

史纬恒,王磊,韩飞,等. 基于物理量参数的山东聊城地区冬季降水相态预报模型研究[J]. 干旱气象, 2017, 35(5): 822-829, [SHI Weiheng, WANG Lei, HAN Fei, et al. Research on Winter Precipitation Type Forecast Model in Liaocheng of Shandong Province Based on Physical Parameters[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(5): 822-829], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-05-0822

## 基于物理量参数的山东聊城地区 冬季降水相态预报模型研究

史纬恒<sup>1,2</sup>, 王磊<sup>1</sup>, 韩飞<sup>1</sup>, 于文杰<sup>1</sup>, 孔凡龙<sup>1</sup>, 宋海清<sup>3</sup>

(1. 解放军71901部队59分队, 山东聊城 252000; 2. 解放军理工大学气象海洋学院, 江苏南京 211101; 3. 内蒙古自治区生态与农业气象中心, 内蒙古呼和浩特 010051)

**摘要:** 利用2011—2015年冬季山东聊城机场的逐日逐时常规地面观测资料和邢台站、章丘站的逐日常规高空探测资料, 计算了46个物理量参数。在物理量参数与降水相态相关系数的显著性检验基础上, 根据物理量参数在不同降水相态样本中值域分布特征, 采用盒状图和技巧评分的方法最终选定章丘站和邢台站具有预报意义的各6个物理量参数。通过分析不同类型物理量参数对不同降水相态的指示作用, 根据各物理量参数在不同降水相态样本中的阈值, 确定聊城地区冬季降水相态预报的判定指标。采用隶属函数转换法, 建立聊城地区冬季降水相态预报模型。经实况拟合检验, 准确率达85%以上, 效果较好。

**关键词:** 降水相态; 物理量参数; 预报模型; 聊城; 技巧评分

**文章编号:** 1006-7639(2017)05-0822-08 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-05-0822

**中图分类号:** P457.6

**文献标志码:** A

### 引言

冬季降水相态主要包括雨、雪、雨夹雪、冰粒、冻雨等, 由于其多变性, 一直受到广泛关注<sup>[1-2]</sup>。对于相同的降水量, 不同的降水相态产生的影响迥然不同<sup>[3]</sup>, 即使是很弱的降雪过程, 如果降水相态预报失败或漏报, 也会给城市运行、农业生产和日常生活带来严重的不利影响<sup>[4-5]</sup>。

降水相态的预测取决于包括热量和水分的分布、垂直运动、云和冰核的分布等在内的诸多大气条件<sup>[6]</sup>。我国气象工作者对许多冬季降水相态个例进行了研究, 总结出一些依赖特定层温度的指标判据<sup>[7-10]</sup>。曹钢锋等<sup>[11]</sup>利用山东1971—1979年的资料统计, 将850 hPa温度作为判断济南降水相态的基本依据。孙莎莎等<sup>[12]</sup>提出济南地区降雪的温度判据为850 hPa温度小于等于-1℃、925 hPa温度小于等于0℃、1000 hPa温度小于等于1℃及地面温度小于等于1℃。近几年国内学者开始关注位势厚度的研究。如漆梁波等<sup>[1]</sup>建立了中国东部地区冬半年降水相态温度和位势厚度的综合识别指标;

孙燕等<sup>[13]</sup>对江苏冬季降水相态进行研究, 提出位势厚度结合地面温度和850 hPa温度可较准确地判定降水相态。国外对于降水相态的预报, 除了传统的特殊层温度阈值外<sup>[14]</sup>, 更侧重于使用表征大气冷暖情况的位势厚度作为降水相态的判据, 通常使用850~700 hPa厚度和1000~850 hPa厚度分别表示中层和低层的冷暖<sup>[15-18]</sup>。

上述研究工作说明可以利用物理量参数对冬季降水相态进行预报, 但是由于地域、气候的差异和研究重点的不同, 物理量参数与冬季降水相态之间的相关性也不尽相同。同时, 目前绝大多数的研究都是基于再分析资料或本地探空资料, 对无探空资料地区的实际预报工作指导意义有限。因此考察分析基于上下游探空站资料的物理量参数与本地不同降水相态之间的相关性显得十分必要。本文分析了基于上下游探空站资料计算的物理量参数对聊城地区冬季降水相态预报的指示作用, 建立了聊城地区冬季降水相态预报模型, 以为聊城地区冬季降水相态的预报提供参考依据。

收稿日期: 2017-03-14; 改回日期: 2017-04-20

作者简介: 史纬恒(1991—), 男, 硕士, 助理, 主要从事气象信息处理和天气预报方法研究。E-mail: tfoterye@gmail.com。

# 1 数据及方法

资料的时间跨度为 2011—2015 年的冬季(冬季指某一年的 12 月至次年 2 月,下同),具体资料为聊城机场的逐日逐时常规地面观测资料和距离聊城最近的上下游探空站:邢台站(距离聊城机场 143 km)和章丘站(距离聊城机场 160 km)(图 1)的逐日常规高空探测资料(08:00 和 20:00,北京时,下同),以此为基础分别计算 2 个探空站各 46 个物理量参数。

将降水形态共分为 4 种:雨(包括毛毛雨、阵雨

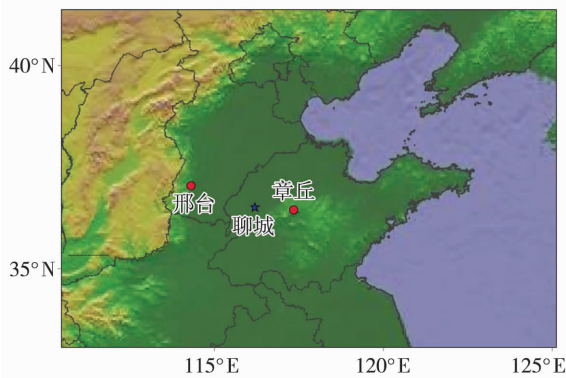


图 1 所选探空站与聊城机场站的地理位置分布

Fig.1 Spatial distribution of Liaocheng airport meteorological observation station and the selected aerological observation stations

等)、雪(包括雪、米雪、雪丸、孤立的星状雪晶等)、雨夹雪(包括毛毛雨夹雪、阵性雨夹雪等)和冻雨或冰粒。由于 2011—2015 年冬季未发生冻雨或冰粒,因此文中此项不作统计。将降雪(雨、雨夹雪)天气样本定义为:若聊城测站当日 09:00—20:00 或当日 21:00 至次日 08:00 内出现至少一次降雪(雨、雨夹雪)记录,则将当日 08:00 或 20:00 记为一个降雪(雨、雨夹雪)样本。鉴于雪或雨夹雪造成的影响较雨要大,规定若在规定时段内出现雪和其他降水相态之间的变化则记为降雪样本,出现雨夹雪和雨之间的变化则记为降雨夹雪样本。剔除错误及缺测资料后,共得到 165 个降雪(雨、雨夹雪)样本,其中降雪样本 62 个,降雨样本 93 个,降雨夹雪样本 10 个。

# 2 物理量参数相关性分析

为了找到对聊城地区冬季降水相态有指示意义的物理量参数,对 46 个物理量参数逐一进行计算、挑选及分析。

对样本进行处理,令降雨天气样本的  $Y = 1$ ,降雪天气样本的  $Y = -1$ ,降雨夹雪天气样本的  $Y = 0$ ,  $X_i (i = 1, 2, \dots, 46)$  为各物理量参数的值。对两个探空站的  $X_i$  和  $Y$  之间的相关系数逐一进行分析,并进行显著性检验,最后得到各 12 个通过  $\alpha < 0.01$  水平双侧检验,且相关系数不低于 0.6 的物理量参数,结果如表 1 所示。

表 1 通过检验的物理量参数与降水相态的相关系数

Tab.1 The correlation coefficients passing the significance test between different precipitation types and physical parameters

	物理量参数	章丘	邢台
厚度参数	1 000 ~ 850 hPa 厚度 ( $H_{1\,000-850}$ )	0.749 6	0.721 3
	1 000 ~ 700 hPa 厚度 ( $H_{1\,000-700}$ )	0.721 1	0.741 1
	1000 ~ 500 hPa 厚度 ( $H_{1\,000-500}$ )	0.656 9	0.683 0
	850 ~ 700 hPa 厚度 ( $H_{850-700}$ )	0.642 6	0.686 3
温度参数	地面至 850 hPa 平均温度 ( $T_{surf-850}$ )	0.748 5	0.724 6
	地面至 700 hPa 平均温度 ( $T_{surf-700}$ )	0.747 8	0.742 3
	地面温度 ( $T_{surf}$ )	0.721 4	0.681 6
	1 000 hPa 温度 ( $T_{1\,000}$ )	0.730 3	0.687 2
	925 hPa 温度 ( $T_{925}$ )	0.751 0	0.702 5
	850 hPa 温度 ( $T_{850}$ )	0.697 5	0.716 5
水汽参数	地面露点 ( $T_{d-surf}$ )	0.628 0	0.606 2
	地面比湿 ( $Q_{surf}$ )	0.613 8	0.607 6

可以看到,在两个探空站中, $H_{1\,000-850}$ 、 $H_{1\,000-700}$ 、 $T_{\text{surf}-850}$ 、 $T_{\text{surf}-700}$ 、 $T_{925}$ 与降水相态的相关系数均达到0.7以上,对降水相态有较好的指示意义,其中 $T_{925}$ 与 $T_{\text{surf}-700}$ 的相关系数分别在两个探空站中最高。

### 3 物理量参数的选择

理想情况下,如果物理量参数对降水相态有指示意义,其不同降水相态下应该是完全不同的,也就是在降雪样本、降雨样本与降雨夹雪样本中的数值分布没有任何交集。但是实际中出现这种理想情况的概率微乎其微,因此只能认为在3种样本之间交集相对较小的物理量参数对不同降水相态具有较好的指示意义。

盒状图可以直观反映各降水相态下物理量参数的分布情况。假定各物理量参数的样本呈正态分布,盒状图上、下边界和中线分别代表占样本总数25%、50%、75%个例的值,上下边界分别由虚线延伸到最大值和最小值,“+”代表异常值。在直观表示不同降水相态各个物理量参数样本差别的同时,还可以判断数据集的数据离散程度和偏向。图2和图3分别是章丘与邢台测站各个物理量参数不同降水相态样本的盒状图。但是仅凭观察盒状图进行选择过于主观,因此采用技巧评分的方式客观比较各物理量参数的指示意义。

目前的技巧评分规则如探测概率 POD (probability of detection)、空报率 FAR (false alarm rate)、临界成功指数 CSI (critical success index)、真实技巧评分 TSS (true skill statistic) 和 Heidke 技巧评分 HSS (Heidke skill score) 等各有其特点,如过分追求衡量预报准确率的 POD 增大,必然导致 FAR 的增大<sup>[19]</sup>; CSI 虽然能很好地衡量预报效果,但对于小概率事件不如 TSS 和 HSS 更为客观。下面对这几种评分规则均进行计算,计算方法见表2。

表2中, $a$ 为实际发生且预报发生的频数, $b$ 为实际发生而预报未发生的频数, $c$ 为实际未发生而预报发生的频数, $d$ 为实际和预报均未发生的频数。利用较为客观的 TSS 评分来对各物理量参数进行评分,选取使 TSS 评分达到最大的阈值,并计算相应阈值下的其他技巧评分。对章丘和邢台的各12个物理量参数依次评分见表3和表4。

选取物理量参数的原则是  $TSS > 0.400$  且  $POD \geq 0.5$ ,不符合筛选条件的参数已在表3和表4中用灰色标出。

#### 3.1 厚度指数

最终到达地面的降水相态,在很大程度上取决于高空温度垂直结构的发展演变情况。冬季,当高空温度在冰点以上的暖层足够厚时,空中的固态降水物就会充分的融化成为液态降水,最终到达地

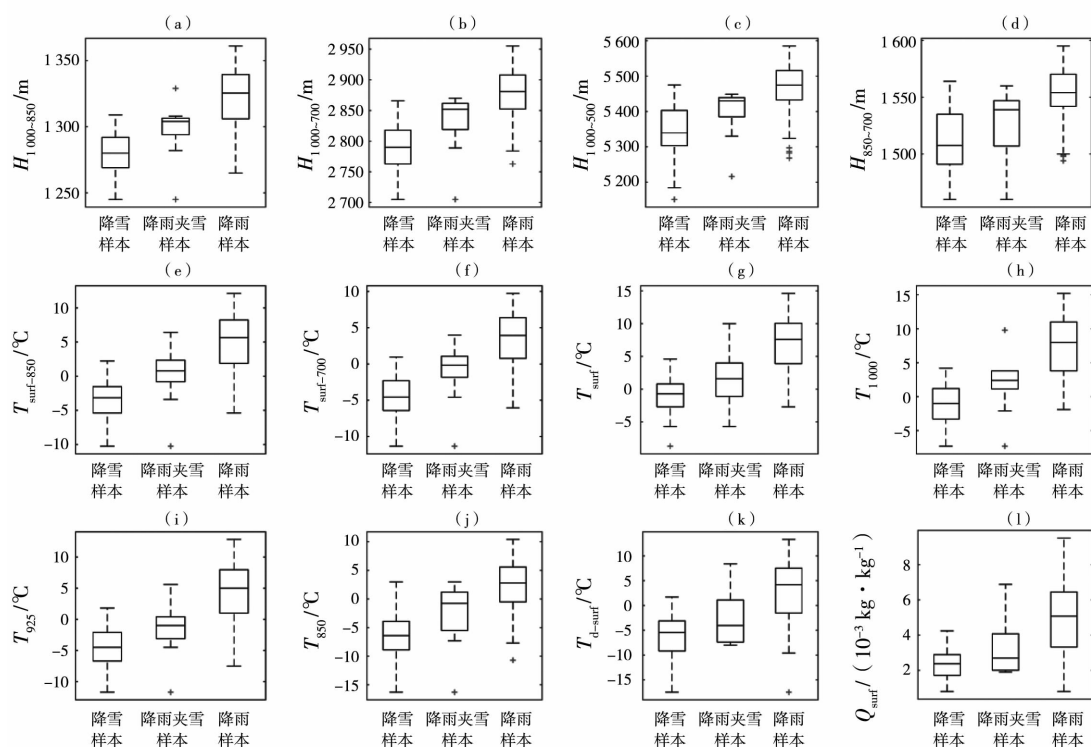


图2 2011—2015年章丘各物理量参数的盒状图

Fig. 2 Box plots of physical parameters at Zhangqiu station during 2011 - 2015

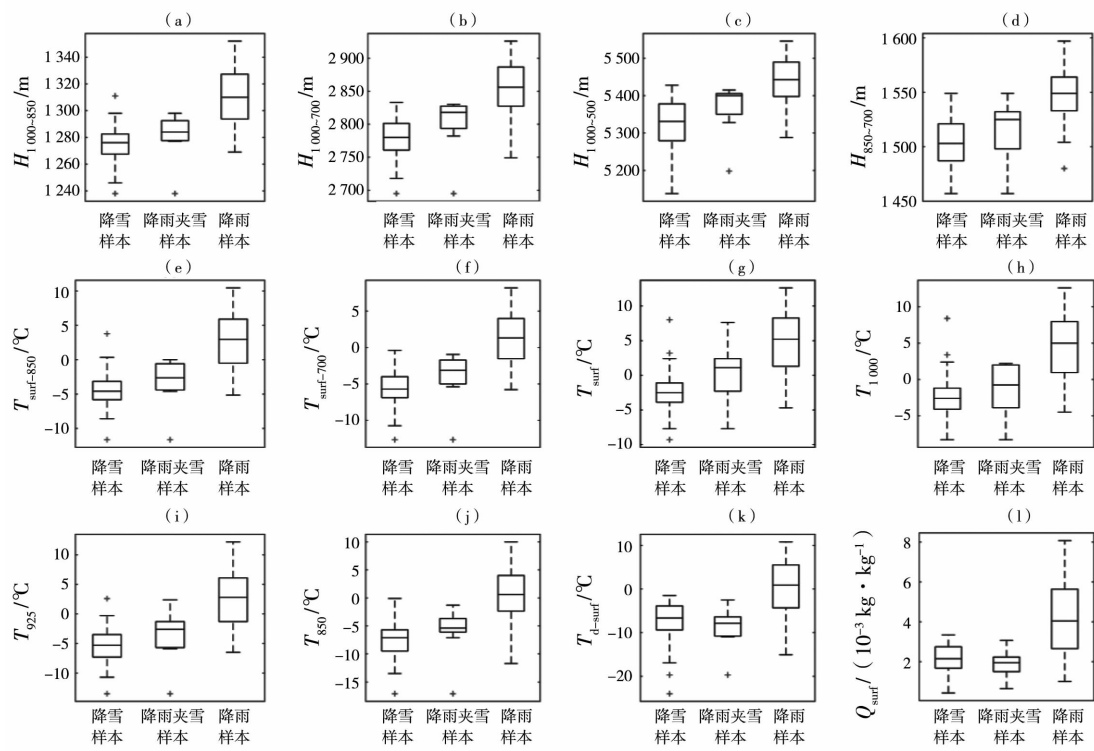


图 3 2011—2015 年邢台各物理量参数的盒状图

Fig. 3 Box plots of physical parameters at Xingtai station during 2011 – 2015

表 2 预报技巧评分及其计算公式

Tab. 2 The formulas of the prediction skill scores

技巧评分	计算公式
探测概率(POD)	$a/(a+b)$
空报率(FAR)	$c/(c+a)$
临界成功指数(CSI)	$a/(a+b+c)$
真实技巧评分(TSS)	$a/(a+b) - c/(c+d)$
Heidke 技巧评分(HSS)	$2(ad-bc)/[(a+b)(b+d) + (a+c)(c+d)]$

表 3 章丘各物理量参数的技巧评分

Tab. 3 Comparison of skill scores for physical parameters at Zhangqiu station

物理量	雪-雨夹雪 雪阈值	雨夹雪- 雨阈值	雨夹雪-雨/雪		雪-雨夹雪/雨		雨-雪/雨夹雪		
			TSS	POD	TSS	POD	TSS	POD	
厚度									
参数	$H_{1\,000-850}$	1 296.1	1 310.9	0.486 7	0.700 0	0.682 7	0.675 7	0.701 8	0.715 9
	$H_{1\,000-700}$	2 826.1	2 870.9	0.537 8	0.800 0	0.682 7	0.675 7	0.613 6	0.613 6
	$H_{1\,000-500}$	5 401.1	5 449.9	0.557 8	0.800 0	0.587 3	0.741 9	0.608 2	0.636 4
	$H_{850-700}$	1 530.1	1 548.9	0.267 7	0.500 0	0.583 5	0.709 7	0.597 2	0.666 7
温度									
参数	$T_{surf-850}$	-0.2	2.9	0.426 7	0.600 0	0.697 5	0.790 3	0.645 0	0.659 1
	$T_{surf-700}$	-1.7	1.5	0.466 7	0.700 0	0.703 4	0.806 5	0.6905	0.704 5
	$T_{surf}$	-1.7	5.2	0.341 9	0.800 0	0.319 3	0.338 7	0.652 8	0.666 7
	$T_{1\,000}$	2.1	4.2	0.486 7	0.600 0	0.703 4	0.806 5	0.699 1	0.727 2
	$T_{925}$	-2.1	0.6	0.338 7	0.500 0	0.677 1	0.774 2	0.729 4	0.785 0
	$T_{850}$	-2.9	1.6	0.387 1	0.600 0	0.657 5	0.822 6	0.549 7	0.591 4
水汽									
参数	$T_{d-surf}$	-0.3	1.9	0.216 1	0.300 0	0.599 0	0.919 4	0.609 8	0.623 6
	$Q_{surf}$	3.7	4.3	0.216 1	0.300 0	0.599 0	0.919 4	0.609 8	0.623 6

注:灰色表示不符合筛选条件的参数,表4同

表 4 邢台各物理量参数的技巧评分

Tab. 4 Comparison of skill scores for physical parameters at Xingtai station

物理量		雪-雨夹	雨夹雪-	雨夹雪-雨/雪		雪-雨夹雪/雨		雨-雪/雨夹雪	
		雪阈值	雨阈值	TSS	POD	TSS	POD	TSS	POD
厚度 参数	$H_{1\,000-850}$	1 276.1	1 298.9	0.489 8	0.800 0	0.495 6	0.524 6	0.657 6	0.672 1
	$H_{1\,000-700}$	2 803.1	2 831.9	0.536 9	0.700 0	0.685 4	0.786 9	0.674 0	0.688 5
	$H_{1\,000-500}$	5 396.1	5 421.9	0.518 4	0.600 0	0.591 6	0.852 5	0.626 8	0.655 7
温度 参数	$H_{850-700}$	1 524.1	1 536.9	0.364 5	0.500 0	0.615 6	0.790 3	0.651 0	0.720 4
	$T_{\text{surf}-850}$	-4.7	0.2	0.470 0	0.800 0	0.454 3	0.483 3	0.626 3	0.655 7
	$T_{\text{surf}-700}$	-5.4	-0.9	0.503 1	0.900 0	0.521 0	0.550 0	0.657 4	0.672 1
	$T_{\text{surf}}$	0.1	2.6	0.251 6	0.400 0	0.686 5	0.871 0	0.600 4	0.655 9
	$T_{1\,000}$	0.8	2.4	0.400 8	0.500 0	0.591 3	0.866 7	0.595 2	0.639 3
	$T_{925}$	-3.9	-0.1	0.333 8	0.600 0	0.607 8	0.705 0	0.638 5	0.666 7
	$T_{850}$	-6.2	-3.3	0.406 5	0.600 0	0.603 0	0.661 3	0.709 2	0.806 5
	$T_{\text{d-surf}}$	-7.2	-2.3	0.209 7	0.500 0	0.289 7	0.483 9	0.600 4	0.655 9
水汽 参数	$Q_{\text{surf}}$	2.1	3.1	0.222 6	0.500 0	0.280 0	0.483 9	0.611 1	0.666 7

面的降水相态类型以降雨为主;反之,则以降雪为主<sup>[20]</sup>。同时降水粒子在对流层下降过程中经过较冷的中层距离越长,经过较暖的低层距离越短,降水相态越会趋向于雪<sup>[12]</sup>。也就是说,温度的垂直结构很大程度上决定了降水的相态变化。

按照静力学原理,两层等压面之间的厚度与这两层之间的平均温度(或平均虚温)成正比,厚度越大,热区就更暖,即厚度能够体现对流层中热区通过的层次<sup>[13]</sup>。其关系式如下:

$$z_1 - z_2 = \frac{R}{g} \bar{T} \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (1)$$

式中: $\bar{T}$ 为两层之间的平均温度, $z_1 > z_2$ , $p_2 > p_1$ 。由于在鲁西北平原地区大气垂直运动很弱<sup>[21]</sup>,因此通过比较不同等压面之间的厚度可以提供不同降水相态之间有价值的信息<sup>[22]</sup>。

综合图 2 和图 3、表 3 和表 4 可以看出,在两个探空站,除  $H_{850-700}$  外,不同降水相态之间的厚度参数区分均较为明显。其中, $H_{1\,000-500}$  和  $H_{1\,000-700}$  对降水相态有明显的指示意义, $H_{1\,000-850}$  相对不太明显。其原因主要在于浅层空气湿度较大时,气温要保持较低才能保证进入该层的雪花不会完全融化,导致在中层大气雨夹雪和雨的冷暖状态接近,而在低层大气雨夹雪和雪的冷暖状态接近。因此在统计上,雨夹雪的  $H_{850-700}$  更接近雨的分布, $H_{1\,000-850}$  则更接近雪的分布<sup>[1]</sup>,削弱了这两项的指示意义。

### 3.2 温度参数

降水相态的主要影响要素为温度,但不同降水相态之间的转变不仅与近地面温度有关,还与整层

大气的温度分布有直接的关系<sup>[23]</sup>。由于云中水凝物相态分布与温度密切相关<sup>[24]</sup>,而且降水粒子主要分布在 700 hPa 以下<sup>[12]</sup>,对流层中下层温度是决定降水相态的必要条件之一<sup>[25]</sup>,因此大气层结中低层大气温度对界定降水相态有重要影响<sup>[26-27]</sup>。单独某层的气温并不能准确地代表某高度空间的整体冷暖情况,还需要考虑雪片下落到地面所经过的整层大气的平均温度对最终降水相态的影响,因而在固定等压面温度以外还选取了不同规定等压面的温度进行了平均<sup>[28]</sup>,即  $T_{\text{surf}-850}$  与  $T_{\text{surf}-700}$  参数。

从图 2 和图 3 可以看出,不同降水相态之间的温度参数区分比较明显,章丘站的整体区分效果要好于邢台站。在两个探空站, $T_{\text{surf}-700}$  与  $T_{1\,000}$  对降水相态均有较明显的指示意义,章丘站的  $T_{\text{surf}-850}$  与邢台站的  $T_{850}$  也有一定的指示意义,而  $T_{925}$  与  $T_{\text{surf}}$  的指示性不是很强。产生这种现象的原因一方面是由于当固态粒子降落到低层时,易发生蒸发冷却,降低气层温度,使得固态粒子不易转化为液态,有可能造成 850 hPa 温度较高时,降落到地面的仍可能是固态<sup>[13]</sup>;另一方面由于中层(700 hPa)下雨夹雪时的气温特征与降雨时的更接近,而在低层(925 和 1 000 hPa)雨夹雪的气温特征却与降雪时的更接近<sup>[1]</sup>,导致这几个等压面温度的指示意义被削弱。

### 3.3 水汽参数

从图 2 和图 3 可以看出,不同降水相态之间水汽参数的重叠部分较大,区分效果较差。不同降水相态的温度露点差等水汽参数在各层的差异均较小<sup>[29]</sup>。从表 1、表 3 和表 4 也可以看出,无论从相关

系数还是技巧评分上看,水汽参数对不同降水相态的指示意义都不是很强。主要原因是水汽充足是产生降水的前提条件,降水发生时各层水汽,特别是低层水汽十分充足,造成水汽参数的指示意义并不是很显著。

综上所述,最终选取章丘站点的6个物理量参数(1 000 ~ 850 hPa 厚度、1 000 ~ 700 hPa 厚度、1 000 ~ 500 hPa 厚度、地面至 850 hPa 平均温度、地面至 700 hPa 平均温度、1 000 hPa 温度)和邢台站点的6个物理量参数(1 000 ~ 850 hPa 厚度、1 000 ~ 700 hPa 厚度、1 000 ~ 500 hPa 厚度、地面至 700 hPa 平均温度、1 000 hPa 温度、850 hPa 温度)用于建立冬季降水相态预报模型。

#### 4 建立冬季降水相态模型

选取确定好的物理量参数,建立各参数的隶属函数。隶属函数动态范围取 $[-1, 1]$ , 1、0 和 -1 分别表示降水相态为雨、雨夹雪和雪,数值越大(小)表示降雨(雪)发生的可能性就越大。根据隶属函数动态范围的定义,将物理量参数值大于等于雨-雨夹雪阈值的取为 1,小于等于雪-雨夹雪阈值的取为 -1,在二者之间的取为 0。由此得到每个物理量参数对应降水相态的可能性。最后采取加权平均法,得到一个与降水相态可能性大小相对应的足够量,作为预报降水相态的指数  $S$ 。

$$S = \frac{\sum w_i b_i(x)}{\sum w_i} \quad (2)$$

其中: $b_i(x)$ 为物理量参数的隶属函数; $w_i$ 为权重。在本模型中,权重按照物理量参数对应的 TSS 评分均值进行赋值,即物理量参数的指示意义越强,权重越大。

### 5 降水相态的预报检验

#### 5.1 2011—2015 年样本拟合率分析

图 4 为 2011—2015 年冬季不同降水相态样本的指数  $S$  分布。可以看出,不同降水相态样本之间  $S$  值分布交集较小,比单个物理量参数的区分效果有显著提高,可以认为该模型得到的指数  $S$  对不同的降水相态具有一定的指示意义。

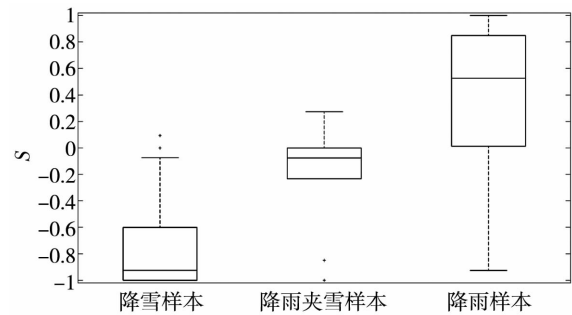


图 4 2011—2015 年冬季不同降水相态样本的指数  $S$  分布

Fig. 4 Box plots of the index  $S$  with different precipitation type samples in winter of 2011 - 2015

表 5 是预报模型对 2011—2015 年冬季样本的拟合结果,可以看出模型对雨夹雪这一中间态降水区分还是很难,原因是形成雨夹雪的条件较为复杂,实际大气中温度层结变化万千,其一点变化就可能导致最终相态的变化。而实际天气中雨夹雪也确实常和雨或雪相伴出现,单独出现的情况极少<sup>[30]</sup>。另外雨夹雪样本数明显偏少也会导致其比例失衡。

#### 5.2 2016 年预报试验评估

使用该模型对 2016 年冬季降水相态进行预报试验评估,共 11 个样本,其中降雪样本 7 个,降雨样本 3 个,降雨夹雪样本 1 个。从表 6 可以看出,各降

表 5 预报模型对 2011—2015 年冬季样本的拟合情况

Tab. 5 The fitting test of different precipitation type samples based on the forecast model in winter of 2011 - 2015

雪 - 雨夹雪 S 阈值	雨夹雪 - 雨 S 阈值	雨夹雪 - 雨/雪			雪 - 雨夹雪/雨			雨 - 雪/雨夹雪		
		TSS	POD	FAR	TSS	POD	FAR	TSS	POD	FAR
-0.250 0	-0.000 1	0.590 3	0.700 0	0.708 3	0.712 5	0.838 7	0.200 0	0.767 9	0.795 7	0.026 3

表 6 预报模型对 2016 年冬季降水相态的预报情况

Tab. 6 The evaluation of different precipitation type forecasted by the forecast model in winter of 2016

雪 - 雨夹雪 S 阈值	雨夹雪 - 雨 S 阈值	雨夹雪 - 雨/雪			雪 - 雨夹雪/雨			雨 - 雪/雨夹雪		
		TSS	POD	FAR	TSS	POD	FAR	TSS	POD	FAR
-0.250 0	-0.000 1	1.000 0	1.000 0	0.000 0	0.857 1	0.857 1	0.000 0	0.857 0	1.000 0	0.250 0

水相态的预报准确率均在 85% 以上。事实上仅有 1 个降雪样本被误报成降雨,其余全部准确。由于样本较少,特别是雨夹雪样本较少,因此结果并不具有普遍性,模型的优劣还需要更多的样本来验证。

## 6 结论和讨论

通过计算章丘站和邢台站各 46 个物理量参数与聊城地区冬季不同降水相态的相关系数,并进行显著性检验,得到两个站各 12 个通过  $\alpha < 0.01$  水平双侧检验,且相关系数  $> 0.6$  的物理量参数:1 000 ~ 850 hPa 厚度、1 000 ~ 700 hPa 厚度、1 000 ~ 500 hPa 厚度、850 ~ 700 hPa 厚度、地面至 850 hPa 平均温度、地面至 700 hPa 平均温度、地面温度、1 000 hPa 温度、925 hPa 温度、850 hPa 温度、地面露点、地面比湿。

厚度参数较温度参数和水汽参数对冬季不同降水相态具有更显著的指示意义。两个站点相同物理量参数的指示意义效果基本相同。

通过分析章丘站和邢台站各 12 个物理量参数在冬季不同降水相态中的值域分布特征,最终选取章丘站和邢台站各 6 个物理量参数。利用盒状图和技巧评分的方法,得到物理量参数在不同冬季降水相态样本中的阈值并将其作为判定指标,采用隶属函数转换法,建立了聊城地区冬季降水相态预报模型。对 2016 年冬季的不同降水相态样本进行检验,仅有 1 个降雪样本被误报成降雨,预报准确率均在 85% 以上,效果较好。

需要指出的是在降水过程中,固、液相态变化是一个复杂的过程,在其降落过程中可能伴有融化和冻结等多种现象,例如在一次降水中常发生蒸发冷却却能很快引起等压面平均气温降低,另外雪融化引起对流层降温等,因此有时候预报上会有出入,特别是对固液混合态的情况很难把握<sup>[13]</sup>。但本文的结果对降水相态的预报,特别是无探空资料地区的相关业务预报仍具有一定的参考价值。并在此基础上,可以结合数值模式预报的各层厚度值以及相应的温度等结果来预报冬季降水类型。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 蒋建莹,史历,倪允琪. 一次“高影响天气”的弱降雪过程的数值研究[J]. 应用气象学报,2005,16(2):231-237.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 郑靖,许爱华,许彬. 2008 年江西省冻雨和暴雪过程对比分析[J]. 气象与减灾研究,2008,31(2):29-35.
- [9] 孙欣,蔡萝宁,陈传雷,等. “070304”东北特大暴雪的分析[J]. 气象,2011,37(7):863-870.
- [10] 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.
- [11] 曹钢锋,张善君,朱官忠. 山东天气分析与预报[M]. 北京:气象出版社,1988:222-223.
- [12] 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.
- [13] 孙燕,严文莲,尹东屏,等. 江苏冬季降水相态气候分布特征及预报方法探讨[J]. 气象科学,2013,33(3):325-332.
- [14] BOURGOUIN P. A method to determine precipitation types[J]. Weather Forecasting, 2000,25(5):583-592.
- [15] JOHN M, STEWART E. The mesoscale and microscale structure of a severe ice pellet storm[J]. Mon Wea Rev, 1995,123(11):3144-3162.
- [16] LOWNDES C M, BEYON A, HAWSON C L. An assessment of some snow predictors[J]. Meteor Mag, 1974,105:341-355.
- [17] HEPPENER P O G. Snow versus rain: Looking beyond the “Magic” numbers[J]. Weather Forecasting,1992,7(4):683-691.
- [18] CZYS R R, SCORT R W, TANG K C, et al. A physically based, non-dimensional parameter for discriminating between locations of freezing rain and ice pellets[J]. Weather Forecasting, 1996,11(4):591-598.
- [19] GIAIOTTI D, STEL F. A comparison between subjective and objective thunderstorm forecasts[J]. Atmos Res, 2001,56(1):111-126.
- [20] GARY M L. Model representation of freezing and melting precipitation: Implications for winter weather forecasting[J]. Weather Forecasting, 2002,17:1016-1033.
- [21] 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.
- [22] WAGNER A J. Mean temperature from 1 000 mb to 500 mb as a predictor of precipitation type[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1957,38(10):584-590.
- [23] 段云霞,李得勤,李大为,等. 沈阳降水相态特征分析及预报方法[J]. 干旱气象,2016,34(1):51-57.
- [24] 王亮,王春明. 一次雨夹雪转暴雪天气过程的微物理模拟研究[J]. 气象与环境学报,2010,26(2):31-39.
- [25] 杨晓亮,王咏青,杨敏,等. 一次暴雨与特大暴雪并存的华北强降水过程分析[J]. 气象,2011,40(12):1446-1454.
- [26] 高松影,李慧琳,宋丽丽,等. 丹东冬季降水相态判据研究[J]. 气象与环境学报,2014,30(2):38-44.

- [27] 孙燕,尹东屏,顾沛澍,等. 华东地区冬季不同降水相态的时空变化特征[J]. 地理科学,2014,34(3):370-376.
- [28] 隋玉秀,杨景泰,王健,等. 大连地区冬季降水相态的预报方法初探[J]. 气象,2015,41(4):464-473.
- [29] 尤凤春,郭丽霞,史印山,等. 北京降水相态判别指标及检验[J]. 气象与环境学报,2013,29(5):49-54.
- [30] 彭霞云,孔照林,张子涵,等. 浙江省冬季降水相态判别指标研究[J]. 浙江气象,2015,36(3):8-13.

## Research on Winter Precipitation Type Forecast Model in Liaocheng of Shandong Province Based on Physical Parameters

SHI Weiheng<sup>1,2</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, HAN Fei<sup>1</sup>, YU Wenjie<sup>1</sup>,

KONG Fanlong<sup>1</sup>, SONG Haiqing<sup>3</sup>

(1. PLA Troop of 71901 Unit 59, Liaocheng 252000, Shandong, China;

2. Institute of Meteorology and Oceanology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China;

3. Ecological and Agricultural Meteorology Centre of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** Forty – six physical parameters were calculated by using daily regular upper sounding data from Xingtai and Zhangqiu aerological observation stations and hourly regular observation data from the Liaocheng Airport in winter during 2011 – 2015. Based on the significance test of the correlation coefficients between physical parameters and different precipitation type samples (precipitation events which occurred less than 12 h after the observation time) and the analysis of numerical distribution of physical parameters for different precipitation type samples, 6 physical parameters of Zhangqiu and 6 physical parameters of Xingtai for prediction were finally selected by using the methods of box plot and skill scores. Through analyzing the indication to different precipitation type samples of different physical parameters types, and according to the different thresholds of physical parameters, different criteria for different precipitation types were determined respectively. Thus, the forecast model for precipitation type in Liaocheng was established through the membership function conversion method. The fitting test and forecasting test of the forecast model were verified with a good result and the accuracy rate was over 85%. Results from this paper could be a good reference for operational work in areas without local sounding data.

**Key words:** precipitation type; physical parameters; forecast model; Liaocheng; skill scores