

董全, 胡宁, 宗志平, 2020. ECMWF 降水相态预报产品 (PTYPE) 应用和检验 [J]. 气象, 46(9): 1210-1221. Dong Q, Hu N, Zong Z P, 2020. Application and verification of the ECMWF precipitation type forecast product (PTYPE) [J]. Meteor Mon, 46(9): 1210-1221 (in Chinese).

ECMWF 降水相态预报产品 (PTYPE) 应用和检验^{*}

董 全 胡 宁 宗志平

国家气象中心, 北京 100081

提 要: 运用我国 2016—2018 年三个冬半年 (10 月至次年 3 月) 地面 2515 个站的天气现象观测资料, 对 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 的降水相态预报产品 (PTYPE) (分为雨、雨夹雪、雪和冻雨四类) 进行了系统性的检验评估, 包括细网格确定性模式预报产品和集合预报系统概率预报产品。结果显示, ECMWF 的确定性预报产品对四类降水相态的正确率普遍达到 90% 以上, 对降雨和降雪的 TS 评分也较高, 冻雨次之, 雨夹雪的 TS 评分较低, 预报能力有限。确定性模式对我国雨雪分界线的预报, 普遍存在短期位置略偏南、中期时效延长越来越偏北的误差特点, 且对雨夹雪的预报范围明显偏小, 对冻雨的预报范围明显偏大。集合预报系统从概率的角度一定程度上弥补了确定性模式的上述误差。对概率预报的检验结果显示, 集合预报系统降雨概率普遍偏低, 降雪概率短期偏高、中期偏低, 而雨夹雪和冻雨概率普遍偏低, 但是都有一定的预报技巧。集合预报系统相对于确定性模式的优势, 降雨体现在较小花费损失比事件的预报上, 降雪体现在较大花费损失比事件的预报上。对雨夹雪和冻雨, 相对于确定性模式, 集合预报系统体现出了显著的优势, 尤其是冻雨, 集合预报系统的优势更加明显。

关键词: ECMWF, 降水相态预报产品 (PTYPE), 雨雪分界线, 检验

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.09.008

Application and Verification of the ECMWF Precipitation Type Forecast Product (PTYPE)

DONG Quan HU Ning ZONG Zhiping

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: The ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) precipitation type forecast products (PTYPE) were verified using the weather observations of more than 2000 stations in China over the winter months (October to the next March) during 2016—2018. The products include the deterministic forecasts from high-resolution model (HRD) and the probability forecasts from ensemble prediction system (EPS) and the verified precipitation types include rain, sleet, snow and freezing rain. The results show that the accuracy of deterministic forecasts of ECMWF HRD is mostly higher than 90% and the TSs of rain and snow are the highest, followed by the TS of freezing rain, and the TS of sleet is lower, which indicates that the forecast skill of sleet is limited. The rain and snow dividing line of deterministic forecasts shows the errors of a little southward in short range forecast and more and more significant northward following elongating lead times in medium range forecast. The area of sleet forecast is smaller than observations and the area of freezing rain forecast is bigger for the HRD forecast. The EPS offsets these errors partly by probability forecast. The probability forecast of rain from the EPS is smaller than

^{*} 国家科技支撑计划 (2015BAC03B03 和 2015BAC03B01) 及国家重点研发计划 (2017YFC1502004) 共同资助

2019 年 7 月 31 日收稿; 2020 年 3 月 6 日收修定稿

第一作者: 董全, 主要从事天气预报和天气预报技术的研究. E-mail: dongquan@cma.gov.cn

the observation frequency and the probability forecast of snow is larger in short range and smaller in medium range forecasts than the observation frequency. However, there are some forecast skills for all of these probability forecasts. There are advantages of EPS compared to the HRD. For rain and snow, for some special cost/loss ratio events the EPS is better than the HRD. For sleet and freezing rain, the EPS is better than the HRD significantly, especially for the freezing rain.

Key words: ECMWF, precipitation type forecast product (PTYPE), rain and snow dividing line, verification

引言

降水相态的预报是冬半年天气预报中的重点。但是由于降水相态与整层大气的温度和湿度的层结曲线有关(董全等,2011),而且对气温非常敏感(Thériault et al,2010),所以一直以来都是预报中的难点,尤其对于雨夹雪或雨雪分界线的预报,预报准确率普遍较低。

降水相态的预报方法,基本分为两类。一类是模式输出,包括模式直接从微物理过程输出,或者根据降雪量和总降水量的比例转换而来,或者基于简单的物理模型诊断输出(Forbes et al,2014)。另一类是客观预报方法,主要是基于数值模式的 MOS 方法或者回归模型。早期由于数值模式对降水等地面要素的预报能力较低,所以无论是降水相态的确定性还是概率预报,后一类方法得到了极大的发展和应用(Bocchieri,1979)。近年来随着数值模式时空分辨率和预报能力的不断提高,基于数值模式后处理技术的降水相态客观预报技术得到了进一步的发展和应用(Allen and Erickson,2001; Allen,2001)。例如,Scheuerer et al(2017)基于美国 GEFS 集合预报系统,运用垂直温度廓线判别的方法,开发了降水相态预报的概率预报方法。同时机器学习等算法也被引入进来,董全等(2013)运用人工神经网络方法,基于数值模式输出产品,开发了中国区域的雨雪相态的客观预报模型和产品。

另一方面,随着数值模式的发展,对降水相态预报产品的开发,也逐渐成为一个主要的发展方向。ECMWF 模式,在本身输出产品的基础上,考虑降水粒子下落过程中的相态转化过程,开发了降水相态预报产品(PTYPE)(ECMWF,2016),且在预报业务应用中表现出较好的预报效果。本文运用大样本统计的方法,结合个例检验,对 ECMWF 细网格模式(HRD)和集合预报系统(EPS)此类产品的确

定性和概率预报结果进行系统性的评估和检验,以推动 PTYPE 产品在国内降水相态预报业务中的应用。

1 资料和方法

1.1 ECMWF 降水相态预报产品简介

ECMWF 的综合预报系统(Integrated Forecasting System,IFS),在其 2015 年 5 月业务化的 41r1 版本中,改进了云和降水物理过程,通过对温湿层结曲线的预报,以及降水粒子在下落过程中的融合和再冻结物理过程的参数化描述,可以定量地诊断到达地面的固态水、液态水和过冷却水的含量,从而可以对雨、雪、冻雨等天气现象进行定量化的预报(Forbes et al,2014)。表 1 所示为 IFS 系统输出的降水相态预报产品(PTYPE)所包含的天气现象及其标识数字,以及判别条件,除无降水外,可预报雨、干雪、湿雪、雨夹雪、冻雨和冰粒共六类天气现象(ECMWF,2016)。雨、雨夹雪和湿雪都发生在地面 2 m 气温大于 0℃时,以地面的液态水占比(80%和 20%)为判别标准。当整层气温都小于 0℃时,降水粒子不发生相态转换,为干雪。冻雨和冰粒发生的气温层结类似,都需要高空有暖层和近地面的冷层存在,要求地面 2 m 气温都小于 0℃,此时降水粒子经过暖层的融化后,液态水的含量成为一个关键因子。如果粒子中还有冰核存在,则经过冷层时会快速冻结,最后以冰粒的形式降落,如果无冰核或冰核过少,则冻结较慢,最后会以过冷水的形式降落形成冻雨(Forbes et al,2014)。可见,要想对冻雨和冰粒进行很好的预报,不仅要准确预报气温层结、不同高度的水粒子分布,而且要准确刻画粒子经过暖层和冷层时的融化和再冻结过程。所以对冻雨和冰粒的预报难度很大,预报技巧很低,尤其冰粒,Gascón et al(2018)的评估检验结果显示,ECMWF 模式对其几乎无预报技巧。

表 1 ECMWF IFS 系统降水相态预报产品 PTYPE 及其判别条件

Table 1 ECMWF IFS system PTYPE product and its criterias		
降水相态	标识数字	判别条件
无降水	0	总降水量为 0 mm
雨	1	2 m 气温>0℃,地面液态水含量>80%
冻雨	3	2 m 气温<0℃,暖层底液态水含量>80%,地面液态水含量≥20%
干雪	5	整层气温<0℃
湿雪	6	2 m 气温>0℃,地面液态水含量<20%
雨夹雪	7	2 m 气温>0℃,地面液态水含量≥20%且≤80%
冰粒	8	2 m 气温<0℃,暖层底液态水含量<80%

此外,在 IFS 模式对冻雨的诊断中存在缺陷。它只考虑了有暖层和冷层分布时的冻雨,对于无暖层由过冷水直接接地形成冻雨的单层模式并无考虑(Gascón et al,2018),所以在对我国西南地区单层模式下的冻雨预报时需要注意该缺陷(欧建军等,2011)。

1.2 资 料

运用 2016—2018 年的冬半年(即 10 月至次年 3 月)全国 2515 多基本站点,3 h 间隔的天气现象实况观测资料,以及 ECMWF IFS 系统中的 HRD 和 EPS 相同时期的 PTYPE 预报资料,对 PTYPE 确定性和概率预报进行检验评估。由于在实况观测中无湿雪的天气现象观测,所以在检验中将干雪和湿雪归为一类。冰粒发生频率很低,且在欧洲的评估检验结果显示(Gascón et al,2018)几乎无预报技巧,但是冰粒和冻雨发生时的温湿层结非常接近(漆梁波,2012),所以将冰粒和冻雨归为一类进行检验。下文提到的雪都为干雪和湿雪,冻雨为冻雨和冰粒。

ECMWF 在预报无降水的地方无降水相态预报,所以降水量预报(QPF)的误差会影响到降水相态的预报误差。目前国内在 QPF 客观预报方面取得了较大的进展(代刊等,2018;毕宝贵等,2016),但是在降水相态的客观预报方面进展缓慢。同时为了简化问题,将相态的预报分解为 QPF 和降水相态预报两个问题进行研究。所以本文只检验评估模式预报和实况都出现降水的站点。因此检验四分类事

件,分别为雨、雨夹雪、雪(包括干雪和湿雪)和冻雨(包括冻雨和冰粒)。实况也只针对以上四类天气现象进行评估,在实况中剔除雷暴等引起的降雨、冰雹等天气现象。

2016—2018 年的冬半年,在我国地面 2515 个站点逐 3 h 的地面观测中共有降雨样本 357560 个,雨夹雪样本 8380 个,降雪样本 68940 个,冻雨样本 1838 个,其中包含冰粒样本 8 个。可见冰粒样本过少,单独对其进行检验无意义。冬半年频数最低的是冻雨,其次是雨夹雪,降雨的频数最高,降雪次之。另外,白天 08 时、14 时和 20 时(北京时,下同)的样本量最多,其次是白天 11 时和 17 时,为前者的三分之一左右,夜间(02 时、05 时、23 时)的样本量最少,为 08 时的十分之一左右(图略)。样本量的差异,可能会影响到检验结果差异的可信度。

1.3 方 法

ECMWF HRD 的 PTYPE 为非连续性的离散值,其空间分辨率较高,为 0.125°,采用邻近格点的方法插值到站点上,EPS 的 PTYPE 概率预报结果为连续性的场变量,且其空间分辨率较低,为 0.5°,采用双线性插值方法将其插值到站点上(Accadia et al,2003)。

对于 HRD,为确定性预报四分类事件(Jolliffe and Stephenson,2003)的评估检验,事件如表 2 所示。

表 2 雨、雨夹雪、雪和冻雨预报检验的四分类列联表

Table 2 Contingency table for four categories of rain, sleet, snow and freezing rain					
		观测			
		雨	雨夹雪	雪	冻雨
预报	雨	a	e	f	g
	雨夹雪	h	b	i	j
	雪	k	l	c	m
	冻雨	n	o	q	d
观测边际概率		p_{01}	p_{02}	p_{03}	p_{04}

注:每一个要素都已经除以了样本总数(N)。

Note: Every element has been divided by sample number (N).

检验评估参数选择 TS 评分、Bias 评分、正确率(PC)和 HSS 评分,以上参数也是降水相态检验评估中较为常用的(Allen and Erickson, 2001; Allen, 2001),其中前两个检验参数分别将雨、雨夹雪、雪和冻雨转换为二分类事件进行计算,其计算公式在此不赘述。正确率为四分类事件的预报正确率,表示预报正确的样本数占总样本数的比例(Jolliffe and Stephenson, 2003),其计算公式为:

$$PC = a + b + c + d$$

HSS 评分为多分类事件的正确率的技巧评分,对比预报正确率相对于完全随机预报正确率的相对预报技巧(Jolliffe and Stephenson, 2003),其计算公式如下:

$$HSS = \frac{PC - (p_{01}p_{11} + p_{02}p_{12} + p_{03}p_{13} + p_{04}p_{14})}{1 - (p_{01}p_{11} + p_{02}p_{12} + p_{03}p_{13} + p_{04}p_{14})}$$

式中:完美预报的正确率为 1,随机预报的正确率为 $(p_{01}p_{11} + p_{02}p_{12} + p_{03}p_{13} + p_{04}p_{14})$,降雨的预报边际概率 $p_{11} = a + e + f + g$,降雨的观测边际概率 $p_{01} = a + h + k + n$,雨夹雪、雪和冻雨的边际概率以此类推。

对 EPS 的集合概率预报,采用可靠性曲线、ROC 和相对经济价值检验的方法。可靠性曲线是最基本的概率预报检验评估方法(Wilks, 1995; Jolliffe and Stephenson, 2003)。它通过对比预报概率和在这一预报概率下事件实际的发生频率,来评估二者是否一致,从而可以直观地反映出概率预报的性能和预报技巧,同时可以根据概率预报的频数分布特征,反映出概率预报系统对事件的辨析度(Gascón et al, 2018)。ROC 检验是取不同概率阈值时,绘制事件预报的命中率和空报率之间的关系变化曲线,是信号检测中最常用的检验方法,由于其不受预报模型系统性偏差的影响,所以在检验评估中被广泛应用(董全等, 2016; 2017)。相对经济价值的评估,从预报决策的角度出发,综合估计对事件漏报造成的损失、正确预报后可以避免的损失,以及空报时采取防范措施的花费,从经济价值最大化的角度,综合评价预报系统对于决策者的价值。由于概率预报更有利于相对经济价值最大化的科学决策,所以在 EPS 的检验评估(Allen and Eckel, 2012)、EPS 与 HRD 的对比中应用广泛(Richardson, 2000; 董全等, 2016)。

2 统计检验结果分析

2.1 细网格确定性模式统计检验评估

ECMWF HRD 对雨、雨夹雪、雪和冻雨的预报正确率和 HSS 评分分别普遍达 0.87 和 0.65 以上,短期时效内分别达 0.9~0.94 和 0.80 左右(图 1)。3 d(72 h)时效内的正确率和 HSS 基本恒定,从第 5 天开始,正确率和 HSS 评分随时效的延长,逐渐减小,且减小的幅度越来越大(图 1)。另外,正确率(图 1a)、HSS 评分(图 1b)和 TS 评分(图 2)呈现明显的日变化特征,无论是 08 时还是 20 时起报,白天的预报评分都普遍高于夜间。白天和夜间的正确率和 HSS 评分之差,达到 5% 左右的幅度,接近短期和中期预报评分之差的幅度。这一方面可能与模式预报性能的日变化特征有关,另一方面可能与夜间的观测样本少于白天有关。

从雨、雨夹雪、雪和冻雨各自的 TS 评分(图 2)来看,降雨的 TS 评分最高,基本在 0.88~0.94(图 2a),

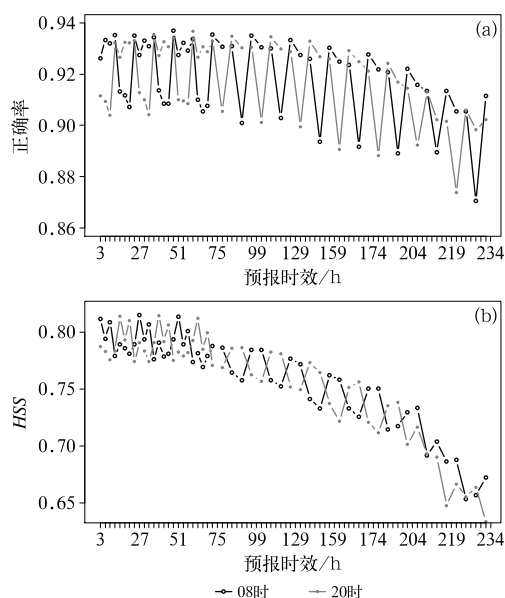


图1 ECMWF HRD 08 时和 20 时起报的雨、雨夹雪、雪和冻雨不同时效的预报正确率(a)和 HSS 评分(b)

Fig. 1 Forecast accuracy (a) and HSS (b) of ECMWF HRD precipitation type for rain, sleet, snow and freezing rain forecasts with different lead times at initial times of 08:00 BT and 20:00 BT

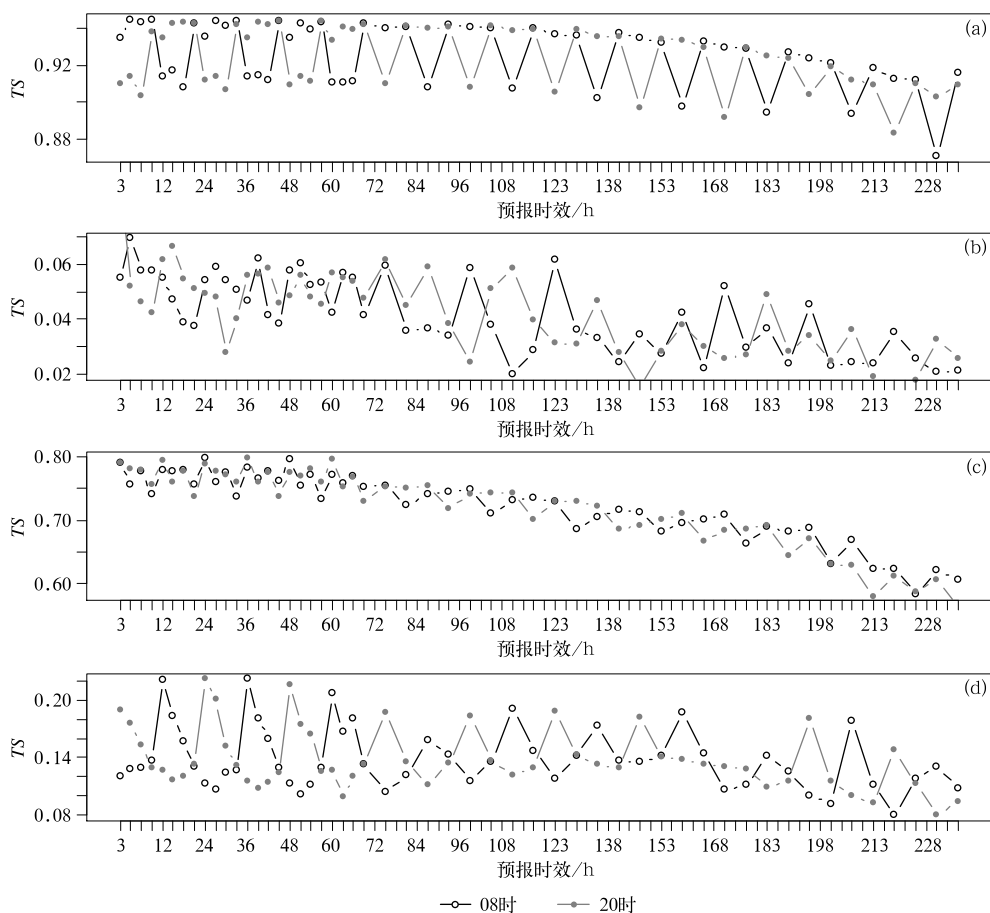


图 2 ECMWF HRD 08 时和 20 时起报的雨(a)、雨夹雪(b)、雪(c)和冻雨(d)不同时效的 TS 评分

Fig. 2 ECMWF HRD precipitation type forecast TS of rain (a), sleet (b), snow (c), and freezing rain (d) with different lead times at initial times of 08:00 BT and 20:00 BT

其次是降雪,在 0.60~0.80(图 2c),再其次是冻雨,在 0.10~0.22(图 2d),雨夹雪的 TS 评分最低,在 0.02~0.07(图 2b)。可见,对雨夹雪的预报能力最低,其次是冻雨,对降雨的预报能力最高。雨、雨夹雪和雪的 TS 评分随预报时效的延长明显降低,冻雨的 TS 评分随预报时效延长而降低的趋势较弱,说明冻雨短期和中期时效预报能力接近。

从各相态预报的 Bias 来看,降雨的 Bias 随时效延长逐渐增大,且略小于 1(图 3a),而降雪的 Bias 随时效延长逐渐减小,且略大于 1(图 3c)。雨夹雪的 Bias 明显小于 1,在 0.55 左右(图 3b),说明 HRD 对雨夹雪预报范围普遍偏小,而且随时效延长基本恒定。冻雨的 Bias 在 2 左右(图 3d),说明冻雨预报范围明显偏大。

从上述检验结果可见,ECMWF HRD 对降水

相态的预报存在以下特征:对降水相态的预报能力整体较好,尤其对于雨和雪,且二者的 Bias 接近 1;对冻雨也具有一定的预报能力,但预报范围显著偏大,且中期时效的预报性能与短期接近;对雨夹雪预报能力最弱,且范围明显偏小。

2.2 集合预报系统统计检验评估

图 4 所示为 ECMWF EPS 对雨、雨夹雪、雪和冻雨概率预报不同时效的可靠性曲线。由图可见,对降雨的概率预报,普遍存在预报概率较实况发生频率偏低的误差,同时可靠性偏低。从降雨概率的频数分布来看,短期时效内,降雨概率的辨析度很好,到 168 h 也有较好辨析度,但是到 240 h 时效,辨析度变差(图 4a)。相对而言,降雪(图 4c)的概率预报可靠性最好,但存在短期时效内概率预报略偏

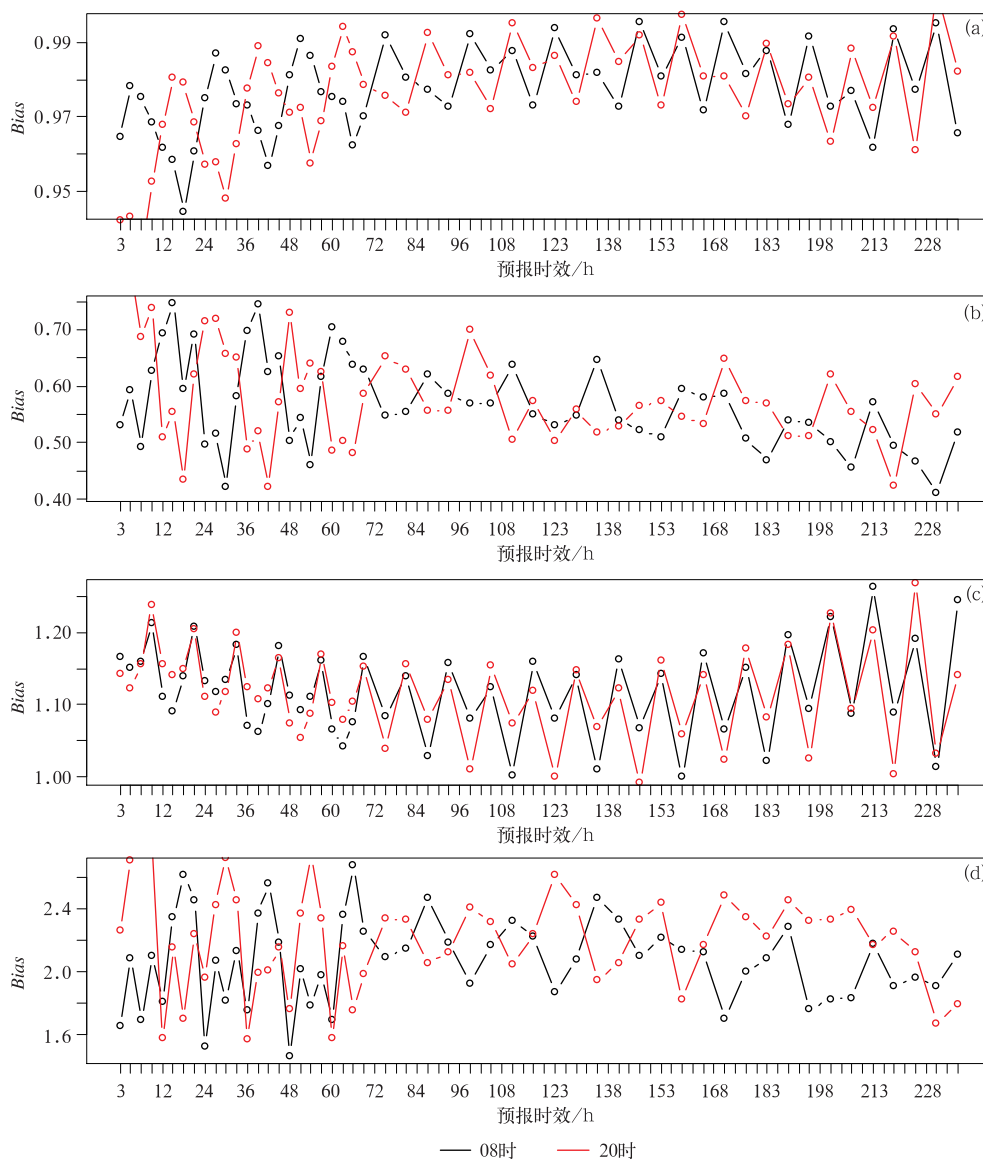


图3 ECMWF HRD08时和20时起报的雨(a)、雨夹雪(b)、雪(c)和冻雨(d)不同时效的Bias评分
Fig. 3 ECMWF HRD precipitation type forecast Bias of rain (a), sleet (b), snow (c) and freezing rain (d) with different lead times at initial times of 08:00 BT and 20:00 BT

高,中期时效内概率预报略偏低的误差特征。从降雪概率的频数分布来看,不同时效降雪概率预报的辨析度都较好(图4c)。冻雨(图4d)和雨夹雪(图4b)的概率预报可靠性较低,而且都表现出预报概率普遍偏高的误差特征。但是二者不同时效的概率预报辨析度都较高。值得关注的是,虽然二者的可靠性较低,但是对应高概率的预报,发生频数相对来说也是最高的,表现出一定的预报技巧。另外,虽然冻雨的样本数明显低于雨夹雪,但是前者的概率预报技巧高于后者,也说明了雨夹雪作为一个雨和雪的过渡带,由于空间范围小,接近于一维分布,预报难度大,而冻雨一般具有一定的分布范围,二维特

征更明显,所以预报技巧高于雨夹雪(Gascón et al, 2018)。

图5所示为对雨、雨夹雪、雪和冻雨不同时效概率预报的ROC曲线,以及对应时效的HRD的空报率和命中率散点。对于雨(图5a)和雪(图5c),EPS概率预报在1~10d时效内,都具有很高的预报技巧,同时预报技巧随时效的延长逐渐下降。值得关注的是,HRD的点在EPS的ROC曲线之外,即在相同的空报率下,对于雨和雪,HRD的命中率高于EPS,在相同的命中率下,HRD的空报率低于EPS。反映出HRD相对于EPS在特定情形下的优势。但是EPS的优势在于可以根据不同的用户和需求,提

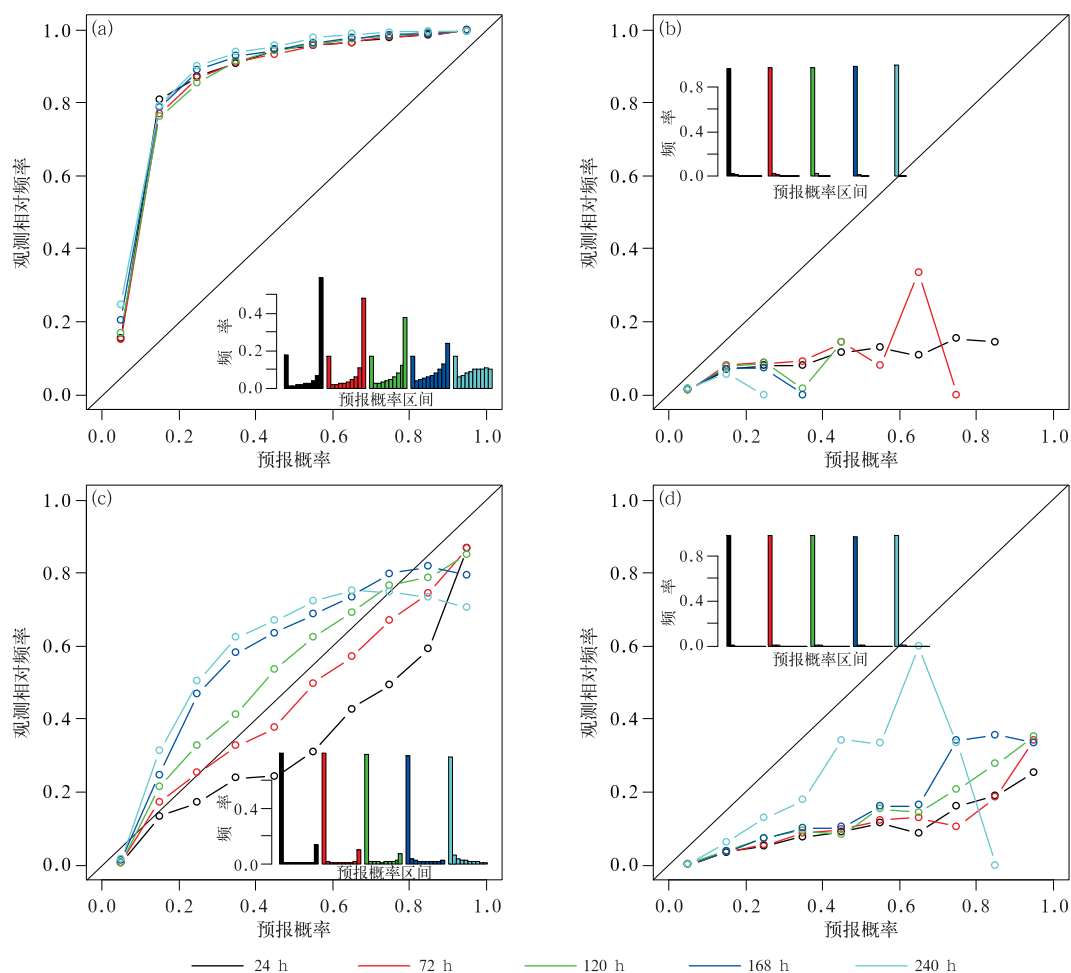


图 4 ECMWF EPS 08 时起报的雨(a)、雨夹雪(b)、雪(c)和冻雨(d)概率预报不同时效的可靠性曲线

Fig. 4 The ECMWF EPS probability forecast reliability diagram of rain (a), sleet (b), snow (c) and freezing rain (d) with different lead times at initial time of 08:00 BT

供不同命中率的预报决策,这一优势在相对经济价值(图 6)的评估中会进一步体现出来。冻雨(图 5d)和雨夹雪(图 5b)的概率预报技巧较雨和雪明显降低,但冻雨依然优于雨夹雪。与可靠性曲线(图 4)的检验结果一致。另外冻雨和雨夹雪 HRD 的空报率和命中率点落在 EPS 的 ROC 曲线上,说明对冻雨和雨夹雪, EPS 较 HRD 体现出了明显的优势。

图 6 所示为 EPS 和 HRD 对雨、雨夹雪、雪和冻雨不同时效概率预报和确定性预报的最大相对经济价值。在降雨预报的相对经济价值检验中(图 6a),对于花费损失比(C/L)大于 0.6 的事件,HRD 对降雨预报的相对经济价值略大于 EPS,表现出相对于 EPS 的优势,与图 5a 中对于降雨 HRD 预报空报率和命中率点位于 EPS 概率预报 ROC 曲线之外的结果一致。但是对于 $C/L < 0.6$ 的事件, EPS 对降雨

预报的相对经济价值大于 HRD。尤其对于 $C/L < 0.2$ 的事件, HRD 的相对经济价值为负。此时漏报的损失相对于空报时采取防范措施的花费很大,即“宁空勿漏”, EPS 可以通过减小概率阈值来减小漏报率,从而得到正的相对经济价值。EPS 相对于 HRD 的优势和价值也体现于此,可以针对不同的需求(不同的 C/L),进行不同的更有针对性的科学决策,从而使得相对经济价值最大化(Richardson, 2000)。降雪预报的相对经济价值(图 6c),对于 $C/L < 0.1$ 的事件, EPS 优于 HRD。对于 24 h 和 72 h 时效的预报, C/L 分别大于 0.5 和 0.6 时, EPS 再次优于 HRD。但是对于 240 h 时效的预报, $C/L > 0.1$ 之后, HRD 都优于 EPS, 可见对于高 C/L 的降雪事件, 中期时效 HRD 优于 EPS。高 C/L 表示空报时防范的花费与漏报时的损失接近, 对空报的容

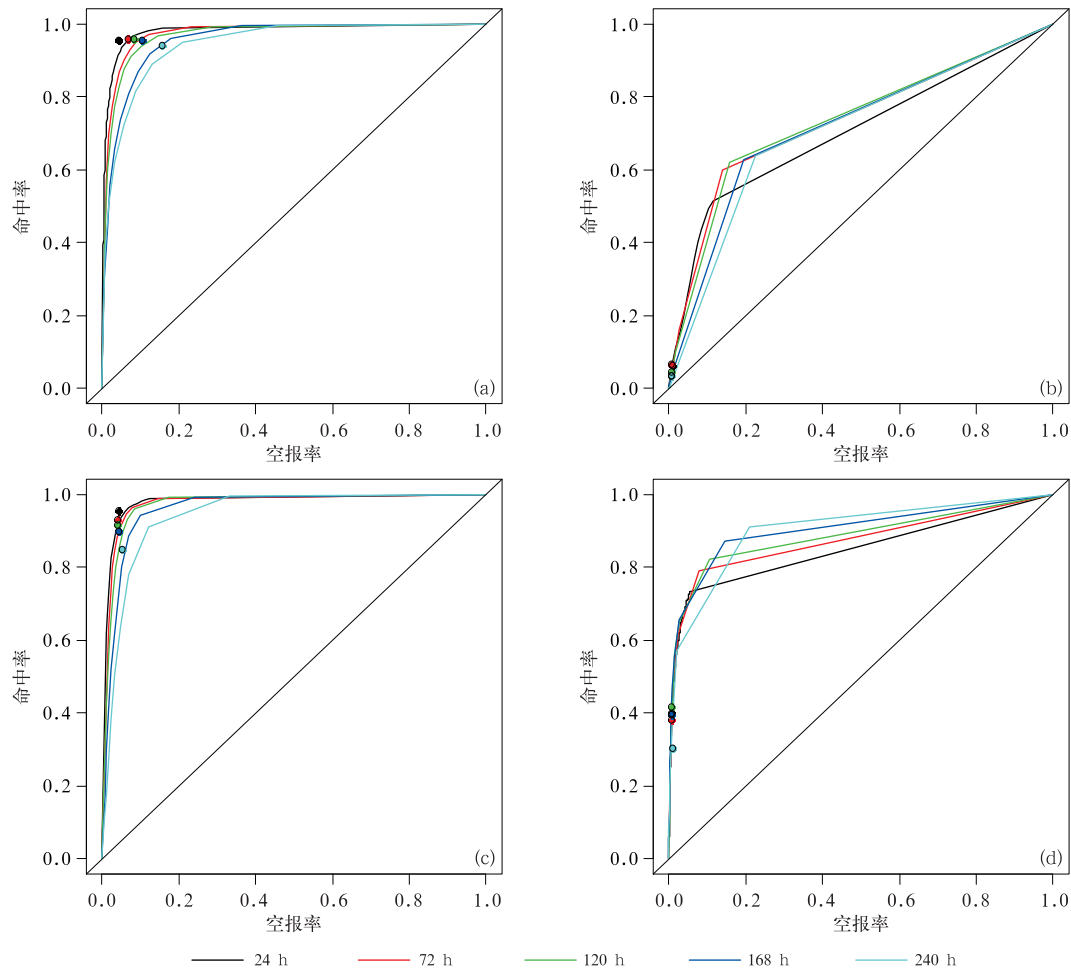


图5 ECMWF EPS 08时起报的雨(a)、雨夹雪(b)、雪(c)

和冻雨(d)概率预报不同时效的ROC检验曲线

(点为对应时效的HRD的空报率和命中率)

Fig. 5 The ECMWF EPS probability forecast ROC curves of rain (a), sleet (b), snow (c) and freezing rain (d) with different lead times at initial time of 08:00 BT
(Dots are the corresponding false alarm rate vs hit rate of HRD forecast)

忍度也较低,需要提高EPS的概率阈值来减小空报。相对于降雨和降雪,雨夹雪和冻雨EPS的相对经济价值明显高于HRD(图6b, 6d)。对于所有 C/L 的事件,二者EPS的经济价值都明显高于HRD。对于雨夹雪(图6b),有相对经济价值的 C/L 都小于0.1,对于大于0.1的事件,HRD和EPS的相对经济价值都小于0。可见对于雨夹雪,只有当对漏报的容忍度较低而对空报的容忍度较高(即“宁空勿漏”)时,HRD和EPS才具有应用价值,而且EPS的价值较HRD更高。如果对空报的容忍度较低时,二者对雨夹雪都无预报价值。对于冻雨(图6d),EPS具有正的相对经济价值的最大 C/L 在0.4

左右,HRD的最大 C/L 为0.15~0.2,可见EPS不仅表现出更优于HRD的应用价值,而且EPS对更高 C/L 的事件也具有正的经济价值,即HRD只对冻雨低漏报要求的用户具有价值,但是EPS同时对低空报要求的用户也具有价值。

从EPS概率预报的统计检验评估结果来看,PTYPE概率预报对四类降水相态都具有预报技巧,降雨概率普遍存在预报偏低的误差,降雪概率短期预报略偏高中期预报略偏低,雨夹雪和冻雨概率预报偏高。从ROC和相对经济价值的检验来看,对于降雨和降雪,EPS只是对部分 C/L 事件的价值优于HRD,但是对雨夹雪和冻雨,EPS明显优于HRD。

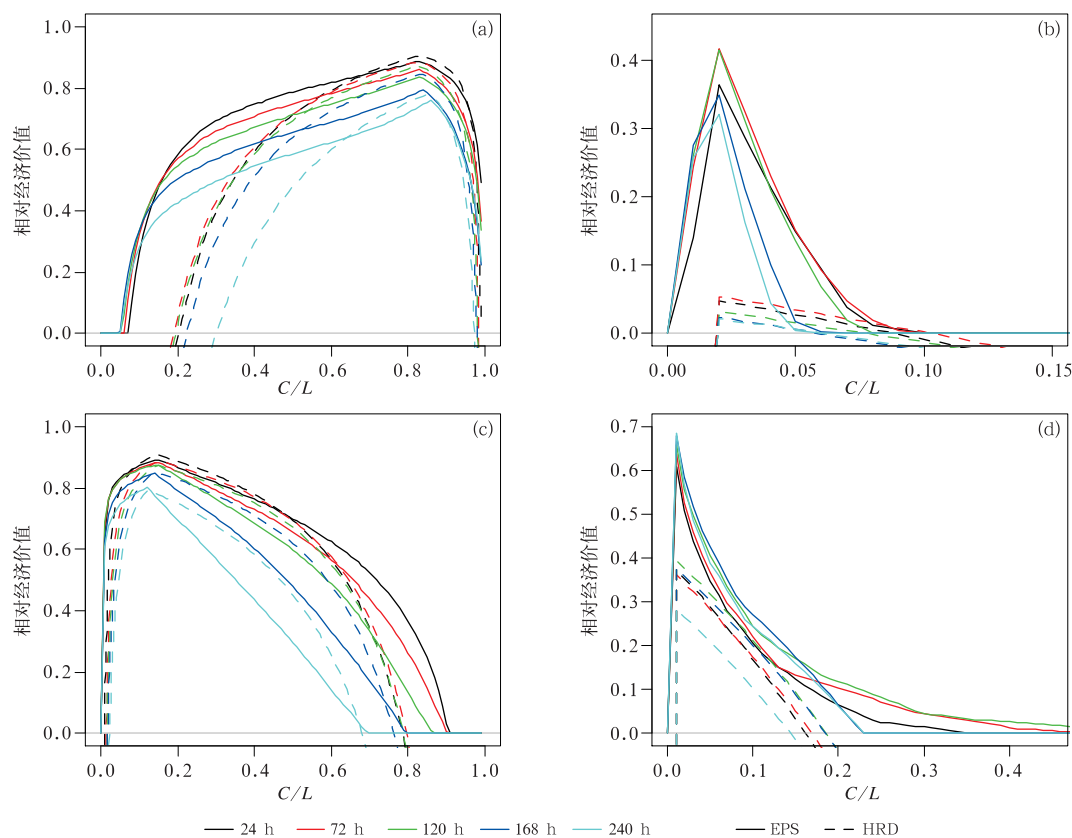


图 6 ECMWF EPS 和 HRD 08 时起报, 对 2016—2018 年的 10 月至次年 3 月雨(a)、雨夹雪(b)、雪(c)和冻雨(d)不同时效的相对经济价值

Fig. 6 Relative economic values for different cost/loss ratio events of ECMWF EPS and HRD at initial time of 08:00 BT with different lead times for rain (a), sleet (b), snow (c) and freezing rain (d) from October to the next March during 2016—2018

3 个例检验

2016 年 11 月 20—23 日, 受西西伯利亚东移南下冷空气和中低层西南暖湿气流共同影响, 从我国内蒙古中部开始, 自北往南出现了一次雨雪天气过程。华北平原、黄淮、江淮、江汉、江南北部等地先后出现了雨转雪或雨夹雪。2016 年 11 月 22 日 20 时, 雨雪分界线和雨夹雪位于陕西南部、湖北南部、河南东南部至苏皖中部一线(图 7)。ECMWF HRD 的 PTYPE 预报, 在短期时效(48 h)内, 对雨雪分界线的预报整体上较好, 预报出了陕西关中平原和安徽中部的雨雪分界线或雨夹雪。但是对湖北南部和河南东南部的雨雪分界线或雨夹雪预报略偏南, 对江苏的雨夹雪预报范围小, 对其雨雪分界线预报明显偏北。另外, 在湖南北部, 预报了一定范围的

雨夹雪或湿雪, 而实况都为雨。到了中期时效, 雨雪分界线明显地随着时效的延长越来越偏北(图 7c, 7d)。这可能与 ECMWF 模式在中期时效对北方冷空气移动速度预报偏慢和南方暖湿气流预报偏强有关。整体而言, ECMWF HRD 的 PTYPE 预报在短期时效内, 对雨雪分界线或雨夹雪略偏南, 中期时效内, 随着时效的延长, 出现越来越偏北的偏差。

ECMWF 的 PTYPE 产品在预报无降水的地方无降水相态预报。如江西东北部的降雨(图 7a, 7b, 7d)、江苏北部的降雪和雨夹雪(图 7b, 7c)、江西西北部的降雨(图 7c)等, 由于 HRD PTYPE 产品预报无降水, 所以也无降水相态预报, 导致明显的漏报。在 PTYPE 产品的应用中, 需要注意这一缺陷。

图 8 所示为对应相同观测时刻的 ECMWF EPS 对雨、雪和雨夹雪 24 h 和 120 h 时效的概率预报结果。从图中可见, 雨夹雪的概率较低, 即使是

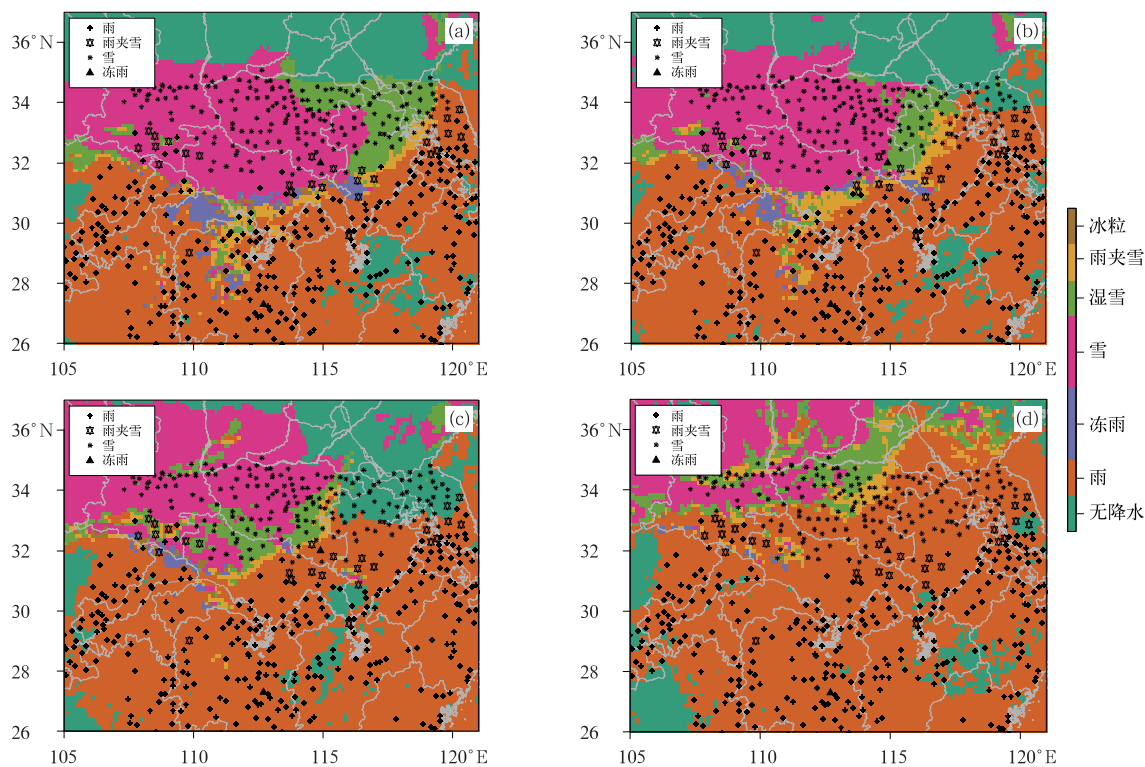


图7 2016年11月22日20时降水相态实况(符号)和ECMWF HRD不同时效预报结果(填色)
(a)24 h, (b)48 h, (c)120 h, (d)168 h

Fig.7 The precipitation type observations (symbols) at 20:00 BT 22 November 2016 and the corresponding ECMWF HRD forecasts (colored) with different lead times
(a) 24 h, (b) 48 h, (c) 120 h, (d) 168 h

24 h时效,雨夹雪的概率也都低于50%,大部分格点都低于25%,属于“小概率事件”。雨夹雪的高概率区与对应时效的雨夹雪确定性预报落区基本一致。但是相对于HRD,概率预报从概率的角度一定程度上弥补了HRD的预报偏差。以湖北中部为例,实况为个别站点的降雨,HRD 24 h预报都预报为雪(图7a),而概率预报在此处的降雪概率并非100%,在50%~90%(图8e),预报了一定的雨夹雪的概率(图8c)。对于中期120 h时效的预报,HRD雨雪分界线或雨夹雪预报明显偏北(图7c)。但是概率预报对湖北东北部至安徽中部一线的雨夹雪,预报了10%左右的概率(图8d),相对于HRD是一个很好地补充。概率预报相对于HRD的另一个优势是,HRD由于预报无降水时无降水相态的预报,从而会导致对雨雪事件的漏报,概率预报从概率的角度减少了漏报。如图7中江苏北部和江西北部等地雨雪的漏报,概率预报对上述地区都有一定的降水概率的体现(图8)。由上可见,概率预报进一步体现出了相对于确定性预报的优势。

4 结论与讨论

本文运用大样本统计方法,系统性评估检验了ECMWF HRD和EPS的降水相态预报产品PTYPE,对我国冬半年地面2515个站点雨、雨夹雪、雪和冻雨的预报性能。主要结论如下:

(1)HRD对我国降水相态有较好的预报能力,尤其对于降雨和降雪的预报,且预报存在明显的白天优于夜间的日变化特征。对雨夹雪的预报能力有限,预报范围明显偏小。对冻雨的预报范围明显偏大。对雨雪分界线的预报,存在短期时效略偏南、中期随时效延长越来越偏北的误差特征。

(2)EPS降雪概率预报的可靠性较高,另外三种相态预报的可靠性较低,但是都具有一定的预报技巧。降雨和降雪EPS概率预报相对于HRD的优势体现在对部分C/L事件的预报上,但是雨夹雪和冻雨的EPS概率预报价值明显优于HRD,尤其冻雨,EPS明显优于HRD。

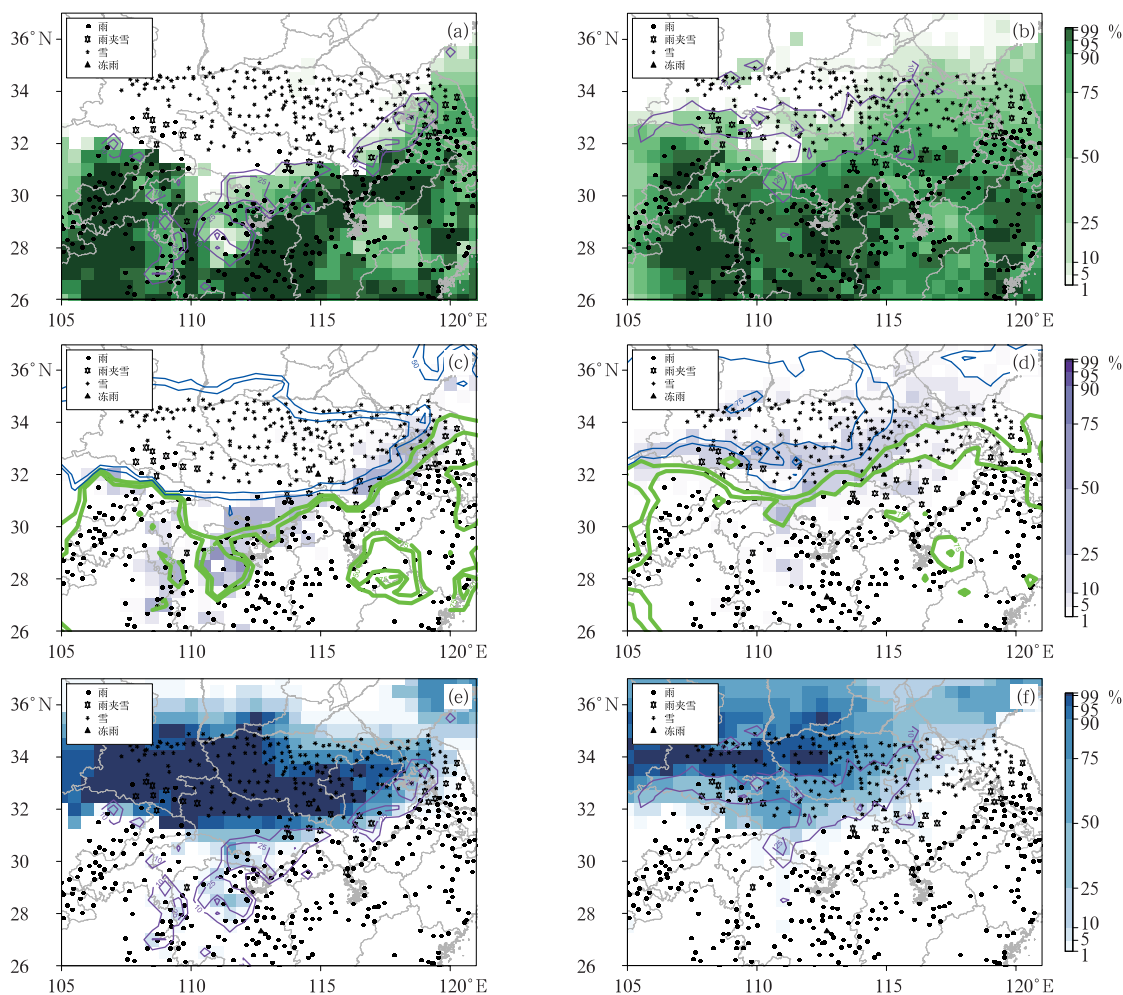


图 8 2016 年 11 月 22 日 20 时降水相态实况(符号)和 ECMWF EPS 对不同降水相态和 24 h 时效(a,c,e)、120 h 时效(b,d,f)的概率预报(填色)

(a,b)雨,(c,d)雨夹雪,(e,f)雪

[图 8a,8b,8e,8f 中等值线为雨夹雪 10%和 25%概率,图 8c 和 8d

中等值线为雨(绿色)和雪(蓝色)50%和 75%概率]

Fig. 8 The precipitation type observations (symbols) at 20:00 BT 22 November 2016 and the corresponding ECMWF EPS probability forecasts (colored) of rain (a, b), sleet (c, d) and snow (e, f) with lead times of 24 h (a, c, e) and 120 h (b, d, f)

[Lines in Figs. 8a, 8b, 8e and 8f indicate the sleet probability of 10% and 25%,

lines in Figs. 8c and 8d indicate rain (green) and snow (blue) probability of 50% and 75%]

可见 ECMWF 的 PTYPE 产品,对我国降水相态具有较好的预报能力。但其也存在一定的缺陷,需要在应用中注意。例如,在 ECMWF 无降水的地方无相态预报。当 ECMWF 的降水预报出现漏报,预报员对其进行订正后,此时 ECMWF 模式无相态预报供参考。另外,ECMWF 在冻雨的预报中,只考虑了三层模式的情形,对于西南地区单层模式下的冻雨,ECMWF 也存在缺陷。这些都需要借助其他的预报产品或者技术方法进行判断或弥补。

集合预报相对于确定性预报存在一定的优势(Richardson,2000),因此发挥和挖掘 EPS PTYPE 产品的优势是下一个研究重点。主要包括三个方向:第一,通过后处理手段,提供可靠性更高的降水相态概率预报产品,进一步提高概率预报的技巧;第二,运用历史大数据,可支撑确定性预报结果,提高降水相态确定性预报的预报能力(代刊等,2018);第三,集合预报系统提供了进行极端天气预报的有利工具和手段(Dong,2018),用于进行极端或高影响

雨雪冰冻等天气的预报预警。

参考文献

- 毕宝贵,代刊,王毅,等,2016. 定量降水预报技术进展[J]. 应用气象学报,27(5):534-549. Bi B G, Dai K, Wang Y, et al, 2016. Advances in techniques of quantitative precipitation forecast[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5):534-549(in Chinese).
- 代刊,朱跃建,毕宝贵,2018. 集合模式定量降水预报的统计后处理技术研究综述[J]. 气象学报,76(4):493-510. Dai K, Zhu Y J, Bi B G, 2018. The review of statistical post-process technologies for quantitative precipitation forecast of ensemble prediction system[J]. Acta Meteor Sin, 76(4):493-510(in Chinese).
- 董全,代刊,陶亦为,等,2017. 基于 ECMWF 集合预报的极端天气预报产品应用和检验[J]. 气象,43(9):1095-1109. Dong Q, Dai K, Tao Y W, et al, 2017. Application and verification of extreme weather forecast products of ECMWF ensemble prediction system[J]. Meteor Mon, 43(9):1095-1109(in Chinese).
- 董全,黄小玉,宗志平,2011. 我国各地区降水相态变化的气温分析[J]. 天气预报技术总结专刊,3(2):29-35. Dong Q, Huang X Y, Zong Z P, 2011. Research of temperature thresholds for rain and snow conversion in China[J]. Wea Forecast Rev, 3(2):29-35(in Chinese).
- 董全,黄小玉,宗志平,2013. 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[J]. 气象,39(3):324-332. Dong Q, Huang X Y, Zong Z P, 2013. Comparison of artificial neural network and linear regression methods in forecasting precipitation types[J]. Meteor Mon, 39(3):324-332(in Chinese).
- 董全,金荣花,代刊,等,2016. ECMWF 集合预报和确定性预报对淮河流域暴雨预报的对比分析[J]. 气象,42(9):1146-1153. Dong Q, Jin R H, Dai K, et al, 2016. Comparison between ECMWF ensemble and deterministic forecast for heavy rainfall in the Huaihe River Basin of China[J]. Meteor Mon, 42(9):1146-1153(in Chinese).
- 欧建军,周毓荃,杨棋,等,2011. 我国冻雨时空分布及温湿结构特征分析[J]. 高原气象,30(3):692-699. Ou J J, Zhou Y Q, Yang Q, et al, 2011. Analyses on spatial-temporal distributions and temperature-moisture structure of freezing rain in China[J]. Plateau Meteor, 30(3):692-699(in Chinese).
- 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[J]. 气象,38(7):769-778. Qi L B, 2012. Formation mechanism and forecast on freezing rain and ice pellet in winter of China[J]. Meteor Mon, 38(7):769-778(in Chinese).
- Accadia C, Mariani S, Casaioli M, et al, 2003. Sensitivity of precipitation forecast skill scores to bilinear interpolation and a simple nearest-neighbor average method on high-resolution verification grids[J]. Wea Forecasting, 18(5):918-932.
- Allen M S, Eckel F A, 2012. Value from ambiguity in ensemble forecasts[J]. Wea Forecasting, 27(1):70-84.
- Allen R L, 2001. MRF-based MOS precipitation type guidance for the United States[R]. Silver Spring: National Oceanic and Atmospheric Administration, U. S. Department of Commerce.
- Allen R L, Erickson M C, 2001. AVN-based MOS precipitation type guidance for the United States[R]. Silver Spring: US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Office of Meteorology, Science Division.
- Bocchieri J R, 1979. A new operational system for forecasting precipitation type[J]. Mon Wea Rev, 107(6):637-649.
- Dong Q, 2018. Calibration and quantitative forecast of extreme daily precipitation using the extreme forecast index (EFI)[J]. J Geosci Environ Prot, 6(2):143-164.
- ECMWF, 2016. Part IV: physical processes[M]//ECMWF. IFS Documentation Cy43R1. Reading: ECMWF; 118-120.
- Forbes R, Tsonevsky I, Hewson T, et al, 2014. Towards predicting high-impact freezing rain events[R]. Reading: ECMWF; 15-21.
- Gascón E, Hewson T, Haiden T, 2018. Improving predictions of precipitation type at the surface: description and verification of two new products from the ECMWF ensemble[J]. Wea Forecasting, 33(1):89-108.
- Jolliffe I T, Stephenson D B, 2003. Forecast Verification: a Practitioner's Guide in Atmospheric Science[M]. Hoboken: Wiley.
- Richardson D S, 2000. Skill and relative economic value of the ECMWF ensemble prediction system[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 126(563):649-667.
- Schenerer M, Gregory S, Hamill T M, et al, 2017. Probabilistic precipitation-type forecasting based on GEFS ensemble forecasts of vertical temperature profiles[J]. Mon Wea Rev, 145(4):1401-1412.
- Thériault J M, Stewart R E, Henson W, 2010. On the dependence of winter precipitation types on temperature, precipitation rate, and associated features[J]. J Appl Meteor Climatol, 49(7):1429-1442.
- Wilks D S, 1995. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: an Introduction[M]. San Diego: Academic Press; 467.