

赵琳娜,慕秀香,马翠平,等. 冬季稳定性降水相态预报研究进展. 应用气象学报,2021,32(1):12-24.

DOI: 10.11898/1001-7313.20210102

冬季稳定性降水相态预报研究进展

赵琳娜¹⁾²⁾* 慕秀香¹⁾³⁾ 马翠平⁴⁾ 王秀娟³⁾ 李缔华⁵⁾

¹⁾(中国气象科学研究院,北京 100081)

²⁾(中国气象局-中国地质大学(武汉)极端天气气候与水文地质灾害研究中心,武汉 430074)

³⁾(吉林省气象台,长春 130062) ⁴⁾(河北省环境气象中心,石家庄 050021)

⁵⁾(西藏自治区察隅县气象局,察隅 860600)

摘 要

冬季降水无论对地面的生产生活还是对高空飞机航行都可能造成严重灾害,降水相态预报的准确性决定了冬季降水预报的成功,该文系统回顾了近几十年降水相态预报取得的成果。降水相态预报方法大致分为 3 类:第 1 类是基于观测或数值天气预报建立的指标以及回归方程,其中某些方法高度依赖数值天气预报模式准确率;第 2 类是基于数值天气预报模式的微物理方案法和集合预报法;第 3 类是基于观测和数值预报产品的人工智能预报法。近年来降水相态模式预报产品准确率不断提高,成为降水相态预报中一个重要的产品支撑。但如何将降水相态形成机制的微物理研究成果用于改善数值预报模式降水相态预报的技巧,以及如何利用人工智能等技术提高降水相态预报的准确率等方面还需要不断努力。

关键词: 降水相态; 冬季降水; 预报方法

引 言

冬季降水不仅会对电力、交通运输、通信、农林牧渔业、城市基础设施、人民的生命和健康造成严重影响,带来重大经济损失^[1-2],还会对生态系统造成严重影响^[3]。冬季的降水相态(也称降水类型)主要包括雨、雪、雨夹雪、冰粒和冻雨等,这几种降水相态单独出现或以混合形式出现,均会导致雨雪冰冻事件。在这些雨雪冰冻事件中,尤其以冻雨和冰粒危害最为严重。冬季固态降水不仅在高纬度地区的北美和俄罗斯等地易于发生^[4-5],中低纬度地区也受其影响,造成较大的低温雨雪冰冻灾害^[6-10]。同样量级的 24 h 降水(如 5 mm),如果是液态,则为小雨量级;如果是固态,则为大雪量级,可能对人们的生产生活有很大影响。据统计,1949—2000 年美国发生

87 次冻雨事件,造成 2220 亿美元的经济损失^[1]。仅 2008 年初,我国南方遭受罕见的雨雪冰冻天气,受灾人口超过 1 亿,直接经济损失超过 1516 亿元人民币^[2]。

降水相态预报是预报员冬季降水预报面临的最大难题之一。国外从 20 世纪初开始出现冻雨、雨夹雪、冰粒等不同冬季降水相态的描述性报告^[11],降水相态变化不是固态和液态水的简单转换,因此确定冬季天气事件的降水相态和强度是预报员冬季降水预报最大的挑战之一。20 世纪 50 年代开始国外学者利用高空和地面观测资料,在降水相态的形成机制和预报技术等方面开展气候学和天气学研究^[12-13];20 世纪 80—90 年代随着观测手段增强,人们利用多普勒天气雷达、风廓线雷达、激光雨滴谱仪等获得较高分辨率的观测资料,使更深入的降水相态微物理形成机制研究得以开展^[14-15]。

2020-09-07 收到,2020-11-17 收到再改稿。

资助项目:中国气象科学研究院科技发展基金(2020KJ014),国家重点研发计划(2015CB452806),中国气象科学研究院基本科研业务费项目(2020Z011),国家科技支撑计划课题(2015BAK10B03),国家自然科学基金项目(41475044)

* 邮箱: zhaoln@cma.gov.cn

随着数值天气预报技术的发展,为了提升降水相态预报效果,很多复杂的微物理参数化方案被广泛应用于高分辨率区域预报模式中,即便如此,降水相态预报仍然面临诸多挑战^[16]。这是因为冬季降水相态预报中有许多不确定因素,如对数值天气预报模式提出重大挑战的就是混合相态降水预报,特别是冻雨、冰粒和雨雪的混合相态降水预报不理想^[17-21]。模式中降水相态算法和模式不确定性均会对模式降水相态预报准确性产生影响^[18],而且不同仪器降水相态观测误差及其时空变化对降水相态预报的验证也存在不确定性^[22]。在数值天气预报产品基础上,采用统计后处理等多种降水相态预报方法或模型,可有效减少和避免预报误差,随着数值天气预报技术的发展,要提高混合相态降水事件预报的准确性,更可取的方法是使用集合预报进行降水相态的概率预报^[22]。

在全球气候变化背景下,冰冻雨雪等极端天气和气候事件有显著增加趋势。Branick^[23]通过对美国冬季降水事件分类发现:在美国大陆所有冬季降水事件中,严重的冻雨或冻毛毛雨事件约占 24%。冰粒、冻雨、冻毛毛雨、冻雾、雪以及混合相态降水等天气在我国各地均有不同程度发生^[6,24-33]。随着社会经济的发展,冬季降水相态越来越多地影响城市运行和社会生产,尤其是混合相态的冻雨和雨夹雪对交通运输、电力和公共设施等方面造成越来越多的灾害,民众和国家决策部门对降水相态预报准确性的关注度和精细化需求越来越高。因此,本研究围绕冬季稳定性降水,回顾近几十年国内外有关降水相态预报方法的研究进展,梳理降水相态预报问题和存在不足的认识。这不仅对降水相态未来相关研究的展开有利,而且可以为相关预报服务技术的提高提供参考。

1 降水相态形成机制

早期只能获取冬季稳定性降水时间间隔较长的探空和地面资料,对降水相态形成的研究仅限于关注大气垂直温度变化和垂直分布。如 1920 年 Meisinger^[34]提出云中雪片由温度高于冰点的空气层进入低于冰点的空气层形成冻雨、冰粒和雪等水凝物,认为温度变化引起的融化和冻结是导致降水相态发生变化的主要影响因素。其中对降水相态转换起到融化和冻结作用的两个大气层分别被称为融化层和

再冻结层^[35-37]。通过融化层完全融化的降水粒子直接下落至地面形成雨,部分融化的降水粒子直接下落至地面可能形成雨夹雪或雪。通过融化层后,如果再经过一个冷平流形成的近地面再冻结层可导致降水相态再次产生变化,半融化或完全融化的冰晶在再冻结层内完全冻结或部分冻结。当雨落入再冻结层时,经过再冻结形成冻雨。由融化形成的半融化冰晶,到达冰冻层时如果完全冻结则形成冰粒。冻雨的形成机制分两种:一种为融化过程,即当冰粒从高空坠落到气温超过 0℃ 的大气层中,冰粒子融化成雨滴,然后进入低于冰点的表层过冷并与表面物体接触后冻结,该过程自 20 世纪初以来就被气象学家所认识^[11,34,38-39];另一种为暖雨过程,由 Huffman 等^[40]定义,强调在这些条件下,基本无冰粒子参加,水滴在下落和生长过程中不断过冷,最后落地冻结。

由于不同相态降水的形成机制不同,在地面温度接近 0℃ 时,可能产生冰粒、冻雨、冻毛毛雨、雨、雪和混合相态降水,这些类型降水可能在水平距离 1~100 km 范围内以不同强度同时出现^[41]。我国冻雨发生以暖雨机制为主^[29-30]。暖雨机制产生的冻雨云顶普遍不高,而融化机制冻雨云顶相对较高;出现冻雨时地面气温均低于 0℃,冰相机制冻雨的暖层厚度基本在 1 km 以上,暖层最高气温平均在 3℃ 以上。冰粒天气形成机制以融化机制为主,冰粒天气的云顶高度普遍高于冻雨天气,冰粒天气的暖层厚度和强度均小于冻雨天气^[30]。

总而言之,大气垂直温度廓线变化是降水相态的主要决定因素,但也受降水粒子相态、粒子下落速度、垂直运动和地形等其他因素的影响。如日本海东部的日本西海岸、大西洋西岸的魁北克地区和大西洋东岸的英格兰岛以及中国环渤海、黄海、东海海面及其沿海地区的海效应降雪(又称为冷流降雪)、美国五大湖和大盐湖等地区的湖效应降雪以及中国贵州的冻雨都是受地形影响的降水^[42-43]。

2 降水相态预报方法

长期以来冬季降水相态预报一直是预报员关注的问题,国内外较早的降水相态预报从 20 世纪 70 年代开始^[44-45]。第 1 类方法是基于观测或数值天气预报建立指标以及回归方程,本文简称为指标判据法;第 2 类方法是基于数值天气预报模式的微物理

方案法和集合预报法;第3类方法是基于观测和数值天气预报产品的应用决策树、人工神经网络和深度学习等的人工智能预报法。

2.1 指标判据法

冬季降水相态形成机制复杂,大气垂直温度廓线是降水相态主要影响因素。因此早期划分雨雪界限最简单、最常用的指标之一是从地面观测插值的温度场获得的 0°C 气温等值线^[46]。由于多个微物理过程参与降水的增长和温度剖面演变使雨雪边界受到局部尺度过程的强烈影响,因此,冬季地面降水相态识别不是一项简单工作。虽然对流层低层大气温度和湿度剖面是地面降水相态的决定因素,但受水平和垂直平流、深厚的湿对流、垂直混合、大气辐射和不同潜热的影响^[47],地面降水相态的识别非常困难。因此,围绕大气温度和湿度剖面这两个降水相态的决定因素,基于观测或数值天气预报降水相态预报指标判据法主要包括部分厚度法、面积法、特性层温度法、大气垂直温度分布法和回归方法等。

2.1.1 气压层厚度预报法

由压高公式可知,两个固定气压层之间的厚度与它们之间的平均温度成正比,这可代表温度垂直平均值。1957年Wagner^[13]利用100~500 hPa厚度差作为参数分类预报冻结降水和非冻结类降水,取得较理想的预报效果。之后较长时间内500~1000 hPa厚度差和850 hPa的 0°C 层作为降水相态的主要预报参考因子,但500~1000 hPa厚度差不能有效解决对流层低层温度分布问题,这种基于单一参数的预报误差很大^[48]。Bocchieri^[49]和Glahn等^[50]利用气层厚度差、特定层温度、露点和湿球温度的降水相态概率预报的分类预报方法,效果优于单独应用厚度因子的预报。此外,气压层厚度作为预报因子时,近海地区需考虑陆地-海洋交界附近风向低层转变引起的热量变化^[48]。Keeter等^[51]采用逐步线性回归,对近似于Logit回归相关的S形曲线进行修正,推导出降水相态与探空观测的700~1000 hPa,700~850 hPa和850~1000 hPa厚度差之间关系,回归方程可区分固态和液态降水,列线图分析可区分混合相态降水,最大限度提高有限资源利用率,为关键的局部小概率事件提供客观预报指导^[52-53]。段云霞等^[54]分析沈阳浑南站探空资料时发现,700~1000 hPa厚度差在不同天气分型条件下差别较大,基于天气分型建立的降水相态预报指标更有利于对不同降水相态的准确预报。虽然

基于部分气压层厚度差的预报指标易于使用,但只取得了初步成效。徐辉等^[55]分析华北一次雨雪天气的温度垂直结构演变以及相态转变对温度层结作用,发现降水相态类型严重依赖于温度垂直结构,温度垂直结构的细微改变将决定最终到达地面的降水相态,850~1000 hPa的厚度差小于1300 gpm且700~850 hPa的厚度差小于1530 gpm时,地面的降水相态以雪或雨夹雪为主,否则以雨为主。

2.1.2 特定层温度预报法

早期国内对降水相态的研究主要通过个例研究总结降水相态对应的对流层中低层不同层次温度特征^[54,56-62]。许爱华等^[57]分析2005年一次寒潮天气过程的低层大气温度结构特征,认为925 hPa以下的大气温度是南方降水相态转换关键,925 hPa温度不超过 -2°C 可作为固态降水的预报依据。李江波等^[58]总结7次雨雪转换过程,指出 0°C 层明显下降、降雪发生时地面温度在 0°C 左右以及1000 hPa温度在 2°C 以下可作为雨雪转换的判据,并发现虽然850 hPa温度变化幅度大,但对降水相态的影响不大,925 hPa以下温度对降水相态起主要作用。

因此,早期对降水相态的判别依赖于特性层温度,同时结合低层厚度差因子,也是对厚度预报法的拓展。尤凤春等^[63]对北京市观象台60年资料进行统计,认为雨雪温度露点平均值在850 hPa以下差异明显,随高度增加差异逐渐减小,尤其是在700 hPa和500 hPa。因此,选取地面露点温度和925 hPa温度作为降水相态判别指标效果较好。利用925 hPa温度、850 hPa温度、地面温度、地面露点应用多元回归方法,建立降水相态统计预报方程对降水相态预报具有一定参考价值。此外,漆梁波等^[60]认为气候背景不同使得西欧降水相态判别指标与我国东部略有差别,北美洲判别指标在我国东部不能适用。我国降水相态判别指标不但要综合考虑温度因子,还要考虑厚度因子,并以925 hPa以下气层温度结合700~850 hPa和850~1000 hPa厚度差为指标,建立我国东部雨、雪和雨夹雪相态的判别指标,并增加冻雨(冰粒)分类。由于主要考虑融化机制而忽略了暖雨机制对冻雨(冰粒)进行判别,因此得到的判别指标不理想。孙燕等^[64]利用地面和850 hPa温度结合厚度建立江苏冬季区分雨、雪相态预报判别指标,对固液态降水预报区分有较高准确率,对降水相态预报也有很好的指示意义,还发现地面湿球温度是区分雨雪有参考价值的指标。人们还发现 0°C

层高度与降水相态密切相关,可用于雨雪区分^[58,65-69]。降雨时 0°C 层高度位于925 hPa或其附近,当 0°C 层高度降至1000 hPa附近时降雨转为降雪^[61]。对于复杂地形条件,雨、雪、雨夹雪相态转换的前提条件分别是地面温度大于 3.0°C 、地面温度小于 -1.0°C 、地面温度大于 -1.0°C 且小于 3.0°C ,需在此前提下建立不同海拔高度相态转换的温度组合指标^[70]。

2.1.3 暖层的面积预报法

大气垂直温度分布中,暖层深度或面积越大,降水粒子在穿过该层时融化的可能性越大。Bocchieri^[49]根据探测计算的参数因子与观测降水相态(液态、冻结(冻雨等混合相态)和冰冻(固态))进行多元线性回归因子筛选。统计筛选出地面至1000 m高度和500~2500 m高度层平均温度、相对于温度廓线的融化层深度(如果存在温度大于 0°C 的情况)、融化层温度廓线和 0°C 等温线之间区域、地表附近冻结层深度(如果存在)以及基于地面冻结层湿球温度廓线和 0°C 等温线之间的面积等因子,建立降水相态预报回归方程,显示出对液态和固态降水较好的区分能力,但该方程对混合相态降水预报评分并不理想。Bourgouin^[71]在以上研究基础上细化面积预报方法,考虑降水粒子的相态依赖于融化和再冻结程度,融化层和再冻结层的平均温度和停留时间两个重要参数,假设降水粒子垂直运动和末端下降速度恒定,停留时间仅取决于融化层或冻结层厚度,冻结层平均温度与融化层(或冻结层)厚度的乘积可视为与标准温熵图或温度-对数压力图上气层温度和零度线包围的面积成正比,面积中正区域融化固体粒子,负区域冻结降水粒子。用正、负区域面积与降水相态的关系,建立雨、雪、冻雨和冰粒诊断判别方法预报效果较同期其他方法更优。夏倩云等^[72]发展了面积预报法,应用面积元方法计算探空廓线与 0°C 等温线相交形成的正、负区域面积和两者的交点数,以及地面温度作为降水相态(雨、雨夹雪、雪、冻雨和冰粒)的预报因子,建立诊断降水相态的统计方法。

2.1.4 垂直温度廓线预报法

与气压层厚度预报法和特定层温度预报法相比,虽然面积法充分考虑了融化和再冻结程度,但仍具有一定局限性。应用气层厚度差、特征层温度和面积法建立降水相态预报指标受限于数值预报产品分辨率和准确率。Thériault等^[73]基于数值模式微

物理过程的敏感性试验,发现温度分布(-0.5°C)以及降水强度的微小变化可能对地面形成的降水相态产生重大影响。因此,准确预报降水相态需要准确预报垂直温度廓线,特别是在中低层温度廓线预报显得尤为重要。

近年,随着数值天气预报技术的发展,数值预报产品精细化程度和预报准确率的提高,利用高分辨率数值预报产品通过分析大气垂直温度分布,建立判别不同相态降水的预报模型,进行降水相态预报。Hux等^[74]应用气候学和判别分析法相结合的方法建立混合降水分析识别模型(DAMP模型),通过判别分析各类降水相态的冻结层数量、温度垂直廓线和特征等压面温度以及其他变量(如部分厚度、 0°C 等温线的高度以及每个冻结层之间的温度指数),基于连续的气象要素对降水相态进行分类,给出各种相态降水预报的概率估计。模型在混合降水事件中预报降水相态和持续时间方面表现出色。DAMP模型不仅降水相态预报正确率高,对冻雨的漏报率也很低。

2.1.5 数值预报诊断法

在数值天气预报发展基础上,降水相态分类还可以通过对水滴所经过路径上的温、湿垂直廓线进行诊断预报。如温度的垂直剖面、湿球温度、混合层以上升高的厚度和基于地表的低温层深度、风和降水多少确定到达地面的降水是否为雨、雪、冰粒或冻雨。

利用中尺度数值模式预报的近地面大气层冻结部分降水混合比在可凝结成降水水汽混合比中所占比例,判断雨雪过渡区、雨雪分界线及雨夹雪区,也可较准确预报中国东北地区降水过程中雨/雪区和雨夹雪区分布特征及降水相态随时间演变^[75]。也有利用逐日、逐时常规地面观测资料和逐日高空探测资料计算物理量参数,根据物理量参数在不同降水相态样本中值域分布特征,选定具有预报意义的物理量参数,分析不同类型物理量参数对各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,确定冬季降水相态预报的判定指标,建立某地区冬季降水相态预报模型^[76]。此外还可以利用常规地面观测资料、NCEP/GFS分析资料、卫星及多普勒天气雷达资料和中尺度数值模式,对比寒潮型暴雪和冷暖空气对峙型雨雪两类天气过程的大气环流形势、温湿廓线和对流层中低层风场特征,寻找降水相态预报的因子^[77]。

Reeves 等^[22]在对降水相态变化的微物理机制研究和数值模拟分析基础上,开发了谱段分类器(spectral bin classifier, SBC),通过计算给定预定温度和相对湿度分布的一系列降落水凝物的液体水分数,提供融化层和再冻结层的微物理参数,同时考虑热力和微物理强迫作用,计算冻结和融化的相对降水强度,确定地表降水相态,模型结果准确反映了实际的热力学廓线。该算法可以诊断雨、雪、雨雪混合、冻雨、冰粒和冻雨冰粒混合物 6 种类型,是目前诊断降水相态类型最多的方法。与现有算法相比,SBC 具有更高的准确率,尤其是冻雨和冰粒预报。由于该算法显式地计算融化和再冻结率,且未考虑水凝物相互作用或者依赖水凝物大小的冰核形成过程,这也使得该过程在计算上足够高效,并可以实时运行。

除此之外,还有配料法和天气分型法等,这些方法大多通过个例分析归纳降水相态转换相关阈值,进行降水相态预报。如 Cheng 等^[78]采用自动天气分型与逻辑回归分析相结合的方法预报冻雨事件。Bocchieri 等^[79]建立基于有限区域精细模式的降水相态预报条件概率模型输出统计系统(MOS-PoPT),可预报雪或冰粒、冻雨和雨 3 种降水相态,特别是 12~24 h 冻雨预报表现优良,并于 1982 年在美国国家气象局应用。Wetzel 等^[80]提出降水产生过程中涉及的 5 种基本物理成分,即上升压力、水分、不稳定性、降水效率和温度的配料法,并将该方法用于中纬度地区冬季降水业务的分析预报。Cuvio^[81]通过分析 37 年间发生在美国北卡罗来纳州的 237 次冬季降水事件建立降水相态预报模型,利用气旋和反气旋路径分类,表征研究区观测到的雪、冻雨和雨夹雪的强度。马晓刚等^[82]利用探空资料将单站大气逆温转换成逆温水平分布区,实现大气逆温水平分布的自动诊断分析。提出由大气逆温水平分布区、高空湿区、地面气温 0℃ 线、逆温层极值点 0℃ 线构成的冻雨落区的基本概念模型和冻雨落区的自动诊断分析方法。Czys 等^[83]建立第 1 个热力学模型,通过接近融化时间与完全融化所需时间比率区分冻雨和冰粒,采用该比率与地表温度共同确定降水相态,该模型不足之处是对冰粒预报难度较大。Zerr^[84]将两个传热模型应用于冰粒和冻雨预报问题,其中一个模型模拟树枝状晶体融化,另一个模拟液滴再冻结,并指出融化参数决定冰粒和冻雨预报能力。

需要注意的是,基于垂直温度廓线预报降水相态的 DAMP 模型和 SBC 方法,高度依赖数值天气预报模式预报准确率,模式误差被代入模型降低预报准确率。此外,有些诊断方法计算效率高,对降雨和降雪的判断比较准确,但在区分冻雨和冰粒方面还存在一些误差^[18,85-86]。

2.2 数值模式预报法

降水相态的数值预报方法包括两类:一类是基于数值天气预报模式的云和微物理方案预报降水相态,另一类是近几年发展的基于集合预报的降水相态概率预报方法。

2.2.1 微物理方案法

在对降水物理过程理解的基础上,人们开发多种判断降水相态的微物理过程算法预报降水相态。如模式的总体微物理方案(bulk microphysics)是基于预报的每个水凝物符合 Marshall-Palmer 粒径分布的假设方案^[87]。20 世纪 90 年代前后,多普勒天气雷达、风廓线仪、微波辐射计和移动原始探测器的广泛应用为研究降水的运动学和热力学结构和演变提供了高分辨率观测资料,由此可以描述降水粒子基本微物理结构。Tremblay 等^[88]基于总含水量单一预报公式的云微物理过程参数化方案,发展了新的混合相云方案。该方案体现的是以显示方式包含形成过冷液态水的微物理过程,在没有冰融化机制的情况下,过冷液态水物理机制的加入显著提高冻雨预报概率,并改善融冰算法的偏差评分。

随着数值预报产品与高分辨率观测资料的快速发展,高时空分辨资料结合总体微物理方案进行数值模拟,分析降水相态变化中的非绝热加热或冷却对环境条件影响,提高降水相态预报效果。将这些非绝热过程的精确参数化纳入冬季降水预报模式,可以改善降水相态预报能力^[35,89-93]。如 Thériault 等^[35]利用温度阈值,发展针对多种降水相态的双参数总体微物理方案(double-moment bulk microphysics scheme)的云模式,对形成冬季降水不同相态有利的温度和湿度廓线,在逆温中连续降雪环境的系统变化进行模拟,发现降水相态变化是融化和冰冻相变引起的大气温度和湿度变化结果。Thériault 等^[94]利用耦合了双参数总体微物理方案的一维动力学云模型^[35]发现,与背景大气静止相比,背景大气上升导致温度结构演变这一重大变化。在接近地表的次冻结层中,降水粒子在静止大气的温度变化比在上升大气温度变化更明显。背景垂直风速总是

降低某些类型的降水,增加其他类型的降水,特别是冰粒、再冻湿雪和霰的量在地表随背景风速的增加而减少,而降雪的量则增加。Thériault 等^[90]通过使用基于物理的参数化改进针对多种相态降水的大量微物理方案,在微物理方案中增加降水粒子的精细化融化和再冻结过程参数,模拟发现形成的混合相态粒子反过来会导致或影响其他相态的降水形成,这说明降水相态形成强烈依赖于融化层的温度和深度以及再冷冻层内的饱和度和温度。Barszcz 等^[95]改进千米尺度数值天气预报模式冻雨的显示预报方案,通过降低雨-霰聚集效率,设置温度阈值为 -5°C ,在此温度阈值以上不允许碰撞冻结,因此可以在微物理方案中控制过多的雨-霰聚集和霰形成,从而改进地表冻雨模拟。Schuur 等^[96]首次尝试将快速更新(RUC)模式的热力学输出与偏振雷达观测相结合的新型降水相态分类算法,该方法以 RUC 模式输出的湿球温度的垂直剖面为降水相态分类背景,根据一套经验规则,当发现观测值与背景分类不一致时,根据偏振雷达资料改进降水相态。该方法改进已有的仅依靠偏振雷达观测的分类技术,通过使用热力学模式信息,帮助诊断可能在高空发生的微物理过程(如融化或再冻结)。Ikeda 等^[16]采用 NOAA 小时快速更新的高分辨率模式 HRRR (high-resolution rapid refresh) 预报冬季降水。定性地讲,降水相态预报的范围较理想,特别是对雪和雨、雨雪过渡和冻雨落区预报均取得理想效果,但雨雪转换和冻雨落区相关定量评分明显低于雪或雨预报。

此外,准确描述降水时段和落区的能力取决于天气系统。通常较大的、连续覆盖的降水系统比较小的、不连续覆盖的降水系统预报效果更佳。对于较小风暴的模式性能评估,空间或时间上的偏移影响更大。Ikeda 等^[20]利用 HRRR 进行混合降水相态预报时发现,当观测资料和模式模拟结果均显示地表有混合相态降水时,该模式能较好地再现观测的温度分布。模式预报出现降水而观测结果显示混合相态降水时,模式地表温度偏差一般为 2°C ,垂直温度剖面与探空观测结果相似。美国东部受冷空气阻塞的天气系统影响时,地面温度偏差 4°C 会造成地面降水相态或冻雨持续时间(面积覆盖)比观测时间偏短(小)。在观测到的混合相态降水的地区,对雪的预报情况在温度接近 0°C 的高层和近地层存在细微差别。Benjamin 等^[97]利用 HRRR 中混合相积云微物理方案^[98],预报地面降水在一定条件下同一

位置同时包括的雨、雪和霰,后处理逻辑回归将预报的多种水凝物信息和模式预报信息相结合,区分雨和冻雨地面降水相态场,并描绘出混合降水区域。

佟华等^[21]根据降水粒子在下落过程中的热力结构,利用 GRAPES_MESO 中尺度模式提供所需参数,针对降水物理过程的 Bourgoiuin 算法^[71]、BTC 算法^[99]、改进的 BTC 算法和 Ramer 算法^[100] 4 种方案,进行雨、雪、冻雨和冰粒 4 种降水相态的诊断。4 种方案均能较合理地得到雨雪分界线,以及降雨、降雪落区。改进的 BTC 算法比 BTC 算法对降雪的诊断偏差更小、预报冰粒更少。Ramer 算法较其他 3 种算法获得更多的冻雨事件;Bourgoiuin 算法最接近这 4 种算法的合成算法结果。但这 4 种诊断方案只能确定一种降水相态,不能诊断出雨夹雪。根据大气条件,降水粒子经历了扩散生长、碰并、聚集、融化和再冻结等许多复杂的物理过程后落到地面,预报落地降水相态的挑战在于靠近雨雪过渡地区的降水相态预报。

Reeves 等^[18]利用探空资料和模式输出结果,对数值预报 5 种隐式降水相态算法的准确性进行评估,讨论模式不确定性对算法性能的影响,并对降水相态观测的不确定性及其对预报降水相态验证影响进行评价^[101]。通过比较地面自动观测站和地面附近天气现象识别网络的观测结果,发现观测不确定性源于仪器、观测者偏差和空间、时间的代表性。然而,决定模式在预报到达地表的降水相态或时段方面的技巧,不仅取决于关键大气过程的表现,附近的水体、地形高度变化等因素以及大尺度和局部尺度的大气环境也非常重要^[40-41,92,102-104]。因此到目前为止,即便使用复杂的微物理参数化方案的高分辨率区域模式^[16,105-106],准确预报到达地面降水的特定类型(如雪、雨、冰粒、霰)或降水时段仍然是一个难题。

2.2.2 集合预报法

数值天气预报误差难以避免^[107-108],集合预报对预报不确定性的把握有一定优势^[108-111],使用集合预报的降水相态概率预报可有效提高混合降水事件降水相态预报准确率^[101]。Cortinas 等^[112]使用 Eta 和 RUC 模式数据检验了 6 种降水相态算法的质量,分析了由模式不同算法的降水相态预报组合而成的概率预报质量,但模式中并没有一种算法能够准确地诊断所有降水的正确相态。由此说明必须将这些算法结合起来,以提供预报不确定性的度量,这

也说明应用集合预报技术的必要性。Manikin 等^[113]将不同后处理技术应用于单一的高分辨率业务 Eta 模式。在相同热力学剖面上和模式显式微物理过程,运行雨、冻雨和冰粒(或雪)3 种降水相态的算法形成集合预报。

Wandishin 等^[17]将 NCEP 短期集合预报推广到冬季降水相态预报,该集合系统集模式多样性、初始条件多样性和后处理算法多样性于一体,将短期集合预报系统的预报结果与 5 种降水相态算法相结合生成概率预报。该系统在雨雪预报中技巧凸显,但冻雨预报只能达到中等水平,冰粒预报无技巧。即使对于无技巧的预报,该系统也显示出一定的区分不同降水相态的能力。从预报质量看,尽管模式多样性的影响最大,算法多样性与初始条件多样性也同样重要。Scheuerer 等^[114]基于全球集合预报系统的垂直温度廓线预报,提出了降水相态概率预报的贝叶斯分类方法。考虑与每种降水相态相关的垂直湿球温度分布,假设观测到的降水相态仅取决于地面以上的垂直湿球温度廓线,将垂直湿球温度廓线转换成降水相态的主要成分,并且通过偏正态分布对每一种主要成分建模。使用方差膨胀技术降低对应于较小特征值分量的影响,贝叶斯分类方法最终基于湿球温度分布预报得到每种降水相态产生概率。雨、雪、冰球、冻雨或冻毛毛雨降水相态概率预报较理想,其中冻雨预报效果更佳。

随着资料同化技术和数值天气预报技术的不断发展,集合预报在降水预报中的应用也越来越广泛。数值预报产品中降水相态预报准确率不断提高,逐渐成为降水相态预报中的重要支撑产品。2015 年 5 月欧洲中期天气预报中心(ECMWF)发布 IFS(Integrated Forecasting System)业务化版本,该版本系统改进了云和降水物理过程,利用湿湿层结曲线进行预报,对降水粒子在下落过程中的融合和再冻结物理过程进行参数化,实现对雨、干雪、湿雪、雨夹雪、冻雨和冰粒共 6 类天气现象进行定量化的预报^[115-116],其相态判别不仅考虑地面 2 m 气温和地面液态水的比例,还考虑有整层气温曲线、与冻雨和冰粒有关的暖层和冷层厚度和高度,以及不同高度液态和固态水含量。ECMWF 在此基础上,开发了半经验的降水相态预报产品(PSTYPE)^[117],产品在实际应用中表现出较好的预报效果^[115-116]。评估检验显示出相对于 ECMWF 高分辨率确定性模式,ECMWF 集合预报的降水相态概率预报提高了降水相态

预报技巧^[118]。

2.3 人工智能预报法

降水相态的准确预报是天气预报的重要组成部分。尽管人们对冬季降水及其相关天气认识逐步深入,但准确预报降水相态仍很困难。利用对降水相态的气象学机理,仅从一组很少量的天气变量中做出的降水相态预报,只能取得有限的成功。人们很早就知道,影响地面降水相态的最重要因素是温度剖面,由此发展了各种技术预报降水相态。人工智能方法是一种有效的替代方法,该方法是分析大量历史天气资料,得到预报模型,利用多种变量生成降水相态预报,如利用决策树方法诊断计算判断雨雪转换^[99]。Reeves^[101]制作了一个决策树识别雨、雪、雨夹雪、冻雨、冰粒以及冻雨和冰粒等混合降水相态。还有研究者使用欧洲中期天气预报中心中期预报模式(ECMWF)和区域资料同化预报系统(RDAPS)的相关特征量,选择可用的大量天气变量的有效子集,从中得到多项回归参数,然后用这些参数预报降水相态。获得预报结果比 ECMWF 和 RDAPS 分别准确 15% 和 13%^[119]。在数值预报产品基础上,董全等^[120]利用人工神经网络方法开发了中国区域的雨雪相态的客观预报模型和产品,可准确预报北方的雨雪分界线。彭霞云等^[121]选取 500 hPa 和 1000 hPa 厚度差等 11 个因子,将数据挖掘算法应用于降水相态判别,采用决策树算法和随机森林算法分别构建模型,均较准确预报了降水相态,但决策树算法和随机森林算法各有优劣^[121-122]。

3 展 望

冬季天气事件中降水相态及其强度和落区一直是预报员的主要难题之一。冬季天气降水相态极其复杂,包含固态、液态和固液混合相态,其中混合相态又包含冻雨、雨夹雪,在一次降水过程中可能同时包含多种降水相态或是不同类降水相态之间相互转换,其形成过程涉及大气垂直方向多种要素变化和相互作用。总之,国外对降水相态的形成机制、影响因素研究较为深入,降水相态的预报判别技术方法也较为成熟。目前国内对降水相态的研究现状存在对降水相态形成机制研究数量和研究深度有限、预报技术方法单一等问题。今后在降水相态预报方法上应该注重以下几个方面:

1) 加强模式物理过程的改进,大力发展模式微

物理过程和资料同化技术、具有降水相态预报能力的高分辨率区域模式。国外基于集合预报的降水相态预报技术走在前列,除高分辨模式之外,发展能够提供模式降水相态预报不确定性的集合预报,是提高降水相态预报准确率的一条重要途径。如何改进数值预报的微物理过程和资料同化技术,深入发展集合预报技术、挖掘集合预报在降水相态预报的潜力,提供更准确的降水相态概率预报,发挥高分辨率模式与集合预报优势互补的特性,应成为降水相态预报的着力点。

2) 加强数值预报模式的后处理技术研究。大量的数值预报应用经验证明:无论确定性模式还是集合预报数值模式,模式输出的预报需要进行诸如订正系统偏差、调整集合预报离散度等统计学后处理,以提升数值(集合)预报的可靠性和准确率,对于降水相态预报也不例外。针对单一模式或多模式预报,采用各种方法对模式预报进行系统偏差订正和权重集成,在定量降水预报中已经取得很多成果。针对集合预报发展如回归模型方法、参数估计方法的概率预报后处理技术,在降水相态预报中也有很好的应用前景。

3) 加强降水相态探测资料、云和微物理研究成果在降水相态预报中的应用研究。目前虽然在影响降水相态的微物理机制的研究成果较多,但在预报技术中的应用还比较欠缺。一方面应加大降水相态的微物理研究成果用于改进数值预报模式的力度,另一方面也应加强降水相态的微物理研究成果在数值预报降水相态产品的订正以及改进数值预报产品方面的研究与应用。

4) 发展针对降水相态预报的检验技术。通过检验发现问题,达到对产品或预报改进的目的。预报越精细,检验技术越复杂。此外,使用传统的针对单一相态降水的评分方法进行降水相态预报检验时,需要注意降水观测资料的选择和匹配,如何处理观测资料也值得研究^[101,118]。

参考文献

- [1] Changnon S A. Characteristics of ice storms in the United States. *J Appl Meteor*, 2003, 42: 630-639.
- [2] 赵琳娜, 马清云, 杨贵名, 等. 2008年初我国低温雨雪冰冻对重点行业的影响及致灾成因分析. *气候与环境研究*, 2008, 13(4): 556-566.
- Zhao L N, Ma Q Y, Yang G M, et al. Disasters and its impact of a severe snow storm and freezing rain over southern China in January 2008. *Climatic Environ Res*, 13(4): 556-566.
- [3] Millward A A, Kraft C E. Physical influences of landscape on a large-extent ecological disturbance: The northeastern North American ice storm of 1998. *Landsc Ecol*, 2004, 19(1): 99-111.
- [4] Carrière J M, Lainard C, LeBot C, et al. A climatological study of surface freezing precipitation in Europe. *Meteor Appl*, 2000, 7(3): 229-238.
- [5] Cortinas Jr J V, Bernstein B C, Robbins C C, et al. An analysis of freezing rain, freezing drizzle, and ice pellets across the United States and Canada: 1976-90. *Wea Forecasting*, 2004, 19(1): 377-390.
- [6] 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. *地理科学*, 2014, 34(3): 370-376.
- Sun Y, Yin D P, Gu P S, et al. The spatial and temporal variations of different precipitation phases in eastern china during winter. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(3): 370-376.
- [7] 刘原峰, 朱国锋, 赵军, 等. 黄土高原区不同降水相态的时空变化. *地理科学*, 2016, 36(8): 1227-1233.
- Liu Y F, Zhu G F, Zhao J, et al. Spatial and temporal variation of different precipitation type in the Loess Plateau area. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(8): 1227-1233.
- [8] 李杰, 郭学良, 盛日峰, 等. 我国冰粒降水天气的观测特征统计分析. *大气科学学报*, 2016, 39(3): 349-360.
- Li J, Guo X L, Sheng R F, et al. Statistical analysis of observed properties of ice-pellet precipitation in China. *Trans Atmos Sci*, 2016, 39(3): 349-360.
- [9] 王传辉, 姚叶青, 李刚, 等. 江淮地区不同相态降水日数变化特征. *气象科技*, 2018, 46(4): 753-759.
- Wang C H, Yao Y Q, Li G, et al. Variation characteristics of precipitation days with different phases in Yangtze-Huaihe region. *Meteor Sci Technol*, 2018, 46(4): 753-759.
- [10] 王晓芳, 程正泉, 姜丽萍. 2016年广东一次罕见寒潮雨雪冰冻天气过程分析. *气象科技*, 2019, 47(1): 106-115.
- Wang X F, Cheng Z Q, Jiang L P. Analysis of a rare cryogenic freezing rain and snow event in cold wave weather over Guangdong Province in 2016. *Meteor Sci Technol*, 2019, 47(1): 106-115.
- [11] Bennett W J. The sleet storm in northern New York, March 25-27. *Mon Wea Rev*, 1913, 41: 372-373.
- [12] McQueen H R, Keith H C. The ice storm of January 7-10, 1956 over the Northeastern United States. *Mon Wea Rev*, 1956, 84: 35-45.
- [13] Wagner J A. Mean temperature from 1000 mb to 500 mb as a predictor of precipitation type. *Bull Amer Meteor Soc*, 1957, 38: 584-590.
- [14] Stewart R E, Patrick K. Freezing precipitation in winter storms. *Mon Wea Rev*, 1987, 115: 1270-1280.
- [15] Ryzhkov A V, Zrnic D S. Discrimination between rain and snow with a polarimetric radar. *J Appl Meteor*, 1998, 37(10): 1228-1240.
- [16] Ikeda K, Steiner M, Pinto J, et al. Evaluation of cold-season precipitation forecasts generated by the hourly updating high-

- resolution rapid refresh model. *Wea Forecasting*, 2013, 28: 921-939.
- [17] Wandishin M S, Baldwin M E, Mullen S L. Short-range ensemble forecasts of precipitation type. *Wea Forecasting*, 2005, 20(4): 609-626.
- [18] Reeves H D, Elmore K L, Ryzhkov A, et al. Sources of uncertainty in precipitation-type forecasting. *Wea Forecasting*, 2014, 29(4): 936-953.
- [19] Elmore K, Grams H, Apps D, et al. Verifying forecast precipitation type with mPING. *Wea Forecasting*, 2015, 30(3): 656-667.
- [20] Ikeda K, Steiner M, Thompson G. Examination of mixed-phase precipitation forecasts from the high-resolution rapid refresh model using surface observations and sounding data. *Wea Forecasting*, 2017, 32(3): 949-967.
- [21] 佟华, 张玉涛. GRAPES_MESO 模式预报降水相态诊断及应用研究. *大气科学学报*, 2019, 42(4): 502-512.
Tong H, Zhang Y T. Diagnosis of precipitation types and its application in the GRAPES_MESO forecasts. *Trans Atmos Sci*, 2019, 42(4): 502-512.
- [22] Reeves H D, Ryzhkov A V, Krause J. Discrimination between winter precipitation types based on spectral-bin microphysical modeling. *J Appl Meteor Climatol*, 2016, 55(8): 1747-1761.
- [23] Branick M L. A climatology of significant winter-type weather events in the contiguous United States, 1982-94. *Wea Forecasting*, 1997, 12: 193-207.
- [24] 赵珊珊, 高歌, 张强, 等. 中国冰冻天气的气候特征. *气象*, 2010, 36(3): 34-48.
Zhao S S, Gao G, Zhang Q, et al. Climate characteristics of freezing weather in China. *Meteor Mon*, 2010, 36(3): 34-38.
- [25] 王海军, 覃军, 张峻. 中国南方 7 省冰冻天气时空分布规律研究. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(7): 839-846.
Wang H J, Qin J, Zhang J. On spatial-temporal distribution of the freezing weather in southern China. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2010, 19(7): 839-846.
- [26] 王遵娅. 中国冰冻日数的气候及变化特征分析. *大气科学*, 2011, 35(3): 411-421.
Wang Z Y. Climatic characters and changes of ice freezing days in China. *Chin J Atmos Sci*, 2011, 35(3): 411-421.
- [27] 张志富, 希爽, 余予, 等. 1961—2012 年中国 5 类主要冰冻天气的气候及变化特征. *冰川冻土*, 2015, 37(6): 1435-1442.
Zhang Z F, Xi S, Yu Y, et al. Climatic characteristics and variations of the gelivation weathers in China during 1961-2012. *J Glaciol Geocryol*, 2015, 37(6): 1435-1442.
- [28] 李杰, 郭学良, 周晓宁, 等. 2011—2013 年中国冻雨、冻毛毛雨和冻雾的特征分析. *大气科学*, 2015, 39(5): 1038-1048.
Li J, Guo X L, Zhou X N, et al. Characteristics of freezing rain, freezing drizzle, and freezing fog in China from 2011 to 2013. *Chin J Atmos Sci*, 2015, 39(5): 1038-1048.
- [29] 欧建军, 周毓荃, 杨棋, 等. 我国冻雨时空分布及温湿结构特征分析. *高原气象*, 2011, 30(3): 692-699.
Ou J J, Zhou Y Q, Yang Q, et al. Analyses on spatial-temporal distributions and temperature-moisture structure of freezing rain in China. *Plateau Meteor*, 2011, 30(3): 692-699.
- [30] 漆梁波. 我国冬季冻雨和冰粒天气的形成机制及预报着眼点. *气象*, 2012, 38(7): 769-778.
Qi L B. Formation mechanism and forecast on freezing rain and ice pellet in winter of China. *Meteor Mon*, 2012, 38(7): 769-778.
- [31] 刘玉莲, 任国玉, 于宏敏, 等. 我国强降雪气候特征及其变化. *应用气象学报*, 2013, 24(3): 304-313.
Liu Y L, Ren G Y, Yu H M, et al. Climatic characteristics of intense snowfall in China with its variation. *J Appl Meteor Sci*, 2013, 24(3): 304-313.
- [32] 张志富, 希爽, 刘娜, 等. 1961—2012 年中国降雪时空变化特征分析. *资源科学*, 2015(9): 83-91.
Zhang Z F, Xi S, Liu N, et al. Snowfall change characteristics in China from 1961 to 2012. *Resour Sci*, 2015(9): 83-91.
- [33] Qian X, Miao Q L, Zhai P M, et al. Cold-wet spells in mainland China during 1951-2011. *Natural Hazards*, 2014, 74(2): 931-946.
- [34] Meisinger C L. The precipitation of sleet and the formation of glaze in the eastern United States, January 20 to 25, 1920, with remarks on forecasting. *Mon Wea Rev*, 1920, 48: 73-80.
- [35] Thériault J M, Stewart R E, Milbrandt J A, et al. On the simulation of winter precipitation types. *J Geophys Res Atmos*, 2006, 111(D18202): 1-11.
- [36] Kain J S, Goss S M, Baldwin M E. The melting effect as a factor in precipitation-type forecasting. *Wea Forecasting*, 2000, 12(15): 700-714.
- [37] Rauber R M, Olthoff L S, Ramamurthy M K, et al. The relative importance of warm rain and melting processes in freezing Precipitation events. *J Appl Meteor*, 2000, 39(7): 1185-1195.
- [38] Brooks C F. The nature of sleet and how it is formed. *Mon Wea Rev*, 1920, 48: 69-73.
- [39] Henry A J. The great glaze storm of 21-23 February 1922 in the upper lake region: Discussion of general conditions. *Mon Wea Rev*, 1922, 50: 77-82.
- [40] Huffman G J, Norman Jr G A. The supercooled warm rain process and the specification of freezing precipitation. *Mon Wea Rev*, 1988, 116(11): 2172-2182.
- [41] Stewart R E. Precipitation types in the transition region of winter storms. *Bull Amer Meteor Soc*, 1992, 73(3): 287-296.
- [42] 于晓晶. 山东半岛冷流暴雪过程的环境条件分析与数值模拟研究. 北京: 中国气象科学研究院, 2013.
Yu X J. Environmental Conditions and Numerical Simulation of a Cold-air Snowstorm Event in Shandong Peninsula. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2013.
- [43] 杨成芳, 陶祖钰, 李泽椿. 海(湖)效应降雪的研究进展. *海洋通报*, 2009, 28(4): 81-88.
Yang C F, Tao Z Y, Li Z C. Overview of research on ocean (lake)-effect snow. *Mar Sci Bull*, 2009, 28(4): 81-88.
- [44] Burnash R J, Hug F E. Predicting Precipitation Types. US Department of Commerce, Environmental Science Services Administration, Weather Bureau, Western Region, 1970.
- [45] 郭志广. 冻雨的分析及预报. *气象*, 1978(10): 10.

- Guo Z G. Analysis and forecast of freezing rain. *Meteor Mon*, 1978(10):10.
- [46] La Chapelle E. Snow Layer Densification. Project Progress Report No. 1, Alta Avalanche Study Center, US Department of Agriculture Forest Service, 1961.
- [47] Olsen A. Snow or Rain? A Matter of Wet-bulb Temperature. Examensarbete vid institutionen för geovetenskaper, ISSN 1650-6553 Nr 48, 2003[2020-08-03]. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2;968860/FULLTEXT01.pdf>.
- [48] Heppner P O G. Snow versus rain: Looking beyond the “magic” numbers. *Wea Forecasting*, 1992, 7(4): 683-691.
- [49] Bocchieri J R. A new operational system for forecasting precipitation type. *Mon Wea Rev*, 1979, 107(6): 637-649.
- [50] Glahn H R, Bocchieri J R. Objective estimation of the conditional probability of frozen precipitation. *Mon Wea Rev*, 1975, 103(1): 3-15.
- [51] Keeter K K, Cline J W. The objective use of observed and forecast thickness values to predict precipitation type in North Carolina. *Wea Forecasting*, 1991, 6(4): 456-469.
- [52] 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. *高原气象*, 2013, 32(6): 1780-1786.
Zhang L N, Guo R, Zeng J, et al. Research on discrimination criterion of precipitation types in Beijing in winter. *Plateau Meteor*, 2013, 32(6): 1780-1786.
- [53] 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. *气象*, 2015, 41(4): 464-473.
Sui Y X, Yang J T, Wang J, et al. Preliminary study about the forecasting of winter precipitation types in Dalian. *Meteor Mon*, 2015, 41(4): 464-473.
- [54] 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. *干旱气象*, 2016, 34(1): 51-57.
Duan Y X, Li D Q, Li D W, et al. Analysis on precipitation phase characteristics and its forecast methods of Shenyang. *J Arid Meteor*, 2016, 34(1): 51-57.
- [55] 徐辉, 宗志平. 一次降水相态转换过程中温度垂直结构特征分析. *高原气象*, 2014, 33(5): 1272-1280.
Xu H, Zong Z P. Analysis on characteristics of thermal vertical structure evolution during the transition of precipitation type in winter. *Plateau Meteor*, 2014, 33(5): 1272-1280.
- [56] 曹钢锋, 张善君, 朱官忠, 等. 山东天气分析与预报. 北京: 气象出版社, 1988.
Cao G F, Zhang S J, Zhu G Z. Weather Analysis and Forecast in Shandong Province. Beijing: China Meteorological Press, 1988.
- [57] 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. *气象*, 2006, 32(3): 49-55.
Xu A H, Qiao L, Zhan F X, et al. Diagnosis of a cold wave weather event in March 2005. *Meteor Mon*, 2006, 32(3): 49-55.
- [58] 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. *气象*, 2009, 35(7): 88-94.
Li J B, Li G E, Pei Y J, et al. Analysis on the phase transformation of precipitation during a strong cold wave happened in spring. *Meteor Mon*, 2009, 35(7): 87-94.
- [59] 孙欣, 蔡芎宁, 陈传雷, 等. “070304”东北特大暴雪的分析. *气象*, 2011, 37(7): 863-870.
Sun X, Cai X N, Chen C L, et al. Analysis of the 4 March 2007 heavy snowstorm in northeast China. *Meteor Mon*, 2011, 37(7): 863-870.
- [60] 漆梁波, 张瑛. 中国东部地区冬季降水相态的识别判据研究. *气象*, 2012, 38(1): 96-102.
Qi L B, Zhang Y. Research on winter precipitation types' discrimination criterion in eastern China. *Meteor Mon*, 2012, 38(1): 96-102.
- [61] 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. *气象*, 2013, 39(3): 355-361.
Yang C F, Jiang P, Zhang S L, et al. Analysis on temperature of precipitation types in cold seasons in Shandong. *Meteor Mon*, 2013, 39(3): 355-361.
- [62] 张南, 裴宇杰, 刘亮, 等. 一次晚春降水相态变化特征及成因. *干旱气象*, 2014, 32(2): 275-280.
Zhang N, Pei Y J, Liu L, et al. Characteristic of phase conversion and its cause on a rainfall process in late spring. *J Arid Meteor*, 2014, 32(2): 275-280.
- [63] 尤凤春, 郭丽霞, 史印山, 等. 北京降水相态判别指标及检验. *气象与环境学报*, 2013, 29(5): 49-54.
You F C, Guo L X, Shi Y S, et al. Discrimination index of precipitation phase state and its verification in Beijing. *J Meteor Environ*, 2013, 29(5): 49-54.
- [64] 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. *气象科学*, 2013, 33(3): 325-332.
Sun Y, Yan W L, Yin D P, et al. Climatic characteristics and forecast of precipitation phase in winter of Jiangsu. *J Meteor Sci*, 2013, 33(3): 325-332.
- [65] Thériault J M, Rasmussen R, Smith T, et al. A case study of processes impacting precipitation phase and intensity during the Vancouver 2010 Winter Olympics. *Wea Forecasting*, 2012, 27(6): 1301-1325.
- [66] Murray R. Rain and snow in relation to the 1000—700 mb and 1000—500 mb thickness and the freezing level. *Meteorological Magazine*, 1952, 81: 5-8.
- [67] Pandolfo J P. An objective method for forecasting precipitation type during the winter months at New York City. *Bull Amer Meteor Soc*, 1957, 38(10): 571-574.
- [68] Lumb F E. Cotswolds snowfall of 1 November, 1942. *Meteorological Magazine*, 1960, 89(1): 11-16.
- [69] Booth B J. A simplified snow predictor. *Meteorological Magazine*, 1973, 102: 332-340.
- [70] 黄玉霞, 王宝鉴, 肖玮, 等. 复杂地形条件下的降水相态预报指标研究. *干旱区地理*, 2016, 39(3): 521-529.
Huang Y X, Wang B J, Xiao W, et al. Precipitation phase state forecasting indicators under the complex topography condition. *Arid Land Geography*, 2016, 39(3): 521-529.
- [71] Bourgoïn P. A method to determine precipitation types. *Wea Forecasting*, 2000, 15(5): 583-592.
- [72] 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. 气象与减灾研究, 2015, 38(4): 54-59.
- Xia Q Y, Qian Z C, Tang Q H, et al. Researches on typing features of vertical temperature profiles of winter precipitation types. *Meteor Disaster Reduction Res*, 2015, 38(4): 54-59.
- [73] Thériault J M, Stewart R E. A parameterization of the microphysical processes forming many types of winter precipitation. *J Atmos Sci*, 2010, 67(5): 1492-1508.
- [74] Hux J D, Knappenberger P C, Michaels P J, et al. Development of a Discriminant Analysis Mixed Precipitation (DAMP) forecast model for mid-Atlantic winter storms. *Wea Forecasting*, 2001, 16(2): 248-259.
- [75] 崔锦, 周晓珊, 陈力强, 等. 利用 WRF 模式制作东北地区冬季降水相态预报. 气象与环境学报, 2011, 27(6): 1-6.
- Cui J, Zhou X S, Chen L Q, et al. Forecasting of winter precipitation phase state in northeast China based on WRF mesoscale model. *J Meteor Environ*, 2011, 27(6): 1-6.
- [76] 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. 干旱气象, 2017, 35(5): 822-829.
- Shi W H, Wang L, Han F, et al. Research on winter precipitation type forecast model in Liaocheng of Shandong Province based on physical parameters. *J Arid Meteor*, 2017, 35(5): 822-829.
- [77] 刘建勇, 顾思南, 徐迪峰. 南方两次降雪过程的降水相态模拟研究. 高原气象, 2013, 32(1): 179-190.
- Liu J Y, Gu S N, Xu D F. Simulation study on precipitation phase state in two snowfall processes of south China. *Plateau Meteor*, 2013, 32(1): 179-190.
- [78] Cheng C S, Auld H, Li G, et al. An automated synoptic typing procedure to predict freezing rain: An application to Ottawa, Ontario, Canada. *Wea Forecasting*, 2004, 19(4): 751-768.
- [79] Bocchieri J R, Maglaras G J. An improved operational system for forecasting precipitation type. *Mon Wea Rev*, 1983, 111(3): 405-419.
- [80] Wetzel S W, Martin J E. An operational ingredients-based methodology for forecasting midlatitude winter season precipitation. *Wea Forecasting*, 2001, 16(1): 156-167.
- [81] Cuvillo M P. A Model for Refining Precipitation-type Forecasts for Winter Weather in the Piedmont Region of North Carolina on the Basis of Partial Thickness and Synoptic Weather Patterns. Dissertations & Theses-Gradworks, 2007.
- [82] 马晓刚, 曲晓波, 李月安, 等. 冻雨落区基本概念模型的研究与建立. 气象, 2010, 36(9): 68-73.
- Ma X G, Qu X B, Li Y A, et al. Research and establishment of the basic conceptual model of freezing rain falling zone. *Meteor Mon*, 2010, 36(9): 68-73.
- [83] Czys R R, Scott R W, Tang K C, et al. A physically based, nondimensional parameter for discriminating between locations of freezing rain and ice pellets. *Wea Forecasting*, 1996, 11(4): 591-600.
- [84] Zerr R J. Freezing rain: An observational and theoretical study. *J Appl Meteor*, 1997, 36(12): 1647-1661.
- [85] Manikin G S. An Overview of Precipitation Type Forecasting Using NAM and SREF Data, 21st Conf on Weather Analysis and Forecasting. Amer Meteor Soc, 2005.
- [86] Thériault J M, Hung I, Vaquer P, et al. Precipitation characteristics and associated weather conditions on the eastern slopes of the Canadian Rockies during March—April 2015. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2018, 22(8): 4491-4512.
- [87] Marshall J S, Palmer W M. The distribution of raindrops with size. *J Meteor*, 1948, 5(4): 165-166.
- [88] Tremblay A, Glazer A. An improved modeling scheme for freezing precipitation forecasts. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(5): 1289-1308.
- [89] 郭欣, 郭学良, 陈宝君, 等. 一次大冰雹形成机制的数值模拟. 应用气象学报, 2019, 30(6): 651-664.
- Guo X, Guo X L, Chen B J, et al. Numerical simulation on the formation of large-size hailstones. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(6): 651-664.
- [90] Thériault J M, Stewart R E, Henson W. On the dependence of winter precipitation types on temperature, precipitation rate, and associated features. *J Appl Meteor Climatol*, 2010, 49(7): 1429-1442.
- [91] Lackmann G M, Keeter K, Lee L G, et al. Model representation of freezing and melting precipitation: Implications for winter weather forecasting. *Wea Forecasting*, 2002, 17(5): 1016-1033.
- [92] Minder J R, Durran D R, Roe G H. Mesoscale controls on the mountainside snow line. *J Atmos Sci*, 2011, 68(9): 2107-2127.
- [93] Woods C P, Stoelinga M T, Locatelli J D. The IMPROVE-1 storm of 1—2 February 2001. Part III: Sensitivity of a mesoscale model simulation to the representation of snow particle types and testing of a bulk microphysical scheme with snow habit prediction. *J Atmos Sci*, 2007, 64(11): 3927-3948.
- [94] Thériault J M, Stewart R E. On the effects of vertical air velocity on winter precipitation types. *Nat Hazard Earth Sys*, 2007, 7: 231-242.
- [95] Barszcz A, Milbrandt J A, Thériault J M. Improving the explicit prediction of freezing rain in a kilometer-scale numerical weather prediction model. *Wea Forecasting*, 2018, 33(3): 767-782.
- [96] Schuur T J, Park H S, Ryzhkov A V, et al. Classification of precipitation types during transitional winter weather using the RUC Model and polarimetric radar retrievals. *J Appl Meteor*, 2012, 51(4): 763-779.
- [97] Benjamin S G, Brown J M, Smirnova T G. Explicit precipitation-type diagnosis from a model using a mixed-phase bulk cloud-precipitation microphysics parameterization. *Wea Forecasting*, 2016, 31(2): 609-619.
- [98] Thompson G, Rasmussen R M, Manning K. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. *Mon Wea Rev*, 2004, 132(2): 519-542.
- [99] Baldwin M, Treadon R, Contorno S. Precipitation Type Prediction Using a Decision tree Approach with NMCs Mesoscale eta Model // Proceedings 10th Conference on Numerical Weather Prediction. Amer Meteor Soc, 1994: 30-31.

- [100] Ramer J. An Empirical Technique for Diagnosing Precipitation type from Model Output//Fifth Int Conf on Aviation Weather Systems. *Amer Meteor Soc*, 1993; 227-230.
- [101] Reeves H D. The uncertainty of precipitation-type observations and its effect on the validation of forecast precipitation type. *Wea Forecasting*, 2016, 31(6): 1961-1971.
- [102] Robbins C C, Cortinas Jr J V. Local and synoptic environments associated with freezing rain in the contiguous United States. *Wea Forecasting*, 2002, 17(1): 47-65.
- [103] Bernstein B C. Regional and local influences on freezing drizzle, freezing rain, and ice pellet events. *Wea Forecasting*, 2000, 15(5): 485-508.
- [104] Roebber P J, Gyakum J R. Orographic influences on the mesoscale structure of the 1998 ice storm. *Mon Wea Rev*, 2003, 131(1): 27-50.
- [105] 常婉婷, 高文华, 端义宏, 等. 云微物理过程对台风数值模拟的影响. *应用气象学报*, 2019, 30(4): 443-455.
Chang W T, Gao W H, Duan Y H, et al. The impact of cloud microphysical processes on typhoon numerical simulation. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(4): 443-455.
- [106] 张萌, 于海鹏, 黄建平, 等. GRAPES_GFS 2.0 模式非系统误差评估. *应用气象学报*, 2019, 30(3): 332-344.
Zhang M, Yu H P, Huang J P, et al. Assessment on unsystematic errors of GRAPES_GFS 2.0. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(3): 332-344.
- [107] 王成鑫, 高守亭, 冉令坤, 等. 四川地形扰动对降水分布影响. *应用气象学报*, 2019, 30(5): 586-597.
Wang C X, Gao S T, Ran L K, et al. Effects of topographic perturbation on the precipitation distribution in Sichuan. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(5): 586-597.
- [108] 危国飞, 刘会军, 吴启树, 等. 多模式降水分级最优权重集成预报技术. *应用气象学报*, 2020, 31(6): 668-680.
Wei G F, Liu H J, Wu Q S, et al. Multi-model consensus forecasting technology with optimal weight for precipitation intensity levels. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(6): 668-680.
- [109] 董全, 张峰, 宗志平. 基于 ECMWF 集合预报产品的降水相态客观预报方法. *应用气象学报*, 2020, 31(5): 527-542.
Dong Q, Zhang F, Zong Z P. Objective precipitation type forecast based on ECMWF ensemble prediction product. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(5): 527-542.
- [110] 陈昱文, 黄小猛, 李熠, 等. 基于 ECMWF 产品的站点气温预报集成学习误差订正. *应用气象学报*, 2020, 31(4): 494-503.
Chen Y W, Huang X M, Li Y, et al. Ensemble learning for bias correction of station temperature forecast based on ECMWF products. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(4): 494-503.
- [111] 智协飞, 赵忱. 基于集合成员订正的强降水多模式集成预报. *应用气象学报*, 2020, 31(3): 303-314.
Zhi X F, Zhao C. Heavy precipitation forecasts based on multi-model ensemble members. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(3): 303-314.
- [112] Cortinas J V, Brill K F, Baldwin M E. Probabilistic Forecasts of Precipitation Type. 16th Conf on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences. *Amer Meteor Soc*, 2012.
- [113] Manikin G S, Brill K F, Ferrier B. An Eta Model Precipitation Type Mini-ensemble for Winter Weather Forecasting. 16th Conf on Numerical Weather Prediction. *Amer Meteor Soc*, 2004.
- [114] Scheuerer M, Gregory S, Hamill T M, et al. Probabilistic precipitation-type forecasting based on GEFS ensemble forecasts of vertical temperature profiles. *Mon Wea Rev*, 2017, 145(4): 1401-1412.
- [115] Forbes R, Tsonevsky I, Hewson T, et al. Towards predicting high-impact freezing rain events. *ECMWF Newsletter*, 2014, 141: 15-21.
- [116] Gascón E, Hewson T, Haiden T. Improving predictions of precipitation type at the surface: Description and verification of two new products from the ECMWF ensemble. *Wea Forecasting*, 2018, 33(1): 89-108.
- [117] ECMWF. ECMWF IFS Documentation Cy43R1, Part IV: Physical Processes, 2016: 118-120.
- [118] 董全, 胡宁, 宗志平. ECMWF 降水相态预报产品 (PTYPE) 应用和检验. *气象*, 2020, 46(9): 1210-1221.
Dong Q, Hu N, Zong Z P. Application and verification of the ECMWF precipitation type forecast product (PTYPE). *Meteor Mon*, 2020, 46(9): 1210-1221.
- [119] Moon Seung-Hyun, Kim Yong-Hyuk. An improved forecast of precipitation type using correlation-based feature selection and multinomial logistic regression. *Atmos Res*, 2020, 240, 104928.
- [120] 董全, 黄小玉, 宗志平. 人工神经网络法和线性回归法对降水相态的预报效果对比. *气象*, 2013, 39(3): 324-332.
Dong Q, Huang X Y, Zong Z P. Comparison of artificial neural network and linear regression methods in forecasting precipitation types. *Meteor Mon*, 2013, 39(3): 324-332.
- [121] 彭霞云, 裴薇, 李文娟, 等. 数据挖掘技术用于降水相态判别的尝试. *科技通报*, 2018, 34(1): 44-47.
Peng X Y, Qiu W, Li W J, et al. Apply the data digging technique on discerning the precipitation type. *Bull Sci Technol*, 2018, 34(1): 44-47.
- [122] 李颖, 陈怀亮. 机器学习技术在现代农业气象中的应用. *应用气象学报*, 2020, 31(3): 257-266.
Li Y, Chen H L. Review of machine learning approaches for modern agrometeorology. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(3): 257-266.

A Review on Stable Precipitation Type Forecast in Winter

Zhao Linna¹⁾²⁾ Mu Xiuxiang¹⁾³⁾ Ma Cuiping⁴⁾ Wang Xiujuan³⁾ Li Dihua⁵⁾

¹⁾ (*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

²⁾ (*Union Centre for Extreme Weather, Climate and Hydrogeological Hazards, China Meteorological Administration-China University of Geosciences, Wuhan 430074*)

³⁾ (*Jilin Provincial Meteorological Observatory, Changchun 130062*)

⁴⁾ (*Hebei Environmental Meteorological Center, Shijiazhuang 050021*)

⁵⁾ (*Chayu County Meteorological Observatory of Xizang, Chayu 860600*)

Abstract

The accurate identification of precipitation type at ground level is one of the greatest difficulties for forecasters during winter. Special types of precipitation can be a threat to public safety and human health and can disrupt transportation and commerce, causing seriously loss of the economy. Winter precipitation may also cause serious disasters to aircraft navigation. In those situations, the consequences can be catastrophic, with heavy and prolonged freezing precipitation, collapsed power lines causing prolonged power outages, transportation networks of many types completely paralyzed, and even major long-term damage to infrastructure and vegetation in the most severe cases. Therefore, the accuracy of precipitation type is crucial for winter precipitation forecast. Accurate predictions from weather forecast models of timing (onset and duration), intensity, spatial extent, and phase (i. e. , precipitation type) are crucial for decision-making and can help minimize the potential impacts. The research progress of precipitation type forecast in recent decades is investigated. The methods and techniques for predicting precipitation phases are reviewed systematically, which can be roughly divided into three categories. The index criterion methods are based on observations, numerical weather prediction weather predictions on thickness, area of warm atmosphere, significance level temperature, regression equation for vertical temperature profile, and model diagnosis. Some of those methods are highly dependent on the accuracy of the numerical model. The second type of methods are based on the microphysical processing scheme of numerical weather prediction model and ensemble prediction system. It includes microphysical scheme method and ensemble prediction method. The last type is the artificial intelligence prediction method including decision tree, artificial neural network, and deep learning etc. In recent years, sophisticated microphysical parameterizations schemes are widely used in high resolution regional forecast models, which help with precipitation-type prediction. The forecast accuracy of precipitation type model has been improved, which has become an important product support in precipitation type forecast. For instance, the precipitation type prediction product of ECMWF and the probabilistic prediction of precipitation type by ECMWF ensemble prediction. The probabilistic prediction has further improved the prediction skills compared with the deterministic model. However, even with such complex algorithms of NWP, correctly predicting what phase of precipitation ends up at the ground remains a challenging task. Besides this, many researches on the formation mechanism of microphysical processes are difficult to be applied to the precipitation type prediction, so it still needs continuous efforts to apply these achievements to improve the precipitation type prediction skill of numerical prediction model and increase the accuracy of precipitation type prediction by artificial intelligence and other technologies.

Key words: precipitation type; winter precipitation; prediction method