

许美玲, 梁红丽, 金少华, 等. 2015. 昆明冬季降水相态识别判据研究. 气象, 41(4): 474-479.

昆明冬季降水相态识别判据研究^{*}

许美玲¹ 梁红丽¹ 金少华² 马志敏¹ 牛法宝¹ 闵颖¹

1 云南省气象台, 昆明 650034

2 云南省玉溪市气象台, 玉溪 653100

提 要: 利用昆明气象站 1952—2013 年冬季的降水及天气现象资料, 统计分析了昆明冬季降雪的气候特征。利用 1980—2013 年高空、地面资料, 选取 500 hPa 温度、700 hPa 温度、0℃ 层高度、500~700 hPa 之间的位势厚度、地面日最低温度和日平均温度 6 个物理量, 针对雨和雪的降水相态进行统计分析, 采用降雪 TS 评分最高的原则确定物理量的阈值。对每个单一判据给予不同的权重, 采用权重线性法定降雪的综合判据, 通过对 6 个物理量降雪判据进行不同的组合试验, 并考虑到综合判据的业务化, 最终选定 700 hPa 温度、500~700 hPa 之间的位势厚度、地面日最低温度 3 个单一判据组合为综合判据, 并用中尺度 WRF 模式对 2014 年的 13 次降水天气进行了降水相态判别检验, 结果表明综合判据可为昆明冬季降水相态客观预报提供较好的参考。

关键词: 降水相态, 综合判据, 预报方法

中图分类号: P457

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.04.010

Study on Identification Criterion for Precipitation Phase in Winter Kunming

XU Meiling¹ LIANG Hongli¹ JIN Shaohua² MA Zhimin¹ NIU Fabao¹ MIN Ying¹

1 Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034

2 Yuxi Meteorological Observatory of Yunnan, Yuxi 653100

Abstract: Based on precipitation and weather phenomena data from Kunming Station in winter from 1952 to 2013, the climatic characteristics of winter snowfall in Kunming are analyzed. In addition, using surface and upper air data, six physical quantities such as temperature at 500 and 700 hPa, 0℃ level height, geopotential thickness between 500 and 700 hPa, daily lowest and average temperature at surface are selected. The phase of precipitation and snow is analyzed, by using the principle of highest TS score to determine physical quantities' threshold range. Different weights are offered to each criterion, using weight linear method to set synthetic criterion of snowfall, through different combined experiments on snowfall criterion of six physical quantities, and considering the operational application of synthetic criterion. Finally, three single criteria are selected, that is, temperature at 700 hPa, geopotential thickness between 500 and 700 hPa and daily lowest temperature at surface, and combined into synthetic criterion. In addition the precipitation phases during 13 rainfall weather processes in 2014 are tested by using WRF model. The results show that synthetic criterion could provide valuable reference for objective forecast of precipitation phase in winter, Kunming.

Key words: precipitation phase, synthetic criterion, forecast method

* 国家自然科学基金项目(41365006)和中国气象局南方暴雨预报专家创新团队项目共同资助
2014 年 4 月 25 日收稿; 2015 年 2 月 2 日收修定稿
第一作者: 许美玲, 主要从事天气预报技术及方法研究. Email: xml43@163.com

引言

近年来我国气象工作者对冬季降水相态转变过程有较多的研究,并提出了一些识别判据。漆梁波等(2012)针对不同的降水相态,对它们对应的不同温度及不同厚度进行统计分析,最终得到一组中国东部地区冬季降水相态的识别判据;张琳娜等(2013)对近10年北京地区冬季降水相态进行了分析,研究与雨雪转换关系密切的6个物理量与不同降水相态的关系,得到了该6个物理量在三种相态的特征和北京冬季降水相态的客观指标;杨成芳等(2013)研究了山东冬半年降水相态与影响系统的关系及垂直变化特征,获得了不同降水相态的温度预报指标;许爱华等(2006)在分析一次寒潮过程中提出南方降水相态主要取决于925 hPa以下大气温度,降雪时以925 hPa气温 $\leq -2^{\circ}\text{C}$ 可作为固态降水(雪)的预报判据。王洪霞等(2013)对山西近几年的5次雨转雪过程进行研究,指出850 hPa温度 $\leq 4^{\circ}\text{C}$ 是山西北部和中南部海拔 $>1000\text{ m}$ 站点降水相态发生转变的临界值,925 hPa温度 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 是山西中南部海拔 $<1000\text{ m}$ 站点降水相态发生转变的临界值。廖晓农等(2013)分析了一次降雨转雨夹雪再转成降雪的气相变化过程,讨论了导致相态变化的机制。杜小玲等(2014)分析了2011年初贵州持续低温雨雪冰冻天气成因,指出强冻雨、冰粒及降雪天气的温度场、锋区结构、大气运动状况等存在差异,出现降雪天气时,锋面逆温高度较高、逆温梯度最小、逆温厚度薄,逆温区无暖层,云层伸展高度超过500 hPa。刘勇洪等(2014)利用1952—2011年北京历史冰雪灾情资料分析构建了冰雪灾害对北京城市交通运行的预警评估指标体系。孙艳辉等(2012)使用中尺度数值模式对辽宁省2007年3月3—5日的暴雪和大风天气过程进行了数值模拟分析。

上述研究也表明冬季降水相态的识别判据和地域的差异有关,不同地区判据、阈值的设定会有很大的不同。许多学者对冬季相态转变过程研究取得了一些进展(漆梁波,2012;杨晓亮等,2014;李峰等,2014)。对云南而言,除滇东北、滇西北高海拔地区外,大部分地区四季如春,极少出现降雪天气,昆明素以“春城”而享誉中外。由于防寒抗冻能力低,一旦出现降温降雪天气,给工农业生产造成的灾害较重。如1999年1月11日的大雪不仅给昆明世博园

造成较大损失,也给交通运输、电力通讯及人民的生命安全带来严重影响。2013年12月15—16日昆明迎来近10年来的罕见大雪,难得的降雪除让市民惊喜外,却给交通运输和出行造成极大困难,昆明机场出港航班全部取消,多条高速公路封闭。近年来云南的气象工作者对云南的降雪天气成因进行了一些分析,张腾飞等(2007)对云南4次强降雪过程的形成机制进行了研究,得到云南有、无南支槽配合影响的两种强降雪天气的共性和差异;郭荣芬等(2009)应用高空资料、卫星云图、加密自动站地面观测资料,结合新一代多普勒雷达探测资料,综合分析了2008年2月28日夜至29日凌晨发生在云南的“雷打雪”天气过程。索渺清等(2014)对2007年11月云南德钦高原暴雪产生的原因进行了研究,探讨了南支槽与孟加拉湾风暴结合对高原东南部强烈天气的影响过程。这些研究主要集中对云南降雪的影响系统、物理量诊断和卫星雷达回波特征进行分析。地处滇中的昆明站(海拔高度约1891 m)对冷空气的反应具有代表性,只要昆明站出现寒潮或降雪天气,滇中及以东大部地区都可出现寒潮或降雪天气,因此,云南省气象台业务规定昆明的寒潮或降雪天气,即为云南全省性寒潮天气(许美玲等,2011)。昆明的降雪,由于预报难度大,服务敏感性高,一直以来都是预报工作的难点,受到各级政府部门和公众的广泛关注;因此很有必要对昆明冬季的降水特征和相态进行分析研究。

1 资料及统计标准

采用昆明气象站1952—2013年冬季(11—12月、1—3月)逐日降水及天气现象(雨、雪、雨夹雪、米雪或冰粒)资料统计昆明降雪的气候特征,只要一天中有天气现象出现雪、米雪或雨夹雪,就将其定为降雪日,又将降雪日分为两类,一类为纯雪日,是指降雪日开始有降水发生时就直接降雪,期间无相态变化,另一类为雨雪转换日,是指降水日中有相态变化,降雪中可出现雨、雪、雨夹雪、米雪或冰粒等相态;仅有天气现象冰粒,统计为冰粒日;仅有降雨,则统计为降雨日。选取1980—2013年冬季逐日探空和地面实测资料分析降水相态判据。其中,探空资料包括08和20时两个时次的700、500 hPa 2个层次,地面资料包括日最低气温和日平均气温。

2 降雪的气候特征

通过统计 1952—2013 年(62 年)冬季昆明日降水资料(20—20 时,北京时,下同),共得到降水样本 1508 个,其中降雪样本 144 个、降雨样本 1362 个和 2 个冰粒样本。144 个降雪日有 15 d 为纯雪日,129 d 存在雨雪转换,说明昆明降雪时多以雨雪转换为主,144 个降雪日中有 48 d 出现积雪。图 1a 为 144 个降雪日的年际变化,平均每年昆明出现降雪 2.32 d。其中,出现最多的是 1982 年,达 8 d,有 14 年昆明没有出现降雪。昆明降雪天数在 20 世纪 90 年代中期以后呈下降趋势。从各月分布看(图 1b),昆明出现降雪天数最多是 1 和 12 月,分别为 48 和 40 d,月平均为 0.77 和 0.65 d,最少的是 11 月,月平

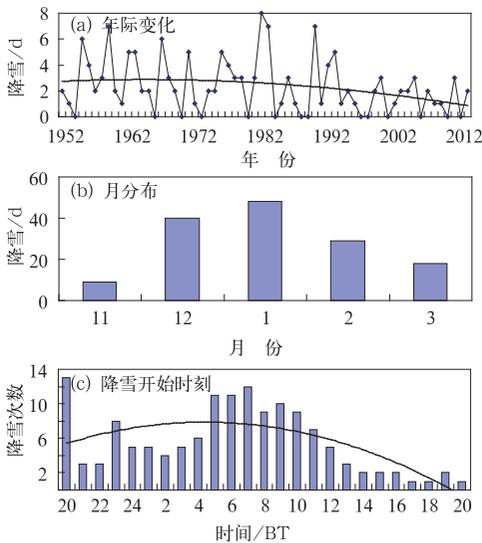


图 1 昆明降雪时间分布特征

Fig. 1 Temporal distribution of snowfall in Kunming

(a) annual variation, (b) monthly variation,
(c) onset of snowfall

均为 0.15 d。昆明冬季降雪最早出现在 11 月 9 日(1990 年),结束最晚为 3 月 27 日(1974 年)。统计一天中开始出现降雪的时刻(图 1c),20 和 07 时左右出现降雪的次数最多,降雪的开始时刻多在夜间到早上,在 20 时至次日 02 时的有 34 次,在 02—08 时的有 53 次,在 08—14 时的有 43 次,在 14—20 时的有 10 次,有 4 次无降雪时刻记录。

3 识别判据的统计特征

漆梁波等(2012)、张琳娜等(2013)、杨成芳等(2013)研究的站点海拔高度较低,对降水相态判别的温度阈值主要出现在 850 hPa 以下。由于昆明站的海拔高度较高,在日常业务中重点关注 500、700 hPa 的要素和地面温度,故选取降水相态判据因子:500 hPa 温度(T_{500})、700 hPa 温度(T_{700})、0°C 层高度(H_0)、500~700 hPa 厚度($H_{500-700}$)、地面日最低温度(T_{min})和地面日平均气温(T_d),1980—2013 年共有降雨日 678 d;降雪日 63 d,其中纯雪日 8 d,雨雪转换日 55 d。由于纯雪日的样本太少,故以下分析不区分纯雪和雨雪转换日,统一为降雪日。

3.1 高空气温与降水相态的统计特征

各层高空气温统计 08 和 20 时高空资料,选取气温最低的时次作为降水日各层的高空气温。图 2 为昆明降水相态对应的 T_{500} 、 T_{700} 的箱线图(杨贵名等,2005),由图 2a 可以看出,700 hPa 降雨、降雪的中位数(50%分位)分别为 2°C 和 -4°C,降雨的 10%分位在 -1°C 以上,降雪的 90%分位则在 0°C 以下,这也是云南预报员在业务中常使用 700 hPa 的 0°C 作为昆明雨雪分界的指标。但 $T_{700} \leq 0^\circ\text{C}$ 并不意味着昆明就会出现降雪,从图 2a 中看出,雨和雪的 10%~90%分位在 -1~0°C 有交叉,降雨两个例中有

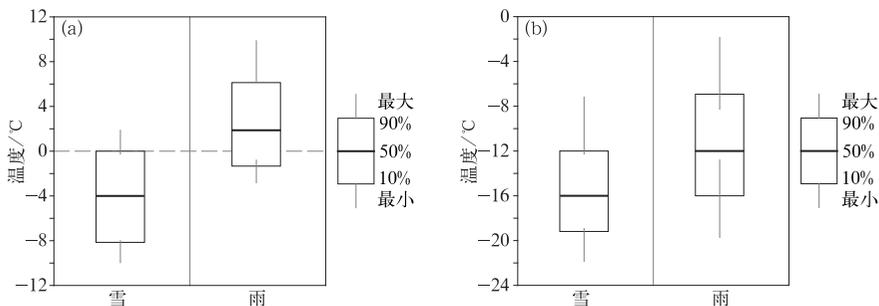


图 2 降水相态对应的(a)700 hPa 和(b)500 hPa 温度箱线图

Fig. 2 Box line diagram of (a) T_{700} and (b) T_{500} corresponding to precipitation phase

20% $T_{700} \leq 0^\circ\text{C}$,也就是说大约有137次降雨个例(超出了降雪总日数)的 $T_{700} \leq 0^\circ\text{C}$,这样用 $T_{700} \leq 0^\circ\text{C}$ 作为降雪的指标势必存在大量空报。通过分析发现只有当 $T_{700} \leq -2^\circ\text{C}$ 时,降雪的概率比较大,当 $T_{700} > 0^\circ\text{C}$ 时,出现降雨的概率比较大;当温度在 $-2 \sim 0^\circ\text{C}$ 之间时,用700 hPa温度判断是否降雪的难度较大。500 hPa雨、雪的中位数分别为 -16°C 和 -12°C (图2b),降雪天气出现时,通常 $T_{500} \leq -12^\circ\text{C}$,但雨和雪10%~90%分位的交叉较大,不利于判断降水相态,可剔除500 hPa温度作为判别的指标。

3.2 0°C层高度与降水相态的统计特征

杨成芳等(2013)分析了济南和青岛40次雨雪转换前后降雨和降雪的0°C层高度,得出由降雨向降雪转换的过程中,0°C层的高度明显降低,降雪时的0°C层高度多降至1000 hPa以下,而降雨的0°C层高度则高于925 hPa或在925 hPa上下。戴东新(2006)指出降水相态的变化需要关注0°C层高度。0°C层高度统计08和20时探空资料,选取高度最低的时次作为降水日的0°C层高度。图3是昆明降水相态对应的0°C层高度箱线图,可以看出,雨和雪的中位数分别为650和800 hPa,10%~90%分位几乎没有交叉,出现降雪时,90%的个例0°C层高度降至740 hPa以下,而降雨的0°C层高度大多高于740 hPa,所以,0°C层高度740 hPa可作为降雨和降雪的分界,当0°C层高度 ≤ 740 hPa,出现降雪的概率大,当0°C层高度 ≥ 740 hPa,降雨的概率大。

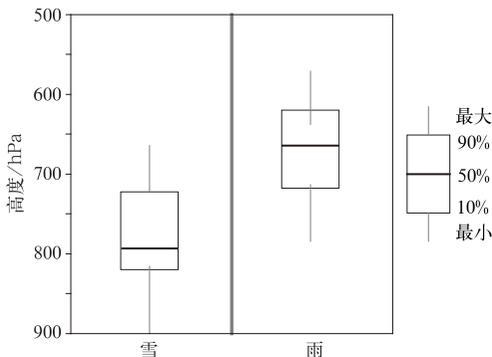


图3 降水相态对应的0°C层高度箱线图
Fig. 3 Box line diagram of 0°C level height corresponding to precipitation phase

3.3 位势厚度与降水相态的统计特征

关于雨雪的判别,除了气温阈值外,国内的一些气象工作者开始用气层位势厚度来表征大气的冷暖情况,漆梁波等(2012)通过分析我国冬半年降水相态厚度特征,提出雨和雪的区分判据 $H_{850 \sim 1000}$ (表示

850~1000 hPa之间的位势厚度,下同)的临界值约为129 dagpm, $H_{700 \sim 850}$ 的临界值约为154 dagpm。统计08和20时500~700 hPa位势厚度,选取差值最小的时次作 $H_{500 \sim 700}$ 厚度。图4为雨雪相态的位势厚度箱线图, $H_{500 \sim 700}$ 雨、雪的中位数分别为265和261 dagpm,降雪天气出现时,95%的降雪个例 $H_{500 \sim 700} \leq 264$ dagpm,但雨和雪10%~90%分位有较大交叉,故用单一的 $H_{500 \sim 700}$ 位势厚度来判断雨和雪的难度较大。

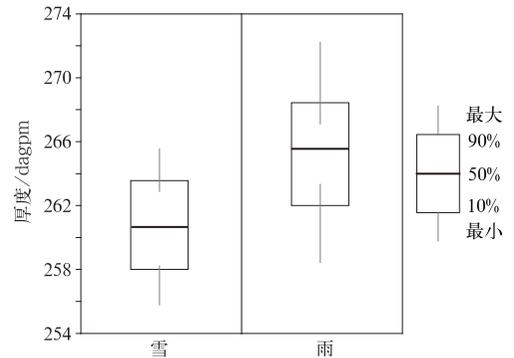


图4 降水相态对应的 $H_{500 \sim 700}$ 位势厚度箱线图

Fig. 4 Box line diagram of geopotential thickness between 500 and 700 hPa corresponding to precipitation phase

3.4 地面温度与降水相态的统计特征

图5为昆明降水相态对应的地面日最低气温和日平均气温的箱线图,由图5a可以看出,地面日最低气温降雨、降雪的中位数分别为6和0°C,降雨的10%分位在3°C以上,降雪的90%分位则在2°C以下,雨和雪的10%~90%分位没有交叉。故使用地面日最低气温2°C作为雨雪的简单分界是可行的;地面日平均气温雨、雪的中位数分别为10和3°C(图5b),降雨的10%分位在5°C以上,降雪的90%分位则在5°C以下,雨和雪10%~90%分位也无明显交叉。这表明地面温度作为指标判断降水相态具有一定的指示性。

4 降水相态判据设定

通过对以上高空气温、0°C层高度、位势厚度和地面温度的分析,选取1980—2013年的所有降水样本,采用降雪TS评分最高的原则确定每个物理量的阈值。以 T_{700} 为例,当 $T_{700} \leq -2^\circ\text{C}$,降雪TS评分

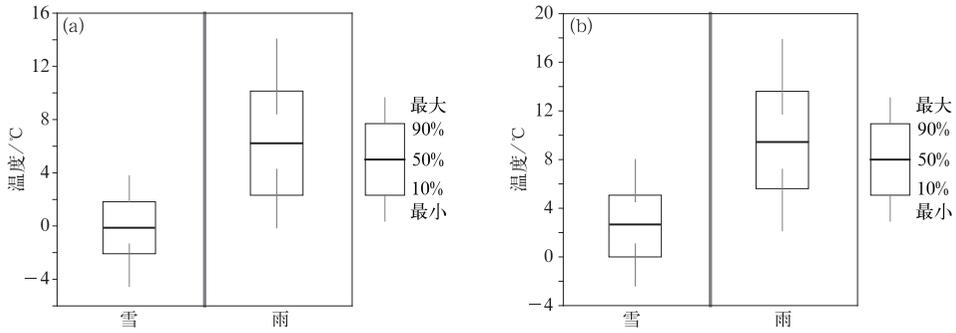


图 5 降水相态对应的(a)地面日最低气温和(b)日平均气温的箱线图

Fig. 5 Box line diagram of (a) surface daily lowest temperature, and (b) daily average temperature corresponding to precipitation phase

表 1 6 个物理量降雪判据及评分

Table 1 Snowfall criterion and score of six physical quantities

物理量	降雪判据	降雪 TS 评分/%	漏报率/%	空报率/%
500 hPa 温度	$x_1 \leq -17^\circ\text{C}$	24	36	40
700 hPa 温度	$x_2 \leq -2^\circ\text{C}$	55	34	11
500~700 hPa 位势厚度	$x_3 < 262 \text{ dagpm}$	35	22	43
地面日平均气温	$x_4 \leq 4^\circ\text{C}$	59	22	19
地面日最低气温	$x_5 < 2^\circ\text{C}$	60	9	30
0°C 层高度	$x_6 \leq 740 \text{ hPa}$	63	17	20

最高为 53%，临界阈值 -2°C 就作为 T_{700} 降水相态的判据，当 $T_{700} \leq -2^\circ\text{C}$ ，预报为雪，否则为雨；同理，得到了其他 5 个物理量的临界阈值(表 1)。

由表 1 可看到，0°C 层高度和地面温度降雪判据表现较好，对预报有一定的指导作用，但单一判据只是考虑了某层的要素，若能建立一种综合判据，或许能得到更为满意的结果，为此，我们对每个单一判据给予不同的权重，用权重线性法式(1)来设定降雪的综合判据：

$$y = \sum_{k=1}^p \omega_k y_k$$

式中， ω_k 为第 k 个判据的权重， y_k 为第 k 个判据的预报结果，权重应满足 $\sum_{k=1}^p \omega_k = 1$ ，用单一降雪判据的 TS 评分来确定权重系数。假如我们用表 1 中的 x_1 、 x_2 、 x_3 设定综合判据，则各单一判据的权重系数为： $\omega_1 = 0.24 / (0.24 + 0.55 + 0.35) = 0.21$ ； $\omega_2 = 0.55 / (0.24 + 0.55 + 0.35) = 0.48$ ； $\omega_3 = 0.35 / (0.24 + 0.55 + 0.35) = 0.31$ ；得到综合判据方程： $y = 0.21y_1 + 0.48y_2 + 0.31y_3$ ，规定单一判据判定为雪时相应的 y_1 、 y_2 、 y_3 取值为 1，否则为 0。按历史拟合率(TS 评分)最高为原则，可确定综合判据的临界值 YC ，当 $y \geq YC$ 时，预报降水相态为雪，否则为雨。按上述思路，对表 1 的 6 个物理量降雪判据进行不同的组合试验，最后得到 700 hPa 温度、500~700 hPa 位势厚度、地面日最低气温、0°C 层高度单一判据组合的综合判

据降雪的历史拟合率最高，TS 评分达到了 76%；其综合判据方程为： $y = 0.26y_1 + 0.16y_2 + 0.28y_3 + 0.30y_4$ ，临界值 $YC = 0.50$ 。考虑到目前大多数模式没有 0°C 层高度预报，因此，我们用日常业务中有的 700 hPa 温度、500~700 hPa 位势厚度、地面日最低气温 3 个单一判据来设定综合判据，其综合判据方程为： $y = 0.37y_1 + 0.23y_2 + 0.40y_3$ ，临界值 $YC = 0.45$ ，降雪 TS 评分为 67%，高于各单一判据。

云南省气象科学研究所 2008 年开展了中尺度 WRF 模式试验和研究，通过大量的对比试验，选取了适合云南本地的积云过程、微物理过程和辐射过程的方案组合，同时考虑模式底层高度与地面观测站高度的差异，进行了地面资料的地形订正(段旭等，2009)。WRF 模式预报业务系统于 2009 年投入业务试运行，经过一年的系统运行情况统计和预报效果检验，各项指标达到业务运行要求，2010 年正式投入业务运行至今，其模式预报产品向云南省各级气象台站发布，产品检验结果从 2009 年 5 月至今每季度在《云南气象》上刊登(王曼等，2010)，在此采用中尺度 WRF 模式输出的 24 h 预报产品，用 700 hPa 温度、500~700 hPa 位势厚度、地面日最低气温设定的综合判据对 2014 年 1—3 月昆明的降水相态进行预报检验，1—3 月昆明出现 13 次降水天气，其中出现了 3 次明显的降雪天气，降雨 10 次。表 2 给出了 13 次综合判据的检验结果，可以看出，综合判据对 13 次降水相态均作出了正确的判断，表

明设定的综合判据可为预报员提供较好预报依据。

表2 2014年1—3月降水相态预报检验
Table 2 The test results of precipitation phase from January to March forecast in 2014

日期 /月日	实况降 水相态	综合判据 方程 y 值	预报降 水相态	评定
0112	雨	0.23	雨	正确
0113	雪	0.63	雪	正确
0120	雪	1.00	雪	正确
0217	雨	0.00	雨	正确
0218	雨	0.40	雨	正确
0219	雪	0.63	雪	正确
0305	雨	0.00	雨	正确
0320	雨	0.00	雨	正确
0321	雨	0.00	雨	正确
0322	雨	0.00	雨	正确
0323	雨	0.00	雨	正确
0325	雨	0.00	雨	正确
0326	雨	0.00	雨	正确

5 结论

(1) 通过统计 1952—2013 年冬季昆明降水资料,得到昆明的降雪日仅占降水总样本的 9.5%,并且 89.6%的降雪日存在雨雪转换,说明昆明降雪时多以雨雪混合为主。昆明平均每年出现降雪 2.32 d,出现最多的月份是 1 和 12 月。一天中降雪首次出现时刻大多在夜间到上午这段时间。

(2) 对 1980—2013 年的昆明降水进行分析,得到了与雨雪转换关系密切的 5 种物理量:700 hPa 温度、0℃层高度、500~700hPa 厚度、地面日最低温度和地面日平均气温。研究不同物理量在雨和雪相态中的特征:对于 700 hPa 温度,当 $T_{700} \leq -2^\circ\text{C}$ 时,降雪的概率比较大,当 $T_{700} > 0^\circ\text{C}$ 时,降雨的概率比较大;对于 0℃层高度,雨和雪的分界点是 740 hPa;对于 500~700 hPa 厚度,95%的降雪个例 $H_{500\sim700} \leq 264 \text{ dagpm}$,但雨和雪 10%~90%分位有一定交叉;地面温度作为指标判断降水相态具有一定的指示性,地面日最低气温 2℃和日平均气温 4℃可作为雨雪的简单分界。

(3) 对每个单一判据给予不同的权重,用单一判据的 TS 评分来确定权重系数,采用权重线性法来设定降雪的综合判据:通过对 6 个物理量降雪判据进行不同的组合试验,最后得到 700 hPa 温度、500~700 hPa 位势厚度、地面日最低气温、0℃层高

度 4 个物理量组合的综合判据降雪的 TS 评分最高;考虑到综合判据的业务化,最终选定 700 hPa 温度、500~700 hPa 位势厚度、地面日最低气温 3 个物理量组合作为降雪的综合判据,并用中尺度 WRF 模式对 2014 年的 13 次降水天气过程进行了降水相态判别检验。

参考文献

- 段旭,许美玲,王曼,等. 2009. 云南省精细化天气预报技术研究与应用. 北京:气象出版社,10-50.
- 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.
- 戴东新. 2006. 雪暴. 上海:上海科学技术文献出版社,94-95.
- 郭荣芬,鲁亚斌,高安生,等. 2009. 低纬高原罕见“雷打雪”中尺度特征分析. 气象,35(2):49-56.
- 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.
- 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.
- 刘勇洪,扈海波,房小怡,等. 2014. 冰雪灾害对北京城市交通影响的预警评估方法. 应用气象学报,24(3):373-379.
- 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.
- 杨晓亮,王咏青,杨敏,等. 2014. 一次暴雨与特大暴雨雪并存的华北强降水过程分析. 气象,40(12):1446-1454. 漆梁波,张瑛. 2012. 中国东部地区冬季降水相态的识别判据研究. 气象,38(1):96-102.
- 索渺清,丁一汇. 2014. 南支槽与孟加拉湾风暴结合对一次高原暴雪过程的影响. 气象,40(9):1033-1047.
- 孙艳辉,李泽椿,寿绍文. 2012. 2007 年 3 月 3—5 日辽宁省暴雪和大风天气的中尺度分析. 气象学报,70(5):936-948.
- 王洪霞,苗爱梅,董春卿,等. 2013. 山西一次春季降水过程相态变化的成因分析. 高原气象,32(6):1787-1794.
- 王曼,刘建宇,符睿,等. 2010. 2010 年 1—3 月 WRF 模式预报产品检验. 云南气象,30(1):6-11.
- 许爱华,乔林,詹丰兴,等. 2006. 2005 年 3 月一次寒潮天气过程的诊断分析. 气象,32(3):49-55.
- 许美玲,段旭,杞明辉,等. 2011. 云南省天气预报员手册. 北京:气象出版社,179-190.
- 杨成芳,姜鹏,张少林,等. 2013. 山东冬半年降水相态的温度特征统计分析. 气象,39(3):355-361.
- 杨贵名,宗志平,马学款. 2005. “方框一端须图”及其应用示例. 气象,31(3):53-55.
- 张琳娜,郭锐,曾剑,等. 2013. 北京地区冬季降水相态的识别判据研究. 高原气象,32(6):1780-1786.
- 张腾飞,鲁亚斌,张杰,等. 2007. 2000 年以来云南 4 次强降雪过程的对比分析. 应用气象学报,18(1):64-72.