

刘畅,杨成芳,郑丽娜.江淮气旋影响下的山东降雪过程相态特征[J].海洋气象学报,2019,39(3):74-83.  
LIU Chang, YANG Chengfang, ZHENG Lina. Feature of precipitation phase in snowfall process in Shandong induced by Changjiang-Huaihe cyclone[J].Journal of Marine Meteorology,2019,39(3):74-83. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.03.009.(in Chinese)

## 江淮气旋影响下的山东降雪过程相态特征

刘畅<sup>1</sup>,杨成芳<sup>1</sup>,郑丽娜<sup>2</sup>

(1. 山东省气象台,山东 济南 250031; 2. 东营市气象台,山东 东营 257091)

**摘要:** 利用常规的地面观测资料、高空探测资料、自动气象站1 h 间隔观测资料、NCEP/NCAR 再分析资料( $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ , 6 h)和 ERA5 再分析资料( $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ , 1 h), 针对1999—2013年山东省12例江淮气旋降雪过程,总结了降水形态类型及时空分布、相态转换等特征并讨论了降水相态“逆转”现象的物理机制。结果表明:1)江淮气旋降雪过程的降水形态种类多样,可出现雨、雪、雨夹雪、冰雹、冰粒、霰、米雪和雨淞,降水相态转换过程中,除了雨夹雪,冰粒也是一种过渡形态;2)冰雹、冰粒、霰、米雪和雨淞5种特殊降水形态最易出现在2月和3月,“雷打雪”现象亦多发于2月和3月;3)鲁东南和半岛南部地区以降雨为主,鲁西北地区多出现降雪,雷暴集中出现在鲁中的中西部和鲁南地区,尤其是鲁东南地区;4)江淮气旋降雪过程相态转换的基本形式为雨转雪,以有无明显雨雪分界线为依据,可分为“典型雨转雪”和“无明显雨雪转换”两类,二者的影响系统特点显著不同;5)范围较大的相态逆转现象易发区域在地面雨雪分界线附近,位于地面倒槽后部,走向与地面倒槽槽线走向一致。气旋生成前低层暖温度平流增强引起低层增温以及气温日变化导致的中午前后近地层浅薄增温均可引起相态逆转,上述两个因素均与地面倒槽的发展态势关系密切。

**关键词:** 江淮气旋; 降水相态; 相态转换; 物理机制

**中图分类号:** P426.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)03-0074-10

**DOI:** 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.03.009

## Feature of precipitation phase in snowfall process in Shandong induced by Changjiang-Huaihe cyclone

LIU Chang<sup>1</sup>, YANG Chengfang<sup>1</sup>, ZHENG Lina<sup>2</sup>

(1. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China; 2. Dongying Meteorological Observatory, Dongying 257091, China)

**Abstract** By using conventional surface observation data, sounding data, automatic weather station data with an interval of 1 h, NCEP/NCAR reanalysis data ( $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ , 6 h), and ERA5 reanalysis data ( $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ , 1 h), the types and spatial-temporal distribution of forms of precipitation, transformation of phases, and physical mechanism of phase inversion are discussed and summarized based on 12 cases of snowfall processes induced by Changjiang-Huaihe cyclone from 1999 to 2013 in Shandong Province. The results are shown as follows. 1) There are various forms of precipitation in snowfall processes induced by Changjiang-Huaihe cyclone, such as rain, snow, sleet, hail, ice particle, graupel, snow grain, and glaze. Ice particle also acts as a transition form of precipitation in transformation of phases besides sleet.

收稿日期:2019-06-21; 修订日期:2019-07-16

基金项目:国家自然科学基金项目(41475038);中国气象局关键技术集成与应用项目(CMAGJ2015M34);中国气象局预报员专项(CMAYBY2015-041,CMAYBY2017-042);山东省气象局科研项目(2013sdqx02,2015sdqx02)

作者简介:刘畅,女,硕士,高级工程师,主要从事灾害性天气预报业务和技术研究,liucc99@163.com。

通信作者:杨成芳,女,博士,正研级高级工程师,主要从事天气预报业务及降雪研究,cf\_yang@hotmail.com。

2) Hail, ice particle, graupel, snow grain, and glaze appear most frequently in February, followed by March. Thundersnow occurs often in February and March. 3) Rain often occurs in the southeast of Shandong Province and the south of Shandong Peninsula, while snow often appears in the northwest of Shandong Province. In addition, thunderstorm occurs in the middle and western part of central Shandong Province and the south of Shandong Province, especially the southeast of Shandong Province. 4) The transformation from rain to snow is the basic phase change in snowfall process by Changjiang-Huaihe cyclone. Based on existence of rain and snow boundary, the transformation of phases can be categorized into two kinds, one is typical transition from rain to snow, the other one is without obvious transition from rain to snow. There are significant differences in synoptic systems. 5) Large-scale phase inversion phenomenon tends to occur near the boundary between snowfall area and rainfall area. The zone of phase inversion, with the same orientation of surface inverted trough, is located behind surface inverted trough. Phase inversion can be caused by temperature increase resulted from warm temperature advection at lower troposphere and shallow warming resulted from diurnal variation of temperature near surface around noon before cyclogenesis. The two factors both are closely related with the development of surface inverted trough.

**Key words** Changjiang-Huaihe cyclone; precipitation phase; transformation of phase; physical mechanism

## 引言

江淮气旋是在南支锋区上发展起来的一类温带气旋,是产生降水和大风天气的重要天气系统。受江淮气旋影响产生降水的天气过程通常持续时间较长,且强降水多呈阶段性出现。即江淮气旋生成前,通常低空有暖性切变线影响,地面有倒槽配合,强降水已经开始,气旋生成后,动力和斜压性增强,强降水再次出现。同时由于江淮气旋生成过程中时常伴有低空西南风急流,有时还伴有源于东海的一支低空东南风急流,水汽十分充沛,当其从江淮地区移出,取东北路径北上时,常给山东地区带来暴雨或暴雪天气。前人研究多着眼于江淮气旋暴雨,对于江淮气旋降雪的关注相对更少一些,事实上,降雪是冬半年预报工作的重点和难点,尤其是暴雪过程带来的低温及积雪事件<sup>[1-2]</sup>,而江淮气旋是产生大范围强降雪的一类重要天气系统,前人关于江淮气旋降雪的研究主要应用天气诊断方法对成因进行分析<sup>[3-7]</sup>。更值得关注的是,冬半年在江淮气旋生成过程中,在气旋发展的不同阶段,冷、暖气团相互作用的形式和程度不同,降水性质可表现为多样,且存在相态间的转换,这是冬半年江淮气旋降水预报的难点。关于江淮气旋降雪过程中降水相态的复杂性及原因已有部分研究成果,杨成芳等<sup>[8]</sup>指出江淮气旋暴雪和大雪过程存在雨雪转换。刘畅等<sup>[9]</sup>剖析了一次弱江淮气旋降雪过程中降水相态复杂性及成因。孙莎莎等<sup>[10]</sup>研究了2012

年一次江淮气旋降雪过程中济南站降水相态二次转换的原因。近年来关于降水相态的判据涌现出诸多研究成果,主要研究内容均围绕不同降水相态特征层温度或厚度特征的分析 and 阈值归纳<sup>[11-16]</sup>。余金龙等<sup>[17]</sup>从假相当位温作为相态判据这一角度出发,建立了安徽地区相态的多级判别方程,杨舒楠等<sup>[18]</sup>分析了低层温度平流对气旋降水相态分布的影响。此外,有学者应用风廓线雷达分析降水相态转换过程中的细节变化特征<sup>[19-20]</sup>,还有学者探讨了不同降水相态的探空廓线特征<sup>[21]</sup>。总结以上研究成果,未见有针对江淮气旋降雪过程中降水相态特征的系统性分析和归纳。本文在普查历史天气图基础上,选取了山东地区1999—2013年共12例江淮气旋降雪天气过程,拟从多角度总结江淮气旋降雪过程的降水相态特征,以期对江淮气旋降雪预报提供有价值的参考。

## 1 资料与个例说明

文中普查了1999—2013年历史资料(地面天气现象观测业务自2014年1月1日取消),包括每日8次常规地面观测,08时、20时常规高空探测,以及山东省123个国家级地面气象观测站(有人值守)(简称“山东123站”)观测资料,包括日降水量(前日20时—当日20时累计)、降雪相态(当日出现降雪与否)、日积雪深度、1h间隔气温和露点观测资料(2005年起)。

江淮气旋降雪过程定义:当一次江淮气旋降水

过程中有降雪相态出现即记为一次江淮气旋降雪过程。本文所挑选的12例江淮气旋降雪过程(表1)是降水相对明显的过程,选择标准为山东123站中至少有1站日降水量大于或等于10 mm。统计降

水形态特征所用资料;每次降雪过程自山东省内出现降水开始至所有站降水全部结束,所有地面观测记录的现在天气现象。

表1 江淮气旋降雪过程相态转换特点及相关特征

Table 1 Feature of transformation of phases in snowfall processes induced by Changjiang-Huaihe cyclone

个例时间(yyyymmdd)	相态转换特点	气旋生成方式	850 hPa 低涡	山东雷暴	全省过程平均降水量/mm	逆转现象
20010106		倒槽锋生 <sup>[22]</sup>	有	无	27.1	有
20010223		倒槽锋生	有	无	9.5	无
20050215		静止锋波动 <sup>[22]</sup>	有	无	14.4	有
20070304	典型雨转雪	倒槽锋生	有	无	41.0	无
20100228		倒槽锋生	有	有	13.8	无
20110226		倒槽锋生	有	无	17.2	有
20121213		倒槽锋生	有	无	10.2	有
20000104		静止锋波动	无	无	8.8	有
20030221	无明显雨雪	静止锋波动	有	有	16.2	有
20120321	转换	静止锋波动	无	有	9.2	有
20121220		倒槽锋生	无	无	6.1	有
20130203		静止锋波动	无	有	10.9	有

## 2 相态基本特征

### 2.1 相态种类

统计了12次降雪过程中共168个时次的地面观测资料,结果表明,江淮气旋降雪过程的降水形态表现多样,共出现8种形态表现形式,分别为:雨(2 353站次)、雪(1 166站次)、雨夹雪(305站次)、冰粒(28站次)、冰雹(7站次)、雨淞(6站次)、米雪(5站次)、霰(1站次)。可见,江淮气旋降雪过程的降水形态的常见表现形式为雨、雪和雨夹雪,以雨和雪为主,雨夹雪为过渡形态<sup>[8]</sup>,特殊降水形态中冰粒出现最多,为28站次。江淮气旋降雪过程多表现为稳定性降水,也可出现对流性质降水,出现冰雹或霰,在特殊的温度垂直分布层结下还可出现冰粒、雨淞和米雪。

分析了几种特殊降水形态(冰雹、冰粒、雨淞、霰和米雪)出现的时间分布特征(图1),1—3月是特殊形态出现的时段,而雷暴出现在2—3月,在挑选的12个个例中,有4例(“20100228”、“20030221”、“20120321”和“20130203”)出现了雷暴现象。从统计结果(图1)来看,2月雷暴发生站次数达56站次之多,分析其原因,在2010年2月28日山东的“雷打雪”天气过程<sup>[5-7]</sup>中,出现了7种降

水形态(雨、雪、雨夹雪、冰雹、雨淞、霰和冰粒),同时出现了较大范围的雷暴,因此,这是此次统计结论中2月表现特殊的主要原因。

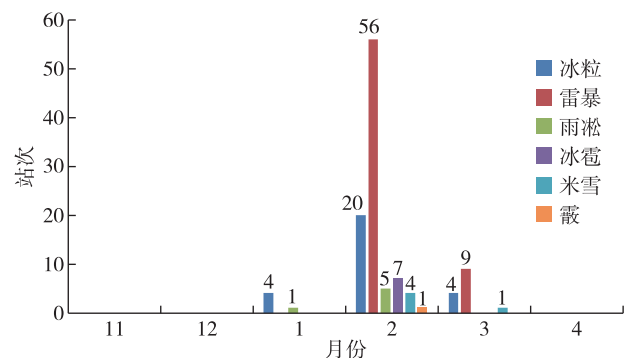


图1 江淮气旋降雪过程中5种特殊降水形态和雷暴出现时间分布

Fig. 1 Temporal distribution of 5 special forms of precipitation and thunderstorm in snowfall processes induced by Changjiang-Huaihe cyclone

### 2.2 相态地域分布特征

在江淮气旋降雪过程的某一时段,处于气旋不同部位的站点,其上空冷暖空气相互作用的阶段有所不同,降水形态表现可能不同,并且对某一地区而言,每次降雪过程中气旋的生成地、路径和形态也不同,同时降水形态分布在一定程度上也受复杂下垫面影响,由此导致了江淮气旋降水形态地域分

布的复杂性。对某站而言,降雨比率 = 降雨次数 / (降雨次数 + 降雪次数),由此得到了山东 123 站降雨比率分布图(图 2a)。可见,山东东南部地区降雨比率大于 80%,说明此区域在江淮气旋降雪过程中主要出现的降水形态是雨,而山东的西北部地区和山东半岛北部降雨比率小于 45%,表明这些地区主要的降水形式为雪。这种相态地域分布特征一方面与地理纬度有关,另一方面与天气系统结构特征有关,即在江淮气旋形成并影响山东前期,通常有位于江淮地区的低空暖式切变线逐渐北抬,切变线南侧常伴有西南风急流,其北侧有时伴有东南风急流,此系统率先影响鲁东南和半岛南部地区,多产生降雨。而后期,对于倒槽锋生类江淮气旋,随着冷锋自山东西北部侵入,地面雨雪分界线逐渐东移南压,通过普查地面天气图发现,有时雨雪分界线不能够一直东移南压到鲁东南和半岛南部地区,

即鲁东南和半岛南部地区一直未能转雪,对于静止锋上波动类江淮气旋,鲁东南和半岛南部地区发生雨转雪的情况更少。特殊降水形态,如冰粒、雨淞、冰雹、米雪,其分布特征如图 2b,主要集中在鲁西北和鲁中地区,半岛和鲁南地区少见。

一般情况下江淮气旋降雪过程为稳定性降水过程,而当南支低槽发展较好,经向度较大时,暖湿气流北上影响山东,在低层冷垫上存在不稳定层结,也可发展对流,并可能伴有雷暴活动,如 2010 年 2 月 28 日山东的“雷打雪”天气过程。在冬半年雷暴现象较为罕见,那么在江淮气旋降雪过程中,雷暴发生区域是否有集中性特征,为此,统计分析了本文所选取江淮气旋降雪过程中雷暴区域分布特征,如图 2c 所示,雷暴发生的区域性特征较为明显,主要集中在鲁中的中西部和鲁南地区,以鲁东南地区尤为集中,莒县和郯城共出现了 4 次雷暴。

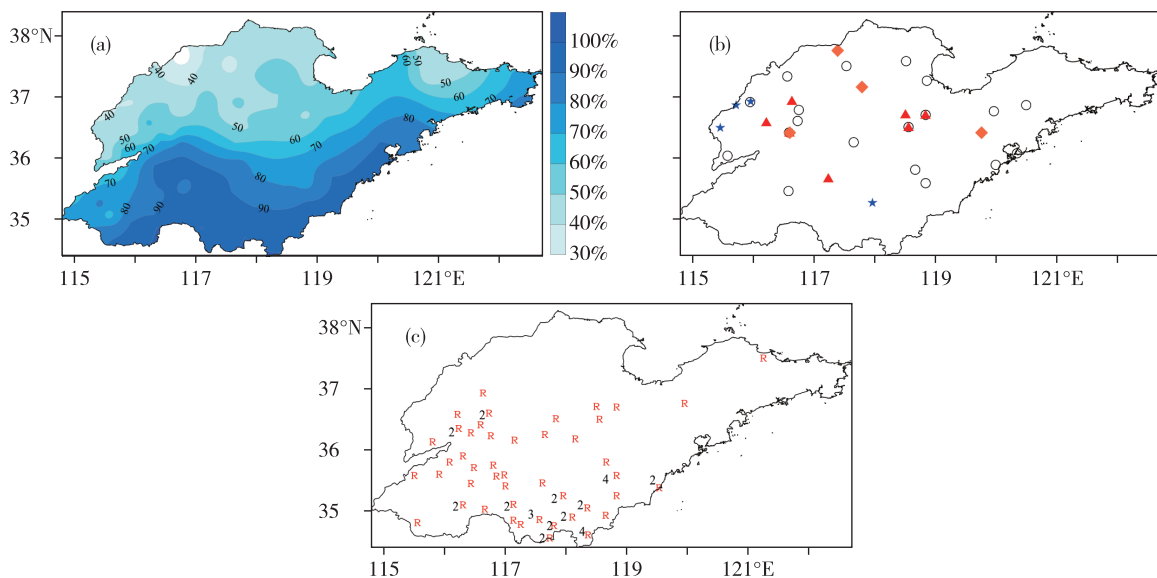


图 2 江淮气旋降雪过程降雨比率(a;单位:%)、特殊降水形态(b;空心圆:冰粒,三角:冰雹,菱形:雨淞,五角星:米雪)及雷暴(c;单位:次)分布

Fig.2 Distribution of ratio of rainfall (a; units: %), special form of precipitation (b; hollow circle for ice particle, triangle for hail, rhombus for glaze, five-pointed star for snow grain), and thunderstorm (c; units: times) in snowfall processes induced by Changjiang-Huaihe cyclone

### 3 相态转换及与之相关特征

针对 12 个个例,主要通过普查天气图的方式,重点关注了气旋影响前后相态转换特征,总结归纳如表 1。下文将详细阐述相态转换特点及与之相关的诸多特征。

#### 3.1 相态转换特征

普查历史天气图发现,本文所选 12 例江淮气旋

降雪过程的降水相态转换特征整体可归纳为两类(表 1),一类是降水过程中有明显的雨转雪过程,一般自西北向东南逐渐由雨转雪,雨雪分界线东移南压,文中称之为“典型雨转雪”过程;另一类是降水过程中没有出现明显的雨转雪的过程,不存在明显的雨雪分界线,个别站点存在相态的转换,但整体范围不大,没有明显的雨雪分界线东移南压的特征,文中称之为“无明显雨雪转换”过程。



### 3.2 影响系统特征

“典型雨转雪”类江淮气旋降雪过程,气旋生成方式通常为“倒槽锋生”,7例中有6例为“倒槽锋生”类(6/7),此时气旋空间结构发展较为完整,表现为850 hPa有明显的等压线闭合的低涡环流,7例“典型雨转雪”过程均伴有850 hPa低涡(7/7)。“无明显雨雪转换”类降雪过程中气旋生成方式多为“静止锋上的波动”,5例中有4例为“静止锋上的波动”类(4/5),通常850 hPa无低涡,5例中有4例无低涡(4/5)。

选取“典型雨转雪”类(“20010223”)和“无明显雨雪转换”类(“20130203”)江淮气旋降雪过程,对比两类降雪过程的天气形势(图3)可知,“典型雨转雪”类过程(图3a、c)500 hPa南支锋区上低槽从重庆延伸至云南,黄淮、江淮、江汉、江南和华南地区均在槽前强盛西南气流控制下,最大风速大于 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。北支锋区上,低槽位于蒙古国和我国内蒙古中部,相应的地面冷高压中心位于蒙古国西部,

中心气压高于 $1\ 042.5\text{ hPa}$ ,冷高压前部的北风流场控制蒙古国及我国东北、华北、黄淮地区和内蒙古,此时冷锋已侵入地面倒槽,江淮气旋已生成,气旋中心位于江苏东部的东海海域,中心气压低于 $1\ 010.0\text{ hPa}$ ,相应的850 hPa东海北部有明显低涡。由高、低空形势场分析可知,“倒槽锋生”特征显著。“无明显雨雪转换”类过程(图3b、d)500 hPa南支锋区低槽位于青藏高原东南部到云南西部,槽前西南气流控制江淮、江南和华南地区,与2001年2月23日08时500 hPa形势类似,850 hPa无明显低涡。不同的是,北支锋区上低槽位于内蒙古中东部,低槽平浅,经向度小,表明冷空气势力较弱,相应的地面冷高压中心位于蒙古国中部,中心气压大于 $1\ 037.5\text{ hPa}$ ,冷高压前部冷锋自辽宁经华北北部延伸至山西和陕西的北部,即此时冷锋尚未到达江淮地区,而江淮气旋已生成(位于东海,中心气压值低于 $1\ 015.0\text{ hPa}$ ),属波动类。

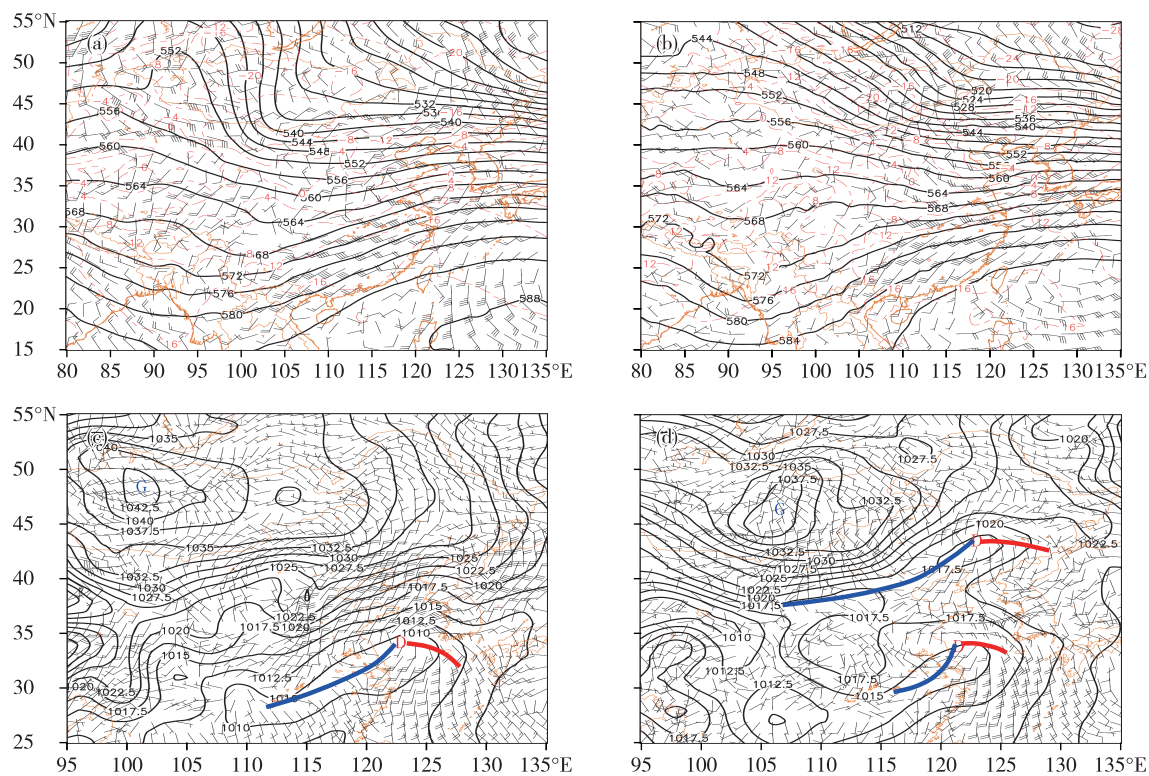


图3 高空天气形势图(a、b;实线:500 hPa位势高度场,等值线间隔:4,单位:dagpm;风矢:850 hPa风场,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;虚线:850 hPa温度场,等值线间隔:4,单位: $^{\circ}\text{C}$ )和地面天气形势图(c、d;黑实线:海平面气压场,等值线间隔:2.5,单位:hPa;风矢:地面10 m风场,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;蓝/红实线:地面锋面)(a、c.2001年2月23日08时,b、d.2013年2月3日20时)

Fig.3 Upper synoptic chart (a, b; solid line for geopotential height field at 500 hPa with an interval of 4 dagpm, units: dagpm; wind barb for wind at 850 hPa, units:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; dashed line for temperature at 850 hPa with an interval of  $4^{\circ}\text{C}$ , units:  $^{\circ}\text{C}$ ) and surface synoptic chart (c, d; black solid line for sea-level pressure with an interval of 2.5 hPa, units: hPa; wind barb for wind at 10 m, units:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; blue/red solid line for ground frontal surface) at 08:00 BST on 23 February 2001 (a, c) and 20:00 BST on 3 February 2013 (b, d)

### 3.3 其他特征

“典型雨转雪”类比“无明显雨雪转换”类过程降水量大,体现在全省过程平均降水量方面,“典型雨转雪”类过程降水量最大可达 41.0 mm,“无明显雨雪转换”类过程降水量最大为 16.2 mm。“典型雨转雪”类过程通常有明显雨雪分界线,并且雨雪分界线自西北向东南移动的江淮气旋降雪过程,其降水量均比较大,这类气旋系统结构发展也较完整。

由表 1 可见,江淮气旋降水相态逆转现象在两类相态转化过程中均不同程度地存在,相比之下,“无明显雨雪转换”类过程出现逆转现象更普遍。值得说明的是,在“典型雨转雪”类过程中,有 3 次过程没有出现逆转现象,分别为“20010223”、“20070304”和“20100228”,这 3 次降雪过程为江淮气旋强烈发展的过程,冷暖平流发展异常剧烈。下文将对相态逆转现象做具体分析。

## 4 相态逆转现象

### 4.1 相态逆转现象落区

关于江淮气旋降水相态逆转特征的研究,杨成芳等<sup>[12]</sup>指出雪转雨均发生在江淮气旋即将形成前的 3 h 内,这是所有江淮气旋相态逆转降雪过程的显著共性特征,并给出了相态发生逆转时的温度特征。本文在此基础上,进一步研究相态逆转现象落区。

在分析了 6 次逆转现象明显的降雪过程(“20010106”、“20050215”、“20110226”、“20120321”、“20121213”和“20130203”)的基础上,选取了“20121213”和“20130203”两次过程作为相态逆转代表个例进行细致剖析,以揭示相态逆转现

象发生的物理机制。图 4a 为 2012 年 12 月 13 日 20 时海平面气压场(图中海平面气压场所选时刻为开始出现相态逆转现象的时刻,逆转站点为自所选时刻开始,以后逐次观测到的所有逆转站点),地面倒槽自江淮地区向北伸展至山东,相态逆转站点分布在地面倒槽附近,且其分布走向接近倒槽槽线走向。对于“20130203”过程(图 4b),2013 年 2 月 3 日 14 时地面倒槽位于江淮地区,倒槽槽线呈西南—东北走向,可见逆转站点亦分布于倒槽附近,距离槽线略远,其分布走向也近乎平行于地面倒槽走向。对于本文研究的其他 4 次天气过程,相态逆转站点的分布也表现出了同样的特征(图略)。

LOWNDES et al.<sup>[23]</sup>最早在 1974 年研究了位势厚度与降水相态的关系。而决定降水相态的关键在于对流层低层温度情况<sup>[8,13,16]</sup>。所以选取 925 hPa 与 1 000 hPa 之间位势厚度  $\Delta H_{925-1000}$  作为研究对象。由图 4a 可见,2012 年 12 月 13 日 20 时,逆转站点分布于  $\Delta H_{925-1000}$  628 dagpm 线附近,通过翻查地面观测得知, $\Delta H_{925-1000}$  628 dagpm 线与雨雪分界线也几乎重合。对于“20130203”过程(图 4b),2013 年 2 月 3 日 14 时逆转站点分布在  $\Delta H_{925-1000}$  621 dagpm 线附近,而  $\Delta H_{925-1000}$  621 dagpm 线也与地面雨雪分界线几乎重合。

综合以上分析可知,江淮气旋降雪过程中,降水相态逆转现象易发生在地面倒槽附近,其分布走向近乎平行于倒槽槽线伸展方向,容易发生在雨雪分界线附近,而且与 1 000 hPa 和 925 hPa 之间位势厚度有关(不同过程的具体位势厚度数值略有差别)。

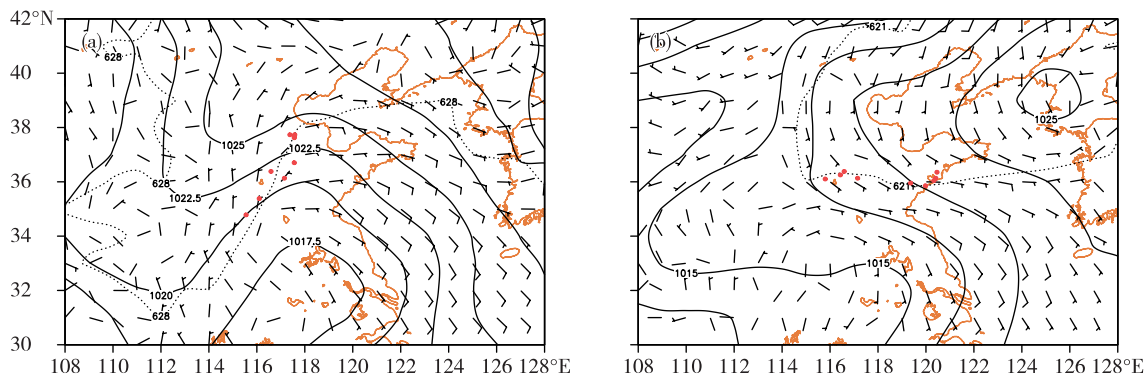


图 4 2012 年 12 月 13 日 20 时 (a) 与 2013 年 2 月 3 日 14 时 (b) 海平面气压场 (实线, 等值线间隔: 2.5, 单位: hPa)、10 m 风场 (风矢, 单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、925 hPa 和 1 000 hPa 间位势厚度 (虚线, a 图中为 628 dagpm 线, b 图中为 621 dagpm 线) 及相态逆转站点 (圆点)

Fig. 4 Sea-level pressure (solid line, interval: 2.5 hPa, units: hPa), wind (wind barb, units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 10 m, geopotential thickness between 925 hPa and 1 000 hPa (dashed line, 628 dagpm in Fig. 4a and 621 dagpm in Fig. 4b), and station with phase inversion (dot) at 20:00 BST on 13 December 2012 (a) and 14:00 BST on 3 February 2013 (b)



## 4.2 相态逆转原因

进一步分析发现,冬半年江淮气旋影响山东产生降水时,相态逆转现象出现的时间不长,造成的降水量一般不大,但在天气现象上表现明显。在上文列举的2012年12月13日和2013年2月3日两次过程中,均出现了较为明显相态逆转现象,究竟是何种原因促使降雪转为降雨(或冰粒),充分剖析后发现,二者成因并不相同,在此以济南站(两次过程均出现逆转现象)为代表来揭示引起相态逆转现象的两种原因。

2012年12月13日20时地面倒槽由苏皖地区延伸至山东中西部,20时前后出现降水相态逆转现象的站点主要位于山东西部,分析发现13日23时江淮气旋已经形成,气旋中心(1017.5 hPa)位于苏皖南部。关注925 hPa以下累计温度平流发展情况,如图5所示,20时925 hPa风场的气旋性环流中心位于安徽北部,此时在气旋中心北部即山东的中西部存在温度平流大于 $20 \times 10^{-6} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ 的暖平流区域,此区域存在东南风急流和东北风辐合,配合着地面倒槽强烈发展,在江淮气旋生成前,低层暖平流的发展引起了山东西部部分站点降雪转为降雨。以济南站为例,自13日13时近地面层(以1000 hPa为代表)逐渐转为倒槽后部东北风影响,13日14时925 hPa以下出现了明显的暖平流,平流强度大于 $15 \times 10^{-6} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ ,20时以后大于 $15 \times 10^{-6} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ 的暖平流区厚度开始增加,20时之前位于960 hPa以下,14日02时扩展至920 hPa,在此时段内温度平流强度增强至大于 $20 \times 10^{-6} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ , $0^\circ\text{C}$ 层高度也由980 hPa上升至850 hPa(图6a)。济南站地面气温由 $0.5^\circ\text{C}$ (19时)升至 $1.2^\circ\text{C}$ (23时),如图7a,由此导致了济南站由降雪转变为降雨。

2013年2月3日地面形势与2012年12月13日不同,倒槽位于江淮地区呈西南—东北向发展,山东中部偏南地区出现逆转现象,出现逆转现象的站点连线走向与倒槽走向一致。济南站在3日14时由降雪转为降雨。分析此过程925 hPa以下累计温度平流发展情况,发现在此波动类江淮气旋生命史过程中,暖平流较弱(图略)。以济南站为例,如图6b所示,济南站3日14时前后低层为东南风影响,温度平流小于 $10 \times 10^{-6} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ ,与2012年12月13日暖平流发展情况有显著的差别,14时前后近地面层在气温日变化效应影响下,980 hPa以下出现浅薄增温, $0^\circ\text{C}$ 层扩展到980 hPa附近。济南站气温也从 $-1.1^\circ\text{C}$ (06时)升至 $1.3^\circ\text{C}$ (13时),如图7b

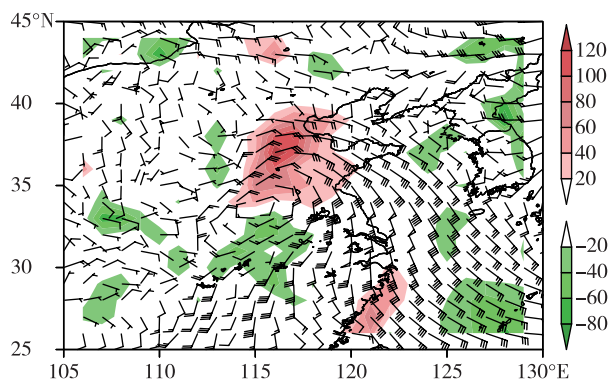


图5 2012年12月13日20时925 hPa以下累计温度平流(填色:绝对值 $\geq 20$ ,单位: $10^{-6} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ )和925 hPa风场(风矢,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig.5 Cumulative temperature advection below 925 hPa (colored area for absolute value of temperature advection equal to or greater than 20, units:  $10^{-6} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and wind at 925 hPa (wind barb, units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 20:00 BST on 13 December 2012

所示。由此可见,在这次过程中,温度平流对逆转现象的贡献微弱,气温日变化引起中午前后近地面层浅薄增温层是促使降雪转变为降雨的主导因素。

进一步对其他4次相态逆转过程分析后,归纳总结6个个例的特点发现,促使降水相态发生逆转的原因有两个,分别为低层暖平流发展和气温日变化。在江淮气旋生成前,若地面倒槽发展较好,槽线接近南北向,并伸展到山东(图8a),表明低层暖平流发展较好,在合适的条件下将促使降雪转为降雨,发生在地面倒槽后部的东北风中,雨雪分界线附近,可以发生在一天当中的任何时段,如个例“20050215”。当地面倒槽发展较弱,倒槽呈西南—东北向伸展,倒槽槽线尚未伸展到山东(图8b),此时山东位于倒槽后部的偏东气流中,暖平流作用不够显著,此时逆转的主要原因来自于气温日变化,易发生在14时前后,易发生相态逆转的区域也位于雨雪分界线附近,如个例“20110226”和“20120321”。由低层暖平流引起的增温效应显著,可使 $0^\circ\text{C}$ 层扩展到850 hPa,而气温日变化引起的增温层次浅薄,仅限于近地层。当条件适宜时,暖平流和气温日变化也可同时作用,引起相态逆转,如个例“20010106”。在具体的预报工作中,预报是否会出现相态逆转现象,除了考虑江淮气旋系统发展阶段和暖平流主要影响的区域范围外,还要考虑气温日变化的作用,最主要还是要考察对流层低层基础气温的发展变化趋势,从而综合地做出合理的预报。

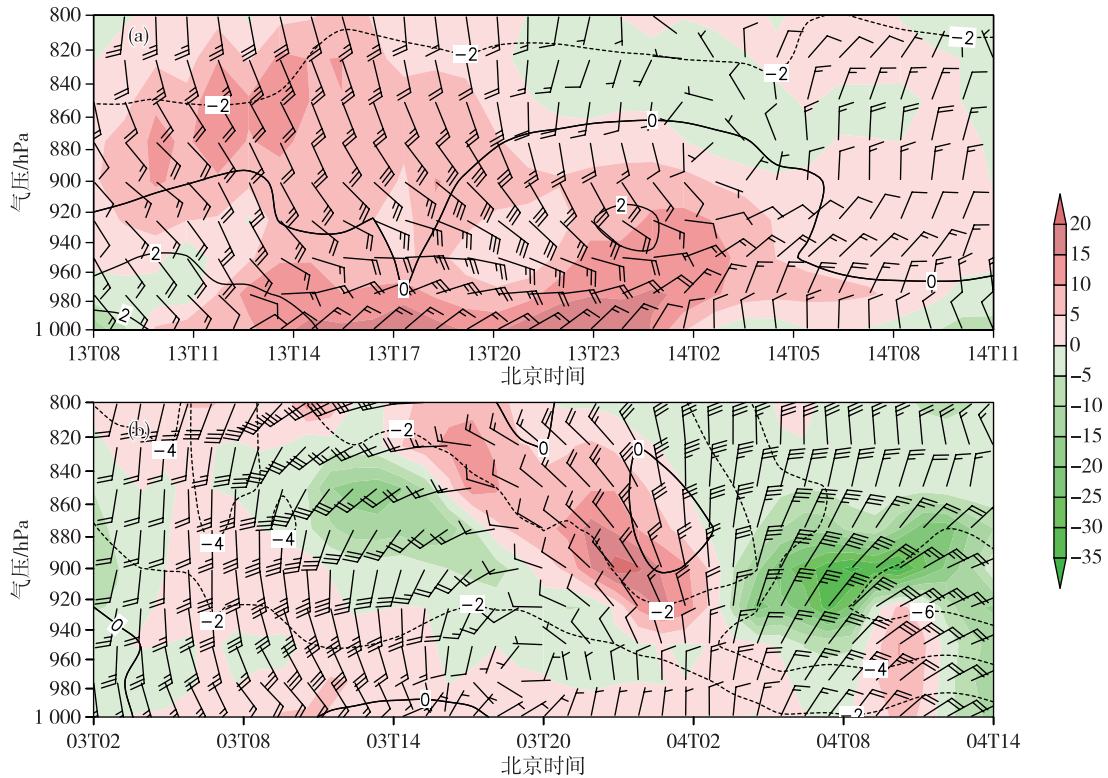


图6 济南站2012年12月13日08时—14日11时(a)和2013年2月3日02时—4日14时(b)温度平流(填色,单位: $10^{-6} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ )、温度(黑实线:温度 $\geq 0^\circ \text{C}$ ,黑虚线:温度 $< 0^\circ \text{C}$ )和风场(风矢,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )的时间演变廓线

Fig.6 Profile of temporal evolution of temperature advection (colored, units:  $10^{-6} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ ), temperature (black solid line for temperature equal to or greater than  $0^\circ \text{C}$ , black dotted line for temperature lower than  $0^\circ \text{C}$ ), and wind (wind barb, units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at Jinan Station from 08:00 BST on 13 to 11:00 BST on 14 December 2012 (a) and from 02:00 BST on 3 to 14:00 BST on 4 February 2013 (b)

## 5 结论与讨论

1) 江淮气旋降雪过程可出现多种降水形态,如雨、雪、雨夹雪、冰粒、冰雹、雨淞、米雪、霰,其中以雨、雪、雨夹雪三种降水形态为主要降水形式,冰粒和雨夹雪均为过渡形态,其他为特殊降水形态,特殊降水形态多出现在2、3月,伴有雷暴的江淮气旋降雪过程也多出现在2、3月。

2) 对山东而言,江淮气旋降雪过程中,鲁东南地区以降雨为主,而鲁西北和半岛北部地区以降雪为主。特殊降水形态易于出现在鲁西北和鲁中山区。江淮气旋降雪过程也可伴随雷暴现象,雷暴集中出现在鲁南地区,尤其是鲁东南地区。

3) 江淮气旋降雪过程的降水相态转换特点可归纳为两类,一类为“典型雨转雪”过程,另一类为“无明显雨雪转换”过程,划分依据为有无明显的雨雪分界线。两类过程影响系统特点有显著不同。“典型雨转雪”类过程,通常发生在“倒槽锋生”类江淮气旋中,伴有闭合的850 hPa低涡,其过程降水量

相对更明显,“无明显雨转雪”类过程发生在“静止锋波动”类江淮气旋中,无明显850 hPa低涡配合,降水量相对弱。

4) 江淮气旋降水相态逆转现象与地面倒槽关系密切。逆转现象发生在地面倒槽后部,逆转站点分布区域的走向与地面倒槽槽线走向一致,也就是易于发生在雨雪分界线附近,与925 hPa和1000 hPa位势厚度有关。当地面倒槽发展较好,接近山东时,受低层暖平流影响,增温层厚,可出现逆转;当地面倒槽发展较弱,距山东较远时,气温日变化导致近地层浅薄增温也可能导致相态逆转。

本文初步总结了江淮气旋降雪过程降水形态的基本特征,形成了一定的认识,但由于江淮气旋降雪过程的特殊性,有诸多方面值得继续深入探讨,例如有、无“雷打雪”现象的两类过程在影响系统特点、热力和动力物理量参数等方面的差异以及何种情况下的江淮气旋降雪过程易于出现特殊降水形态,尤其是冰雹,还有一系列的问题有待进一步研究。



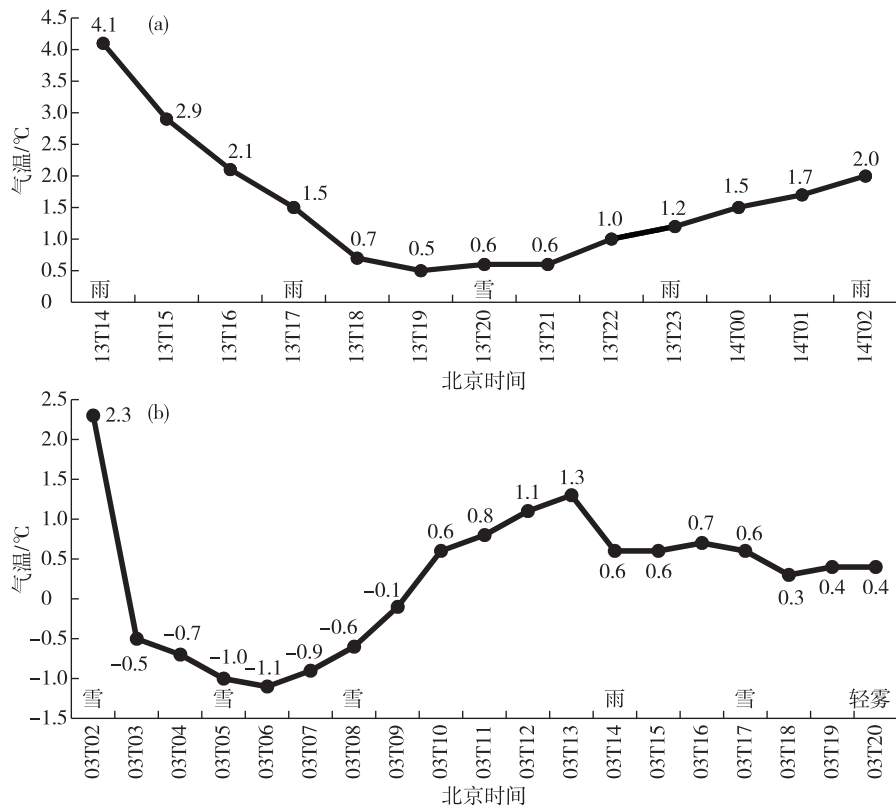


图7 济南站2012年12月13日14时—14日02时(a)和2013年2月3日02—20时(b)降水相态(文字)和逐小时气温(黑线,单位:°C)演变

Fig.7 Evolution of precipitation phase (Chinese character) and hourly temperature (black line, units: °C) at Jinan Station from 14:00 BST on 13 to 02:00 BST on 14 December 2012 (a) and from 02:00 BST to 20:00 BST on 3 February 2013 (b)

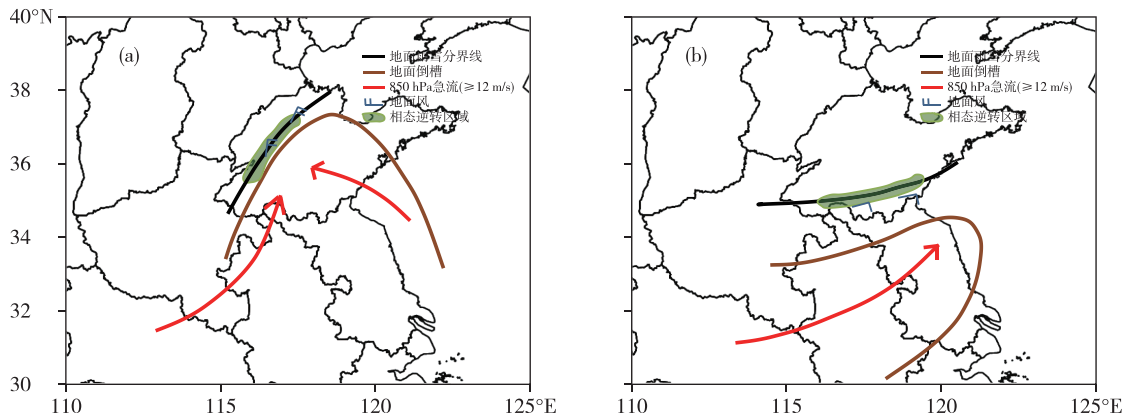


图8 相态逆转现象出现时天气系统配置概念模型图(a.暖平流驱动类,b.气温日变化驱动类;黑实线:雨雪分界线;棕实线:地面倒槽;红箭头线:850 hPa急流;风矢:地面风,单位: $m \cdot s^{-1}$ ;绿阴影:逆转现象发生区域)

Fig.8 Conceptual model of synoptic system configuration when phase inversion happens (a. inversion type driven by warm advection, b. inversion type driven by diurnal variation of temperature; black solid line for boundary between snowfall area and rainfall area; brown solid line for surface inverted trough; red arrow line for jet stream at 850 hPa; wind barb for surface wind, units:  $m \cdot s^{-1}$ ; green shaded area for phase inversion zone)

## 参考文献:

[1] 杨成芳,刘畅.一次江淮气旋暴雪的积雪特征及气象影响因子分析[J].气象,2019,45(2):191-202.

[2] 杨璐瑛,张芹,郭俊建,等.鲁南初冬一次罕见特大暴雪的成因分析[J].海洋气象学报,2018,38(1):100-107.

[3] 杨柳.2003年江淮春冬两次降雪天气过程数值模拟和初步诊断分析[D].南京:南京信息工程大学,2005.

- [4] 李根娥.一次春季罕见寒潮暴雨(雪)天气过程诊断分析[D].兰州:兰州大学,2007.
- [5] 郑丽娜,靳军.“2.28”山东罕见“雷打雪”现象形成机制分析[J].高原气象,2012,31(4):1151-1157.
- [6] 周雪松,杨成芳,孙兴池.两次早春暴雪过程的对比分析[J].高原气象,2013,32(2):2446-2455.
- [7] 杨晓霞,吴炜,万明波,等.山东省两次暴雪天气的对比分析[J].气象,2012,38(7):868-876.
- [8] 杨成芳,姜鹏,张少林,等.山东冬半年降水相态的温度特征统计分析[J].气象,2013,39(3):355-361.
- [9] 刘畅,杨成芳,宋嘉佳.一次江淮气旋复杂降水相态特征及成因分析[J].气象科学,2016,36(3):411-417.
- [10] 孙莎莎,杨成芳,尹承美,等.济南地区“12.13”降水过程相态二次转换成因分析[J].气象与环境学报,2015,31(4):14-19.
- [11] 郑丽娜,杨成芳,刘畅.山东冬半年回流降雪形势特征及相关降水相态[J].高原气象,2016,35(2):520-527.
- [12] 杨成芳,刘畅,郭俊建,等.山东相态逆转降雪天气的特征与预报[J].海洋气象学报,2017,37(1):73-83.
- [13] 漆梁波,张瑛.中国东部地区冬季降水相态的识别判据研究[J].气象,2012,38(1):96-102.
- [14] 李江波,李根娥,裴雨杰,等.一次春季强寒潮的降水相态变化分析[J].气象,2009,35(7):87-94.
- [15] 张琳娜,郭锐,曾剑,等.北京地区冬季降水相态的识别判据研究[J].高原气象,2013,32(6):1780-1786.
- [16] 任兆鹏,张苏平,马艳,等.青岛冬半年降水相态统计分析及判别方法研究[J].海洋气象学报,2018,38(1):27-33.
- [17] 余金龙,朱红芳,邱学兴,等.安徽冬季地面降水相态的判别研究[J].气象,2017,43(9):1052-1063.
- [18] 杨舒楠,徐珺,何立富,等.低层温度平流对华北雨雪天气过程的降水相态影响分析[J].气象,2017,43(6):665-674.
- [19] 李峰,施红蓉.一次多相态天气过程的风廓线雷达探测资料特征分析[J].气象,2014,40(8):992-999.
- [20] 施红蓉,李峰,吴蕾,等.风廓线雷达对降水相态变化的观测分析[J].气象,2014,40(10):1259-1265.
- [21] 夏倩云,钱贞成,唐千红,等.冬季降水相态的探空廓线分型研究[J].气象与减灾研究,2015,38(4):54-59.
- [22] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.天气学原理与方法[M].4版.北京:气象出版社,2000:141.
- [23] LOWNDES C A S, BEYNON A, HAWSON C L. Assessment of usefulness of some snow predictors [J]. Meteor Mag, 1974, 103(1229):341-358.