text{C}$	露点 $<0^{\circ}\text{C}$	低层较冷湿	850 hPa 以下准垂直
雪	气温 $<0^{\circ}\text{C}$	露点 $<0^{\circ}\text{C}$	低层冷湿	随高度降低

## 5 结 论

通过以上分析,得到以下主要结论:

(1) 北京地区冻雨日数呈西北—东南带状分布,其中主要出现在西北部和东南部地区。

(2) 北京地区20世纪90年代以前冻雨日数和站数均较多,90年代以后冻雨日数和站数均呈明显减少的变化趋势;南郊观象台2001年以前冻雨日数较多,2001—2013年从未观测到冻雨天气。北京地区冻雨天气出现在11月至次年4月,其中3月最多,4月最少。

(3) 北京地区冻雨以暖雨机制为主,占86.4%,冰相机制只占13.6%。

(4) 冻雨与不同降水相态探空温度层结在700 hPa以下其差异较明显,但在700 hPa以上其差异并不明显,在找冻雨及其他降水相态预报指标时更应关注中低层气象要素。

(5) 雨夹雪和冻雨探空温度层结的差异主要在850 hPa以下,以上基本重合。在区分雨夹雪和冻雨时应主要考虑850 hPa以下的气象要素,主要区别是冻雨1000 hPa气温 $<0^{\circ}\text{C}$ ,而雨夹雪1000 hPa气温 $>0^{\circ}\text{C}$ ;冻雨在850 hPa以下探空温度层结曲线准垂直,且气温均 $<0^{\circ}\text{C}$ ,而雨夹雪气温随高度降低。

## 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, 744.

杜小玲, 高守亭, 彭芳. 2014. 2011年初贵州持续低温雨雪冰冻天气成因研究. 大气科学, 38(1): 61-72.

董林, 符娇兰, 宗志平. 2012. 2011年隆冬北京初雪成因分析. 气象, 38(8): 913-920.

高守亭, 张昕, 王瑾, 等. 2014. 贵州冻雨形成的环境场条件及其预报方法. 大气科学, 38(4): 645-655.

顾光芹, 田国强, 梁秀慧, 等. 2012. 河北省雾凇和雨凇气候特征及气象条件分析. 气象, 38(5): 561-568.

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.

江漫, 于甜甜, 钱维宏. 2014. 我国南方冬季低温雨雪冰冻事件的大气扰动信号分析. 大气科学, 38(4): 813-824.

李登文, 乔琪, 魏涛. 2009. 2008年初我国南方冻雨雪天气环流及垂

直结构分析. 高原气象, 28(5): 1140-1148.

李峰, 施红蓉. 2014. 一次多相态天气过程的风廓线雷达探测资料特征分析. 气象, 40(8): 992-999.

李青春, 程丛兰, 高华, 等. 2011. 北京一次冬季回流暴雪天气过程的数值分析. 气象, 37(11): 1380-1388.

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.

马中元, 刘照明, 吴琼, 等. 2011. 江西强冻雨天气形成特征分析. 气象, 37(1): 66-74.

欧建军, 周毓荃, 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.

施红蓉, 李峰, 吴蕾, 等. 2014. 风廓线雷达对降水相态变化的观测分析. 气象, 40(10): 1259-1265.

隋玉秀, 杨景泰, 王健, 等. 2015. 大连地区冬季降水相态的预报方法初探. 气象, 41(4): 464-473.

王志云, 鲁亚斌, 牛法宝. 2008. 云南东部冻雨的成因分析. 云南大学学报(自然科学版), 30(增刊): 324-328.

吴古会, 彭芳, 崔健, 等. 2012. 2011年冬季贵州低温雨雪冰冻天气的成因分析. 气象, 38(3): 291-299.

许丹, 罗喜平. 2003. 贵州凝冻的时空分布特征和环流成因分析. 高原气象, 22(4): 401-404.

徐辉, 金荣花. 2010. 地形对2008年初湖南雨雪冰冻天气的影响分析. 高原气象, 29(4): 957-967.

姚蓉, 唐佳, 唐明晖, 等. 2014. “14·02”湖南三次雨雪过程对比分析. 气象, 40(12): 1450-1506.

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.

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.

宗志平, 马杰, 张恒德, 等. 2013. 近几十年来冻雨时空分布特征分析. 气象, 39(7): 813-820.

Bochieri J R. 1980. The objective use of upper air soundings to specify precipitation type. Mon Wea Rev, 108(5): 596-603.

Bourgouin P. 2000. A method to determine precipitation types. Wea Forecasting, 15(5): 583-592.

Huffman G J, Norman G A. 1988. The super cooled warm rain process and the specification of freezing precipitation. Mon Wea Rev, 116(11): 2172-2182.

Rauber R M, Olthof L, Ramamurthy M, et al. 2000. The relative importance of warm rain and melting processes in freezing precipitation events. J Appl Meteor, 39(7): 1185-1195.

Zer R J. 1997. Freezing rain: An observational and theoretical study. J Appl Meteor, 36(12): 1647-1661.