

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.  
Ren Zhaopeng, Zhang Suping, Ma Yan, et al. Statistical analysis and discrimination criterion on precipitation types of winter half year in Qingdao[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(1): 27-33. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.01.004. (in Chinese)

## 青岛冬半年降水相态统计分析及判别方法研究

任兆鹏<sup>1,2</sup>,张苏平<sup>3</sup>,马艳<sup>1</sup>,凌艺<sup>1</sup>

(1. 青岛市气象局,山东 青岛 266003; 2. 青岛市气象灾害防御工程技术研究中心,山东 青岛 266003; 3. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室和海洋-大气相互作用与气候实验室,山东 青岛 266100)

**摘要:**通过对2006—2015年青岛冬半年不同相态降水的统计分析得出,青岛冬半年纯雨日数1月最少,纯雪日数2月最多,12月和1月是雨夹雪及雨雪转换日数占当月降水日数比例最高的两个月。通过个例分析表明,雨雪转换过程多与冷空气入侵相联系。温度场和风场条件能较好地反映出雨雪转换的特征,降温 and 风向转换在850 hPa以下层更为明显。探空资料分析表明,850 hPa、925 hPa、1 000 hPa和地面气温对不同相态降水都有很好的指示意义,越低层指示性越好。0℃层高度对不同相态降水同样具有指示意义,100~500 m高度是雨雪转换的关键高度层;以不同高度层气温为指标确定出青岛冬半年降水相态预报判别指标。

**关键词:**降水相态;雨雪转换;判别指标

**中图分类号:** P457.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)01-0027-07

**DOI:**10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.01.004

## Statistical analysis and discrimination criterion on precipitation types of winter half year in Qingdao

REN Zhaopeng<sup>1,2</sup>, ZHANG Suping<sup>3</sup>, MA Yan<sup>1</sup>, LING Yi<sup>1</sup>

(1. Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266003, China; 2. Qingdao Engineering Technology Research Center for Meteorological Disaster Prevention, Qingdao 266003, China; 3. Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education & Ocean-Atmosphere Interaction and Climate Laboratory, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract** Using the precipitation data collected in Qingdao from 2006 to 2015, different precipitation types during the winter half-year was analyzed. Result shows that the monthly rainfall-day is minimum in January and the snowfall-day is maximum in February. The sleet and rain-snow conversion events take the highest proportion of precipitation days in December and January. Cases study shows that the rain-snow conversion is closely related to cold air intrusion. The temperature and wind field can manifest the characteristics of the rain-snow conversion, especially in the level under 850 hPa where the cooling and wind direction changing are more obvious. Soundings data show that temperature at the 850 hPa, 925 hPa, 1 000 hPa and the ground temperature are good indicators for different precipitation types with the better correlation in the lower level. The level of 0℃ temperature is also an indicator for precipitation types, of which the altitude between 100 m and 500 m is the key level for rain-snow conversion. The discrimination of precipitation types in Qingdao mainly depends on the temperature at these key levels.

**Key words** precipitation types; rain-snow conversion; discrimination criterion

收稿日期:2017-10-28; 修订日期:2017-12-22

基金项目:青岛市气象局科研项目(2015qdxk03,2014qdxk12)

作者简介:任兆鹏,男,硕士,工程师,主要从事天气预报及相关领域研究,renzpeng@163.com。

通信作者:张苏平,女,博士,教授,主要从事中小尺度海洋-大气相互作用方面的研究,zsping@ouc.edu.cn。

## 引言

冬季降水相态主要包括雨、雪、雨夹雪、冰粒、冻雨等。随着社会的发展,冬季降水相态的预报问题显得越来越重要。24 h 累积降水量达到 5 mm 时,如果降水相态是雨,则只是小雨,对城市运行和社会生产环节不会有明显影响;但如果降水相态是雪,则天气演变为大雪,对城市的影响就变得严重<sup>[1-4]</sup>。青岛市区年平均降雪日数为 10 d,由于青岛特殊的地理位置,冬半年多位于北方系统与南方系统交界处且受海洋影响,降雪形势与内陆地区有很大的差异。同时青岛市区丘陵较多,地形起伏,即使是很弱的降雪过程,如果降水相态预报失败,也会给城市运行带来严重的不利影响。由于过去相关研究较少,迄今为止青岛冬半年降水相态预报一直是预报的难点。因此冬半年降水相态的研究,对于城市运行和社会生产的顺利进行,有着重要的研究意义,也是不断提升公共气象服务水平的重要环节。

目前国内对于降水相态的研究,一般通过对于降雪个例的研究总结出降水相态的温度特征<sup>[5-7]</sup>,或是在统计大量个例特征层气温的基础上给出判别指标<sup>[8-10]</sup>。李江波等<sup>[5]</sup>分析得出,当 0 °C 层高度下降到 950 hPa 以下、地面气温在 0 °C 上下、1 000 hPa 气温  $\leq 2$  °C、925 hPa 气温  $\leq -2$  °C 时,相态将由雨向雪转变。漆梁波和张瑛<sup>[8]</sup>结合厚度层给出了我国东部冬半年降水相态的综合识别指标。杨成芳等<sup>[9]</sup>研究表明降水相态变化还与影响系统有关,运用多层气温结合提出判别指标。以上研究可以看出,对于降水相态的判别标准,各地并不相同。本文采用青岛近 10 年的观测资料,在探空资料上选取垂直分辨率更高的 L 波段探空雷达数据,着重分析大气温度层结,特别是近地面层对于降雪相态的影响,总结探索适合于青岛的冬半年降水相态判别指标。

## 1 资料与方法

选取 2006—2015 年地面观测资料,将每年冬半年的降水日进行统计分类。关于冬半年时段的取值,前人研究中不尽相同。纪忠萍等<sup>[10]</sup>、宋连春等<sup>[11]</sup>定为 10 月—次年 3 月,杨成芳等<sup>[9]</sup>、付冬雪等<sup>[12]</sup>定为 11 月—次年 3 月。考虑到青岛的气候特征,同时根据常年统计 10 月并未出现降雪,因此本文将冬半年定义为 11 月—次年 3 月。经统计,降雨

日为 326 d、纯雪日为 116 d、有雨雪转换发生的日数为 39 d。探空资料选取青岛站 L 波段探空雷达每日 08 时和 20 时(北京时)的探空资料,垂直分辨率 50 m。

## 2 青岛冬半年不同相态降水统计分析

由青岛冬半年各月不同相态降水日数的分布(图 1)来看,在降雨方面,1 月是出现纯雨日数最少的月份,仅 27 d 的纯雨日。11 月—次年 1 月纯雨日数逐月减少,1—3 月纯雨日数逐月增多。11 月和 3 月,纯雨日数所占百分比明显超过纯雪和雨雪转换的总和。12 月和 2 月纯雨日数占当月降水 50% 左右,只有 1 月纯雨日所占百分比低于 50%。而纯雪日数方面,则大致与纯雨日呈反向的分布;2 月是纯雪日数最多的月份,11 月和 3 月最少。雨雪转换日数方面,12 月—次年 3 月出现雨雪转换的日数基本持平,其中 1 月和 3 月略高。12 月和 1 月是所占比例最高的两个月,雨雪转换日数都超过了当月总降水日数的 10%。

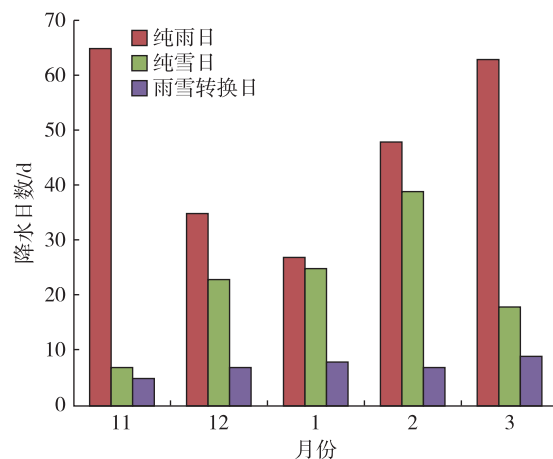


图 1 青岛冬半年(11 月—次年 3 月)不同相态降水日数(2006—2015 年)

Fig.1 Monthly variation of different precipitation types in each month during the winter half year in Qingdao (November to next March, 2006—2015)

影响青岛冬半年降雪天气的天气形势主要有低槽冷锋降雪、回流降雪、低涡切变降雪、冷流降雪、气旋降雪 5 种类型。将 2006—2015 年冬半年青岛全市范围降雪个例按此 5 种天气形势进行分类统计(图 2)得出,在青岛冬半年的降雪过程中(纯雪和雨雪转换总和)低槽冷锋形势所占比例最多,低涡切变形势和冷流形势次之,而回流和气旋形势下的降雪过程最少。雨雪转换日数的分布比例大致与

纯雪日数保持一致,低槽冷锋形势影响下的雨雪转换日数最多,这除与低槽冷锋过程本身较多有一定关系外,这种天气形势下常伴有冷空气的剧烈入侵,使得大气温度产生剧烈变化,造成降水相态的前后转换。由雨雪转换日所占总降雪日数的比例来看,回流形势下雨雪转换日数所占比例最高,可以达到 75%。出现回流天气形势降雪的情况下,青岛更容易出现雨雪转换天气。

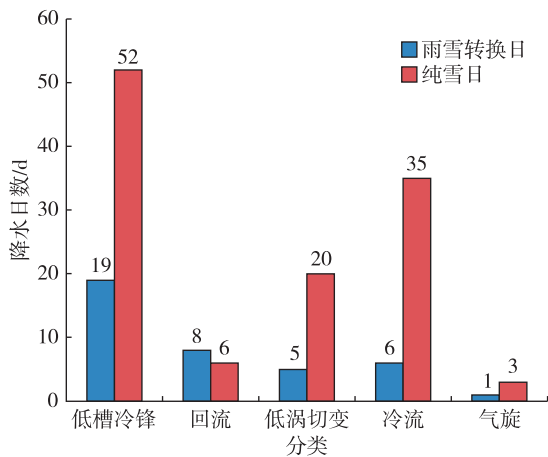


图 2 不同天气形势下降雪日数分布  
Fig.2 Snowfall days under different synoptic situations

由以上统计分析可以看出,青岛冬半年不同相态降水在时间分布及影响系统两方面都存在不同的特征。但仅基于统计分析只能宏观上了解青岛冬半年不同相态降水的发生规律,而具体到每次降水过程,仍然需要进行个例分析来找出定量的阈值判据,以此指导预报员进行降水相态的准确预报。

### 3 雨夹雪及雨雪转换个例分析

由于对青岛地区冬半年降水相态转换少有研究,因此对特征明显的降水相态转换天气过程进行个例分析,有助于理解对预报因子的选择。通过分析 39 次发生雨夹雪或雨雪转换的个例,结果显示其中由纯雪向纯雨转换的个例有 5 次,纯雨过程中短时段 (<2 h) 出现雨夹雪的个例 4 次,其余 30 次为长时段雨夹雪天气或纯雨转换为纯雪。通过天气条件分析,5 次雪转雨个例中冷空气势力均较弱或高空冷槽东移过程中有明显北抽,青岛上空 850 hPa 以下层为明显的偏南风。而短时段雨夹雪个例中冷空气强度同样偏弱。由于上述两种过程在相态转换过程中所占比例较少<sup>[13]</sup>,因此着重分析有长时段雨夹雪天气和纯雨转纯雪天气过程。

2015 年 11 月 23 日(图 3a)和 2016 年 2 月 13

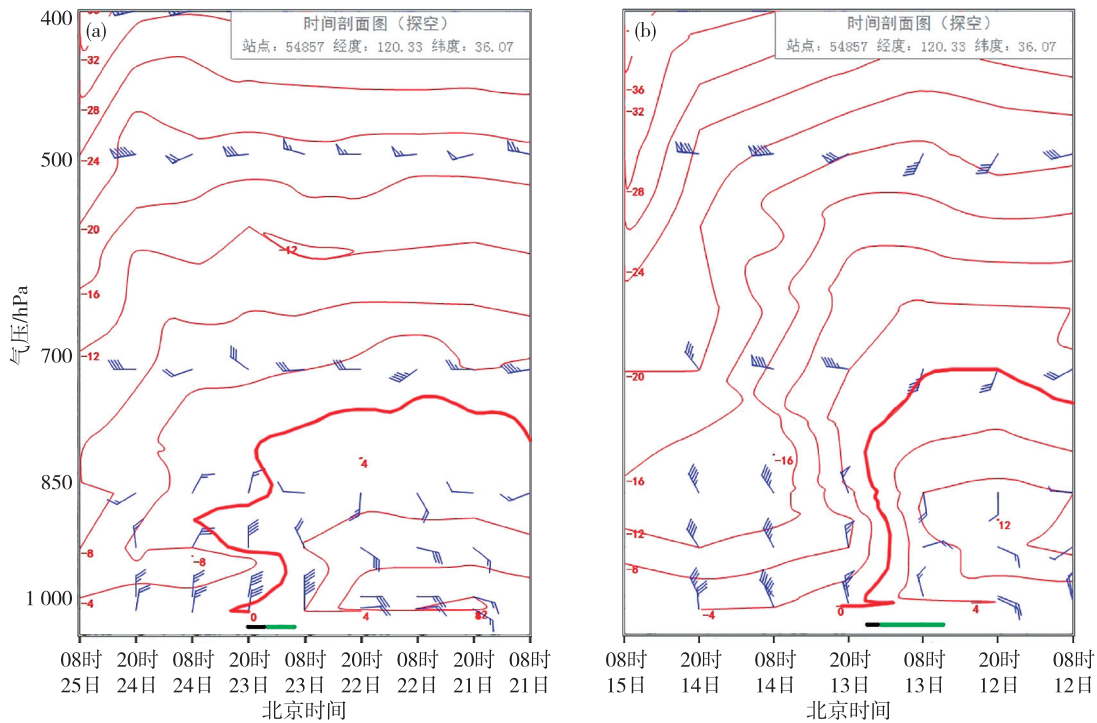


图 3 青岛站雨雪转换个例探空时间剖面图(绿色为降雨时段,黑色为降雪时段)(a.2015 年 11 月 23 日,b.2016 年 2 月 13 日)

Fig.3 Sounding profiles of rain-snow conversion events in Qingdao on (a) 23 November 2015 and (b) 13 February 2016 (Green line for rain duration, and black line for snow)

日(图3b)青岛市区发生两次雨雪转换天气过程,分别发生在23日19时和13日17时前后,均为降雨转为降雪。由青岛探空观测时间剖面图分析可知,两次过程都伴随着明显的冷空气过程,表现在水平风场的转变和气温的骤降。由水平风场的垂直变化来看,南风向北风的转换都由近地面低层开始,逐渐扩展至850 hPa高度,表明冷空气的入侵多由近地面层开始,与地面冷锋携冷空气南下及锋面自身的倾斜性有直接关系。而在雨雪转换发生时刻,从地面到高层的风向基本都已转为偏北风,风向的转换发生在相态转换之前。

由降温来看,两次过程前后从低层到高层都伴有明显的降温。由于冷空气强度的不同,降温幅度并不相同,但能看出850 hPa以下层的降温幅度更为明显。两次个例中,都能看出明显的温度梯度密集带,由近地面向高层倾斜,反映出了冷锋锋面倾斜的特征。此外,两次个例温度剖面上都有0℃层存在,在发生雨雪转换时刻,0℃层位置在925 hPa至1 000 hPa附近。相比较来看,温度场比风场能更好地反映出相态转换的特征。

根据天气学基本原理及尺度分析<sup>[14]</sup>,大尺度系统中的局地气温变化就是由温度平流、垂直运动和非绝热作用造成:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -V \cdot \nabla_h T - w(\gamma_d - \gamma) + \frac{1}{c_p} \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

由于一般情况下冬半年降水很少有强的对流活动,大气的垂直运动多为天气尺度的上升运动,上升速度较小。且青岛地区冬半年来自热带的暖湿气流较少,不易产生大量级的降雨,水汽凝结过程中释放的凝结潜热较少。因此公式(1)中垂直运动项和

非绝热加热项可以不考虑,局地气温的变化主要是平流项的贡献<sup>[15]</sup>,该项已经包含了风向风速的影响。因此,只将气温的变化作为重要的综合指标加以研究。

#### 4 青岛冬半年降水相态的判定指标确立

由个例分析可知,冬半年降水相态转换的关键是降雨和降雪临界点的判别,因此研究的重点将主要放在雨夹雪天气,特别是雨雪转换天气的研究方面。青岛2006—2015年雨夹雪日和雨雪转换日共39 d。由于每天探空的观测时次只有08时和20时两次,共得到雨夹雪时刻,或在雨雪相态转换的临近时刻观测样本55个。

通过前文分析得出,对于降水相态的变化最重要的还是各高度层上的气温状况。L波段探空雷达在垂直高度层上的分辨率非常高,能更好地反应出气温的垂直分布特征。考虑本文旨在得出对实际预报业务更有应用价值的判别标准,因此特选取了几个在实际预报业务中数值天气预报模式更易获得的高度层数据进行重点分析,包括850 hPa气温、925 hPa气温、1 000 hPa气温和地面气温(L波段探空资料的最低层气温)以及在相态转换过程中非常重要的0℃层高度。希望通过这几个特征层的分析,得出有益的结论。

将三种相态降水的探空资料做点聚图(图4)可以看出,在850 hPa层,降雪个例的气温都在0℃以下,降雨个例的气温都在-8℃以上,两者的重合区间约8℃,而雨夹雪个例的气温在-7~-1℃,与降雪的气温范围重合。也就是说,850 hPa层对三种相态的区分并不理想。在925 hPa层,降雪个例的

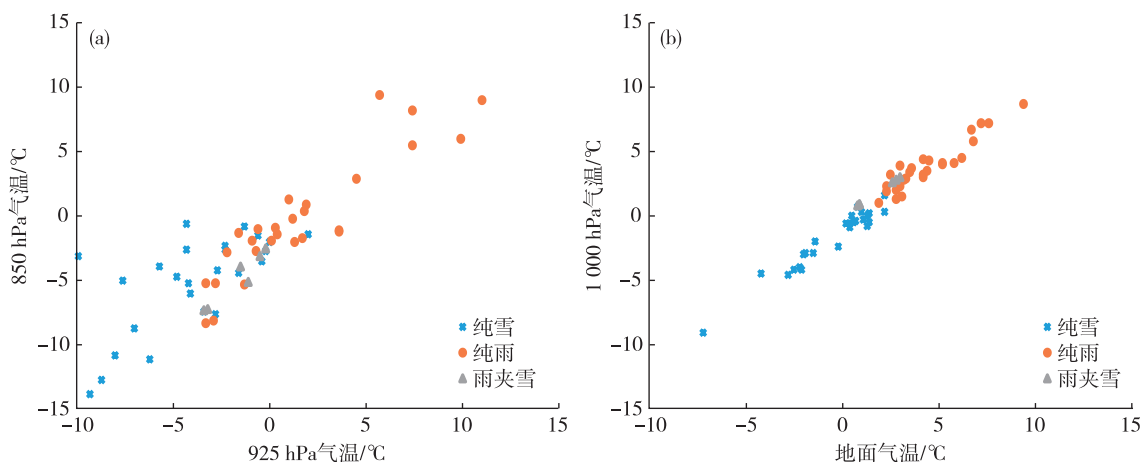


图4 三种相态在特征层高度点聚图(a.850 hPa和925 hPa,b.1 000 hPa和地面)

Fig.4 Scatter diagrams of three different precipitation types at different key levels of 850 hPa and 925 hPa (a), and 925 hPa and ground (b)



气温都在 0.5 °C 以下,降雨个例的气温都在-3.5 °C 以上,两者的重合区间约 4 °C,而雨夹雪个例的气温正好在-3.5~0 °C,还是存在一定的重合区间,但比 850 hPa 已经缩小近一半。在 1 000 hPa 层,降雨个例的气温都在 2 °C 以上,降雪个例气温都在 2.2 °C 以下,两者的重合区间已缩小至 0.2 °C 的范围。雨夹雪的气温分布在 0.8~3.0 °C 之间。在地面气温上,以 2 °C 为界,基本上很好地区分了降雪和降雨两种相态。雨夹雪个例则基本分布在 1~3 °C 的区间内。综合三层的分析可以看出,高度层越低,温度要素越能更好地区分三种降水相态。

降水相态的转换,多发生在高空 0 °C 层高度附近,因此 0 °C 层的高低,对于地面附近的降水相态有着直接的影响。由探空资料(图 5)分析可以看出,降雨的 0 °C 层高度,都在 250 m 以上,降雪 0 °C 层高度在 400 m 以下,而雨夹雪的 0 °C 层高度则位于 100~500 m 之间。0 °C 层太高,虽然高层以降雪为主,但下落到地面的过程中随着气温的升高会发生融化形成降雨。0 °C 层高度较低时,地面气温一般也相应较低。即使地面气温仍在降雨阈值内,由于 0 °C 高度太接近地面,下落过程中由雪到雨的相态转换也会来不及发生。冬半年 1 000 hPa 的高度约为 200 m,恰好位于 100~500 m 的关键高度层内,应对于降水相态有很好的指示意义。

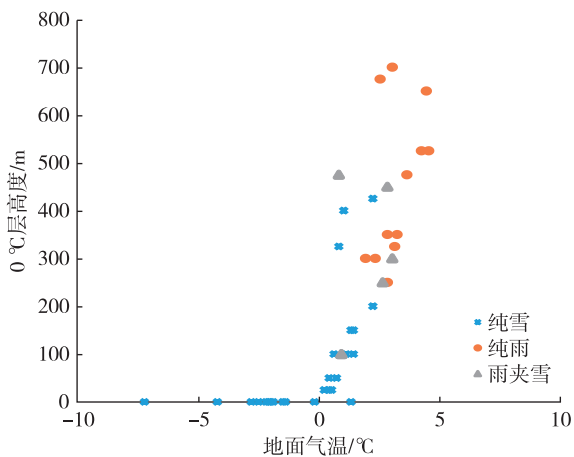


图 5 三种相态 0 °C 层高度和地面气温点聚图

Fig.5 Scatter diagram of freezing level and ground temperature for three precipitation types

由上面青岛冬半年降水相态有关的物理量统计分析可以看出,不同高度层的温度条件,可以很好地对不同的降水相态进行区分,判定指标也主要根据不同高度层的温度进行综合判定。通过绘制不同降水相态各层温度的箱线图<sup>[16]</sup>,可以去除一些

降水个例的异常值,选取概率区间为 90%(图 6)进行分析。在 850 hPa 高度层上,当气温高于-2.7 °C 时,以降雨为主;当气温低于-0.8 °C 时,以降雪和雨夹雪为主。-2.7~-0.8 °C 之间重合部分无法区分降雨和降雪,而雨夹雪的阈值完全位于降雪阈值内,因此无法区分降雪和雨夹雪。在 925 hPa 高度层上,0.5 °C 层可以较好地地区分降雨与降雪,作为雨雪的分界线。但是雨夹雪的阈值依然位于降雪的阈值内部,使得降雪和雨夹雪无法区分。在 1 000 hPa 层,降雨的气温都高于 3.1 °C,降雪的气温都低于 0 °C,而雨夹雪的气温分布主要位于 0.5~1.8 °C 之间,三种相态气温分布互不重合。在底层近地面层,降雨的气温位于 2.9 °C 以上,降雪的气温位于 1.4 °C 以下,雨夹雪的气温位于两者之间,与降雪的气温范围略有重合。与 1 000 hPa 都可以很好地区分三种降水相态。通过统计结果还发现,降雨时 1 000 hPa 的气温阈值出现了高于地面气温阈值的情况,这与冬半年降水天气发生时,近地面层常存在逆温层有关。由探空资料来看,很多个例都出现了逆温层。

由此得到适合于青岛的冬半年降水相态判别标准(表 1)。根据前文高低层气温指示性优劣的分析,若高低层判别出现冲突时应尽量按低层标准为主。将判别指标代入降水个例进行检验,准确率达到 86%,其中雨夹雪个例的判别准确率达到 90%,降雨和降雪的误判多为判断为雨夹雪的情况。此判别指标的确定只是基于近 10 a 探测资料统计而来,具体阈值也并不是完全严格,具体到每个个例会有上下浮动,但在实际预报业务中具有较好的参考性和实用性。

表 1 青岛冬半年降水相态判别指标

Table 1 Discrimination criterion on precipitation types during winter half year in Qingdao

| 降水相态 | 地面      | 1 000 hPa | 925 hPa | 850 hPa |
|------|---------|-----------|---------|---------|
| 降雨   | >2.9    | >3.1      | >-0.5   | >-0.8   |
| 降雪   | <1.4    | <0.0      | <-0.5   | <-2.7   |
| 雨夹雪  | 1.4~2.9 | 0.5~1.8   | 难以区分    | 难以区分    |

## 5 结论

利用青岛 L 波段雷达探空资料,对 2006—2015 年青 岛冬半年不同相态降水进行了个例分析及统计分析,主要结论如下:

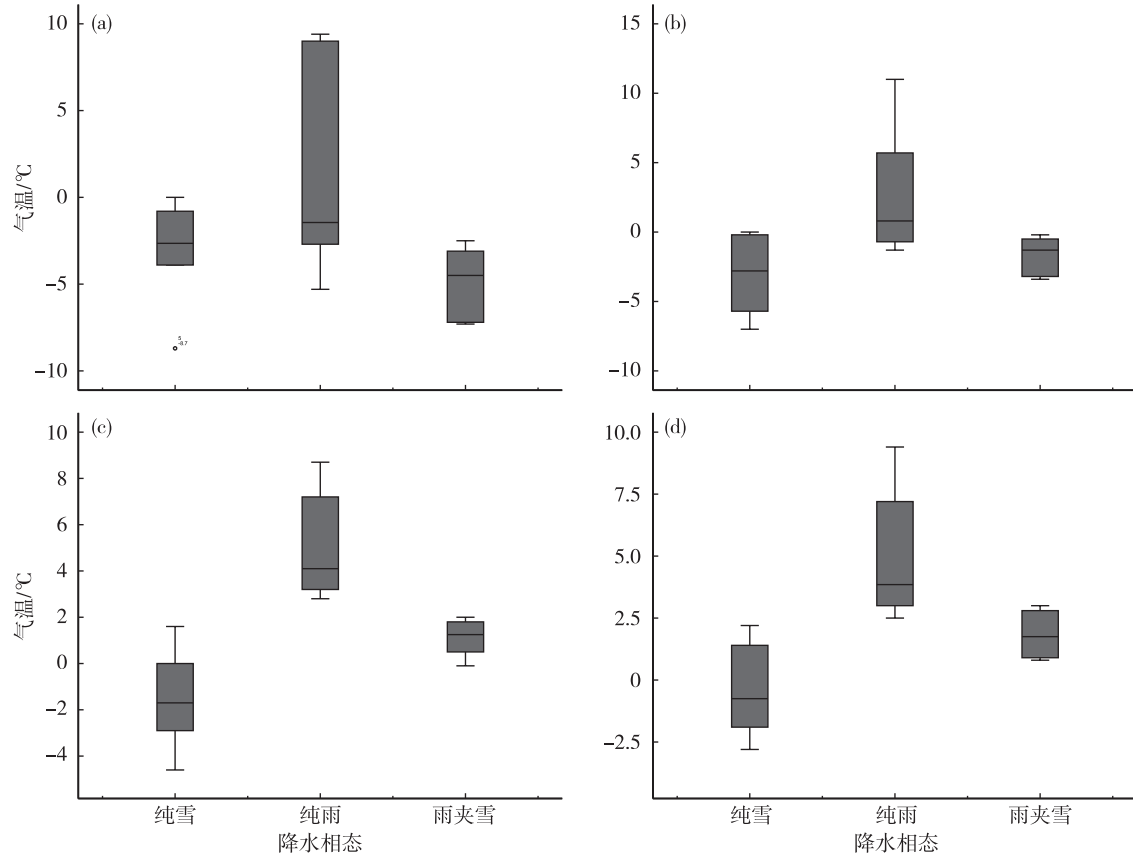


图6 三种相态特征层气温箱线图(a. 850 hPa, b. 925 hPa, c. 1 000 hPa, d. 地面)

Fig.6 Box-whisker plots of different precipitation types at different key levels(a. 850 hPa, b. 925 hPa, c. 1 000 hPa, d. ground)

1) 青岛冬半年月纯雨日数1月最少,月纯雪日数2月最多。12月—次年3月出现雨夹雪或雨雪转换的日数基本持平,其中1月和3月略高。12月和1月是雨夹雪或雨雪转换日数占当月降水日数比例最高的两个月。

2) 分析雨雪转换个例得出,雨雪转换过程多与冷空气入侵过程相联系。温度场和风场条件能较好地反映出雨雪转换的特征,其中温度场更为明显。降温和风向转换在850 hPa以下层更为明显。

3) 探空资料分析表明,850 hPa、925 hPa、1 000 hPa和地面气温对不同相态降水都有很好的指示意义,但越低层指示性越好。 $0^{\circ}\text{C}$ 层高度对不同相态降水同样具有很好的指示意义,当 $0^{\circ}\text{C}$ 层位于100~500 m高度时易发生雨雪转换天气。根据不同高度层气温为指标得出青岛冬半年降水相态具体的判别指标。

本文只讨论了使用气温作为预报因子对降水相态进行判别,从大气热力学角度讲,气温的变化与温度平流有直接的关系。除此之外,还与垂直运动、非绝热加热等因素有关。是否也会对降水的相

态产生影响,例如辐射导致的气温日变化因素,仍有待下一步工作继续研究。

#### 参考文献:

- [1] 孙继松,梁丰,陈敏,等.北京地区一次小雪天气过程造成路面交通严重受阻的成因分析[J].大气科学,2003,27(6):1057-1066.
- [2] 李登文,乔琪,魏涛.2008年初我国南方冻雨雪天气环流及垂直结构分析[J].高原气象,2009,28(5):1140-1148.
- [3] 杨贵名,孔期,毛冬艳,等.2008年初“低温雨雪冰冻”灾害天气的持续性原因分析[J].气象学报,2008,66(5):836-849.
- [4] 姚蓉,黎祖贤,戴泽军,等.2008年初持续雨雪灾害过程分析[J].气象科学,2009,29(6):838-843.
- [5] 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):87-94,132.
- [6] 许爱华,乔林,詹丰兴,等.2005年3月一次寒潮天气过程的诊断分析[J].气象,2006,32(3):49-55.
- [7] 张立,王晖,张志鹏.东营一次初冬寒潮天气的降水相态分析[J].山东气象,2010,30(3):15-18.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 纪忠萍,温晶,方一川,等.近 50 年广东冬半年降水的变化及连旱原因[J].热带气象学报,2009, 25(1):29-36.
- [11] 宋连春,高荣,李莹,等.1961—2012 年中国冬半年霾日数的变化特征及气候成因分析[J].气候变化研究进展,2013,9(5):313-318.
- [12] 付冬雪,孙照渤,李忠贤,等.1955—2006 冬半年中国极端低温的时空变化特征[J].气象科学,2011, 31(3):274-281.
- [13] 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.
- [14] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.天气学原理和方法[M].3版.北京:气象出版社,2000.
- [15] 周后福.局地温度变化中各项因子的定量估算[J].气象,2005,31(10):20-23.
- [16] 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.