

孙敏,袁慧玲,杜予罡,2018. 上海地区春季最高气温预报失败案例分析[J]. 气象,44(1):65-79.

上海地区春季最高气温预报失败案例分析*

孙 敏^{1,2} 袁慧玲^{2,3*} 杜予罡¹

1 上海中心气象台,上海 200030

2 南京大学大气科学学院中尺度灾害性天气教育部重点实验室,南京 210023

3 江苏省气候变化协同创新中心,南京 210093

提 要: 本文分析了2015年3月17—18日上海地区连续两天发生最高气温预报失误的天气背景,并使用当日实况观测和业务预报使用的数值模式资料,剖析预报失败的原因,分析表明:对天空状况的误判是导致17日预报失败的主要原因,且东南风预报偏强更进一步增大了预报误差;冷空气影响时间的判断失误是导致18日预报失败的主要原因。从模式预报的实时检验、预报的跳跃性和不确定性角度分析了预报中存在的问题;预报员应重视本地和上游实况,从传统对单一确定性模式预报的依赖向多模式多起报时次及能提供概率预报和不确定性信息的业务集合预报的分析思路转型。此外,还需加强对集合预报的系统性检验、评估及数值预报释用产品的开发,增加包含不确定性信息的公众天气预报发布形式。

关键词: 最高气温,预报失败案例,预报误差,集合预报,不确定性

中图分类号: P456, P457

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.01.006

Analysis of the Spring Maximum 2 m Temperature Forecast Failure in Shanghai

SUN Min^{1,2} YUAN Huiling^{2,3*} DU Yugang¹

1 Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030

2 Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather/Ministry of Education and School of
Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023

3 Jiangsu Collaborative Innovation Center for Climate Change, Nanjing 210093

Abstract: Based on conventional surface and upper air observation data, the synoptic-scale circulation of the maximum 2 m temperature forecast failure in Shanghai during 17–18 March 2015 is analyzed. Using the real-time observations and numerical weather predictions, the causes of the forecast failure are investigated. The results show that the failure of the cloud cover forecast on 17 March was the main cause for the forecast failure. Meanwhile, the enhanced southeast winds further enlarged the forecast error. On 18 March, the misforecasted occurrence time of cold air advection into Shanghai mainly accounted for the forecast failure. The problems and recommendations in the forecast process were addressed, with the emphasis on the discrepancies between the real-time observations and the forecasts, forecast jumpiness and forecast uncertainty. Forecasters should have paid more attention to the real-time local and upstream observations, and different lead-time forecasts from different models. More important, operational ensemble forecasts in a probabilistic sense were highly recommended instead of traditional deterministic forecasts of a single model. Therefore, it is necessary to systematically assess the ensemble forecast performance, develop new

* 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB430106)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206005)和国家自然科学基金项目(41675109)共同资助

2017年2月13日收稿; 2017年7月24日收修定稿

第一作者:孙敏,主要从事天气预报和中尺度天气研究. Email:sunmin_angela@126.com

通信作者:袁慧玲,主要从事中尺度数值模拟和水文气象研究. Email:yuanhl@nju.edu.cn

application and interpretation of NWP products, and provide more products of multi-model ensemble forecasts with uncertainty information in public weather services.

Key words: maximum 2 m temperature, forecast failure, forecast error, ensemble forecast, uncertainty

引言

随着社会经济各方面的迅速发展和人民生活水平的不断提高,社会和公众对天气预报的需求日益增长。2006 年对全国(除港澳台)进行的“中国气象服务效益评估”随机抽样问卷调查显示,虽然大多数受访者对当前的天气预报内容和准确性的满意度较高,但仍有绝大多数受访者要求提高天气预报的准确性(Yuan et al, 2016; 彭琳玲等, 2012)。同时,公众对于未来 1~3 d 预报的关注程度较高,仅次于对灾害性和临近(实况及 0~12 h 预报)天气的关注程度(Yuan et al, 2016)。

在我国春季,西伯利亚气团和热带海洋气团两者势力相当,互有进退,是锋系及气旋活动最盛的时期,因此春季天气多变(朱乾根等, 2007)。多年统计显示,上海从 2 月中下旬开始气温便缓慢回升,3 月中下旬进入春季,气温呈明显地波动性上升,起伏很大。2015 年上海于 3 月 13 日入春,3 月 16—17 日连续两天,上海中心气象台对公众发布的 24 h 最高气温预报都与实况存在较大的偏差。其中,3 月 16 日预报 17 日徐家汇的最高气温为 19℃,而实况的最高气温为 23.1℃,误差 -4.1℃(预报减去实况);3 月 17 日预报 18 日徐家汇的最高气温为 24℃,而实况的最高气温仅为 16.8℃,误差高达 +7.2℃。这两次预报失误虽未造成直接的人员财产损失,但网上有不少网友抱怨,例如“被冻哭了,还以为是我衣服脱得太快了,原来是天本来就冷”(http://news-paper.jfdaily.com/xwcb/html/2015-03/19/content_76023.htm)、“穿着短袖出门,结果被冻着了”(http://news.163.com/15/0319/01/AL1IUIEC00014AEE.html)。多家主流网络媒体刊登报道称,该次预报打破了 2010 年 4 月 9 日最高气温误差 6.6℃ 的记录,在社会上造成了一定的负面影响。

已有大量研究从气候的角度对我国春季气温时空变化特征进行了分析(张定全和王毅荣, 2005; 王冀等, 2005; 王亚军等, 2006; 董李丽等, 2015)。对于气温预报的研究多基于数值模式,因此,发展了各种模式误差订正与集成预报的方法(苗爱梅等, 1998; 马清等, 2008; 黄治勇等, 2011; 李佰平和智协飞,

2012; 王婧等, 2015; 马旭林等, 2016; 佟铃等, 2017),然而这些研究对气温预报的气候尺度及模式预报系统性的偏差进行矫正较为有效,对于较短时效内快速波动的气温预报误差订正效果不甚理想。目前,在大部分情况下(无明显天气转折),数值模式已经能够较好地把握影响温度的因素,短期温度预报的误差较小。但数值模式并不可能达到完美,特别在有锋面、气旋等天气系统影响时,一旦数值模式对这些系统的移动速度、强度等预报出现偏差时,会造成影响温度的要素预报出现偏差,进而导致模式温度预报出现较大的误差。赵江洁(2007)、孙云等(2012)和陈圣劼等(2015)分别对广西、石家庄市区和江苏淮北地区的气温预报失误进行了分析,表明数值模式预报的形势场与实况存在较大差异是造成气温预报失误的主要原因之一。

影响气温变化的因素很多,除了受到地理位置(纬度、地形、下垫面属性和海拔高度)、太阳辐射日变化及季节变化的影响以外,还应考虑温度平流、天空状况、地表风向风速和气团变性等各种气象条件的综合影响。但是,关于气温预报误差及原因分析的研究屈指可数(赵江洁, 2007; 张秀丽, 2008; 孙云等, 2012; 陈圣劼等, 2015; 刘帅等, 2015),且不同地区既会拥有与其他地区相似的预报误差来源,也会具有其独有的预报误差特征,这些远远无法满足一线预报员从失败案例中汲取经验教训的需求。

本文利用高空和地面的常规气象观测资料以及业务预报使用的数值模式资料对 2015 年 3 月 17—18 日上海徐家汇最高气温预报出现连续两日较大误差的原因进行分析和讨论。从一线预报员的角度剖析产生此次预报失败的主要原因,以期找出做预报时遗漏考虑的因子,并从集合预报各成员差异和不确定性的角度分析,为今后进一步提高春季最高气温的预报水平提供参考。

1 天气过程和历史统计概述

1.1 天气过程概述

在正常的天气条件下,上海地区最高气温出现在午后的 1~2 h,约 14 时(北京时,下同)前后(严济

远和徐家良,1996)。因此,选取最高气温出现之前,离其最近的 08 时高空和地面天气图进行分析(图 1)。

2015 年 3 月 17 日 08 时,500 hPa 高空存在南北两支低槽(图 1a),位于北方的高空槽携带冷空气南下,对应地面图上存在一条冷锋(图 1c),冷空气的前锋已经到达华北南部。位于南方的高空槽在 700 和 850 hPa 上都对应存在低涡及冷、暖式切变线(图 1a),低涡中心位于西南地区川渝交界处,上

海地区处在暖区中,700 和 850 hPa 高度上各存在一支强度约为 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西南急流。对应地面图上在西南地区的贵州南部存在地面低压(图 1c),其倒槽向东北方向伸展,上海地区位于低压倒槽内,受该系统暖湿平流的影响,徐家汇从 16 日下午至 17 日 08 时均为轻雾天气(图 1e)。从位于徐家汇北侧的宝山站总云量观测(图 1f)可以看到这段时间内天空状况较差,但是 17 日白天随着太阳辐射增强,轻雾逐渐消散,天空逐渐打开(图 1f)。同时,上海

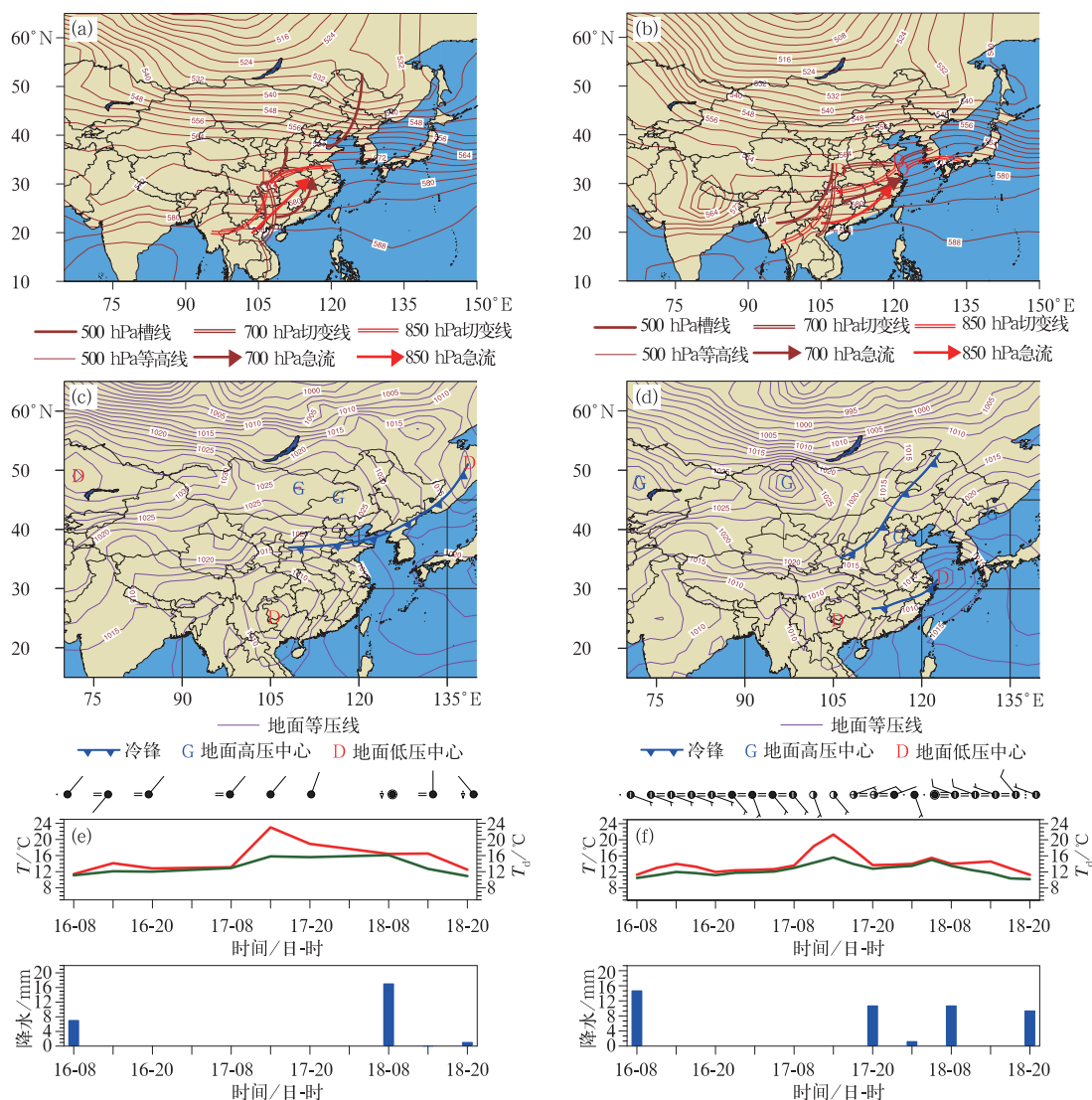


图 1 2015 年 3 月(a)17 日 08 时和(b)18 日 08 时高空形势图,(c)17 日 08 时和(d)18 日 08 时地面形势图,(e)16 日 08 时至 18 日 20 时上海徐家汇站(58367)和(f)上海宝山站(58362)地面要素随时间变化图

Fig. 1 Upper air synoptic charts at 08:00 BT 17 (a) and 08:00 BT 18 (b), surface weather map at 08:00 BT 17 (c) and 08:00 BT 18 (d), surface elements during 08:00 BT 16—20:00 BT 18 at Xujiacui Station (58367) and Baoshan Station (58362) (f) in Shanghai in March 2015

处于暖区中,中低空的暖平流也为升温提供了有利的条件。此外,由于上海东部邻海,17日上海东南部海面温度 $12\sim 16^{\circ}\text{C}$,由于地面低压倒槽内风速较小,在东南风较弱的环境下(图1f),海面气温较低导致的冷平流效应使得上海东南部出现较低的气温,位于上海南部的金山区,17日最高气温仅 17.4°C ;而位于上海东南部和东部的奉贤区和浦东新区,17日的最高气温分别为 19.1°C 和 19.3°C ,但对于徐家汇的影响较小。这些因素都导致了徐家汇17日白天的气温迅速上升,最高气温达到 23.1°C 。

随着冷锋继续南下,同时低压倒槽继续向东北方向延伸发展,从17日23时起,地面天气图上浙赣一带又切断出一个地面低压(图略),并不断向东北方向移动。到18日08时,低层冷空气已经开始影响上海(图1d),在此期间随着冷暖空气的交汇,在上海地区产生了明显的降水。对应于地面图,700和850 hPa也切断出新的低涡,位置较地面低涡位置偏北一些(图1b),因此高空冷空气的影响较低层偏北。暖区内的西南急流强度略有加强,达到 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,受到暖湿气流影响,云量较多,但偏西风的分量较大,环流变得较为平直,动力条件上不利于强降水的产生。因此18日白天以阴天为主,伴有弱降水,云量较多(图1f),加之低层冷空气的影响(18日08时后转为西北风,图1f),18日白天的气温稳定维持在 $16\sim 17^{\circ}\text{C}$,最高气温仅 16.8°C 。

1.2 历史资料统计

利用1971—2015年共45年上海徐家汇气象观测站的逐日最高气温资料,统计了逐月的极大值 $(T_{\max})_{\max}$ 与极小值 $(T_{\max})_{\min}$,其差值 ΔT 可以用来反映每个月最高气温的波动情况,计算公式如下:

$$\Delta T = (T_{\max})_{\max} - (T_{\max})_{\min} \quad (1)$$

图2a为上海徐家汇观测站1971—2015年逐月最高气温极大值与极小值差值 ΔT 的箱线图,其中逐月的中位数线显示,年变化中存在一个峰值和一个谷值,其中春季的3、4月为峰值,其差值可达 $16\sim 17^{\circ}\text{C}$,而夏季末和秋季初的8、9月为谷值,差值仅为 10°C ,可见春季的最高气温波动最大。从3月逐年最高气温极大值 $(T_{\max})_{\max}$ 与极小值 $(T_{\max})_{\min}$ 的变化曲线可以看到,3月最高气温最高可达 29.5°C ,而最高气温最低仅为 3.2°C (图2b)。

由2015年3月的天气过程分析和1971—2015

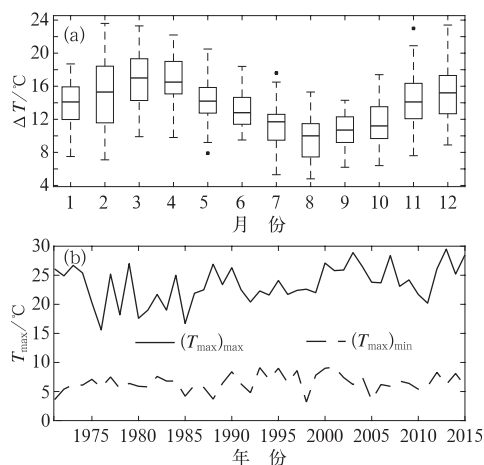


图2 1971—2015年上海徐家汇观测站(a)逐月最高气温极大值 $(T_{\max})_{\max}$ 与极小值 $(T_{\max})_{\min}$ 差值 ΔT 的箱线图(黑点为异常值), (b)逐年3月最高气温极大值 $(T_{\max})_{\max}$ 与极小值 $(T_{\max})_{\min}$ 变化曲线
Fig. 2 (a) The box-whisker plot of monthly difference ΔT between the maximum value of maximum 2 m temperature $(T_{\max})_{\max}$ and the minimum value of maximum 2 m temperature $(T_{\max})_{\min}$ (black dots; the abnormal values), and (b) the yearly maximum value of maximum 2 m temperature $(T_{\max})_{\max}$ (solid line) and minimum value of maximum 2 m temperature $(T_{\max})_{\min}$ (dashed line) at Xujiahui Station, Shanghai in March of 1971–2015

年上海徐家汇观测站最高气温观测的历史统计可见,由于上海地区春季最高气温的变化波动幅度大,容易导致数值预报出现较大的误差,因此,上海春季最高气温的业务预报存在很大挑战。下文将具体分析预报出现较大偏差的原因。

2 预报失败原因分析

影响天气尺度下温度局地变化的因素可以由经过尺度分析后的热力学能量方程得到(朱乾根等, 2007):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) - w(\gamma_d - \gamma) + \frac{1}{c_p} \dot{Q} \quad (2)$$

即某一地方的温度变化,主要取决于水平温度平流、垂直运动引起的绝热变化以及非绝热因子三方面。

在平时的业务预报中,预报员在进行最高气温预报时的思路为:首先分析天气形势和影响系统,然

后找出未来预报日内影响公式(2)中等号右侧各项的因素,例如,水平温度平流、天空辐射状况(天气和云量)、地表风向风速和气团变性等,最后根据之前的分析对数值模式诊断得到的2 m最高气温进行订正。

为了能真实再现预报时的情景,现利用预报当时能收集到的所有资料来分析造成预报失败的原因。一般需要在前一日的17时之前制作完成某日的最高气温预报,如应在16日的17时之前制作完成17日的最高气温预报,当时可以利用的资料为欧洲中期天气预报中心(ECMWF,以下简称EC)、美国国家环境预报中心全球预报系统(GFS)和华东区域模式等多家数值预报16日08时(及之前)起报的数值天气预报(包括确定性预报和集合预报),以及各种实况观测资料。此外,在当日的05时之前仍有一次修改当日最高气温预报的机会,此时有更临近的实况资料 and 前一日20时数值模式新的预报资料。

2.1 17日预报失败原因分析

EC确定性预报对17日的形势场预报(15日20时起报)分析表明,17日白天上海处在500 hPa高空脊线附近,700 hPa湿度较小,而低层(850和925 hPa)湿度较大,近地面逆温明显(图3a)。据此判断17日早晨低云较多,并存在出现雾的可能性,华东区域模式的能见度预报也预报出17日早晨上海地区的能见度较低(图3c),由于低层湿度大,白天低云较多,判断17日为阴到多云的天气,且EC预报的上海地面风场为3级左右的东南风(图3b),这些因素均不利于气温的上升。虽然根据形势场预报判断上海处在地面低压倒槽内,低层925 hPa有弱的暖平流,但预报850和700 hPa环流都较为平直(图3a),850 hPa温度预报17日08时比16日08时高4℃,而16日的实况最高气温为15.0℃。考虑17日与16日的天空状况相似,均为8~10成云,而且由于EC数值预报在形势预报上表现较为稳定,预报员更愿意采信EC的形势场预报,各家模式2 m最高气温预报在18~20℃,综合考虑各方面因素后预报17日最高气温为19℃。

在17日05时仍有一次修改最终预报结果的机会,由于实况云图显示有低云覆盖,上海东南部有大雾天气,其他地区有轻雾,而最新的数值预报(表1)显示,除了EC集合平均的最高气温预报与前一次起报的结果基本保持一致以外,其他模式均有下

调,使得预报员依然维持最高气温为19℃的预报结论。

从与上文(天气过程概述)分析的实况对比来看,造成17日最高气温预报偏低的主要原因是对于17日白天天空状况的判断失误,而这种误判来源于预报员对EC确定性数值预报形势场及影响气温预报的低层湿度场的参考权重过大。此外,实况的东南风较模式预报偏小,使得徐家汇受东南侧海面气温较低导致的冷平流效应影响较小,从而使误差进一步加大。

2.2 18日预报失败原因分析

制作18日的最高气温预报时,根据数值模式环流形势的预报,判断18日将有冷空气影响上海。EC、GFS和华东区域数值预报模式16日20时起报的18日08时850 hPa预报温度都在14~16℃,与17日08时850 hPa实况温度14℃接近甚至更高,之后温度缓慢下降。图4中可以看到850和925 hPa温度均在18日14时以后开始下降,且925 hPa相比于850 hPa,降温时间更早,降温幅度也更大。从冷空气影响地面风向的转换(实况为18日08时,图1d和1f)来看,EC模式预报地面风场在18日14时左右转为西北风,而华东区域数值预报模式预报则在12时左右转为西北风,模式预报对风场转向均存在延迟(图略)。EC模式对18日08时气压场的预报显示,上海处在低压东侧,为偏南风暖平流,14时之前仍有利于气温的上升;尽管EC预报20时之前中低层西南暖湿气流较强,低层水汽较多,但预报员受到17日对天空状况判断失误的影响,认为18日为阴到多云转阴有阵雨的天气,白天仍有利于气温的上升(实况以阴天为主不利于升温)。数值模式最高气温预报随着时效的临近调整幅度较大(表1),例如,EC控制预报由24.0℃(15日20时起报)调整到了21.7℃(16日20时起报),华东区域模式预报由17.9℃(15日20时起报)调整到了26.9℃(16日20时起报)。预报员根据数值预报综合考虑,判断冷空气的影响时间在下午,上午为阴到多云天气,且暖平流利于升温,预报18日最高气温为24℃。

在18日05时仍有一次机会修改最终的预报结果。从数值预报来看,除了EC集合平均外,其他模式的最高气温预报均有大幅下调,但05时徐家汇实况气温为16.4℃,底数较高,上海大部分地区为较

弱的偏南风。受到前一天模式预报的最高气温均偏低的影响,预报员只将最高气温拉低了 1°C , 预报当日最高气温为 23°C 。

从与实况的对比来看,造成 18 日最高气温预报偏高的主要原因是对冷空气影响时间的判断失误,

而这种误判仍来源于对 EC 数值模式预报的形势场和地面风场过分信赖,且预报员在进行主观订正时,将模式前一天预报误差偏差考虑的权重较大,从而导致对天空状况也存在误判。

表 1 不同模式的最高气温预报(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Table 1 Maximum 2 m temperature predictions from different numerical models (unit: $^{\circ}\text{C}$)

预报时间		17 日		18 日	
起报时间		15 日 20 时	16 日 20 时	15 日 20 时	16 日 20 时
实况		23.1		16.8	
EC 控制预报		20.0	19.1	24.0	21.7
EC 集合平均	预报值	18.5	18.7	19.8	19.5
	离散度	1.63	0.82	4.01	3.32
GFS 控制预报		21.2	19.6	21.7	22.3
GFS 集合平均	预报值	20.4	19.7	22.1	21.6
	离散度	1.07	0.68	1.29	1.56
华东区域模式		19.3	18.7	17.9	26.9

3 预报中存在的问题及需要改进的方面

3.1 预报中存在的问题分析

从上文的分析中可以发现,连续两日最高气温预报失败的最主要原因在于对数值预报的过分依赖,忽视了模式预报的实时检验的重要性。由于长期以来养成对大形势环流场预报较好的 EC 模式过于信赖,对单一模式确定性预报的盲目信赖会导致预报员无法从其他的数值模式预报中吸收更多有用的信息,且预报员更依赖最新时次起报的预报结果,而忽视了预报跳跃性(预报不一致性、预报不连续性)所反映的更多信息。所谓预报跳跃性指对未来某个固定时刻的预报,连续多次预报中前后相邻两次预报结果之间差异较大的现象(Zsoter et al, 2009; Pappenberger et al, 2011; 郭换换等, 2016),分析造成预报跳跃性的原因有助于抓住预报关键因子。目前,大部分预报员对于业务化的集合预报使用还只停留在参考集合平均的程度,对于集合预报提供的概率预报和不确定性信息参考较少,没有充分利用多模式预报的结果(智协飞等, 2009; 2013; Zhi et al, 2012),多模式集成预报的业务化产品较少。多次失败的预报经历显示,一旦数值预报与实况存在较大偏差,往往容易导致较大的业务预报偏差,可见预报员对数值预报订正的能力还不足。因此,下文从模

式预报的实时检验(包括本地及上游地区的实况)的重要性、模式预报跳跃性和集合预报不确定性的角度,分析本次最高气温预报失败案例中的关键影响要素,为预报员订正模式预报的结果提供依据。

3.1.1 模式预报的实时检验的重要性

两天的最高气温预报失败显示,前一天的预报制作大部分依赖于数值模式预报,当数值模式出现环流形势的偏差,导致天空状况、风和气温等要素预报出现偏差时预报员很难予以订正,但是当第二天早晨拥有更多临近实况时,预报员可根据本地及上游地区实况大致确定数值模式的偏差,对预报做出及时有效的订正。

在两天早晨 05 时的预报中,预报员都忽略了本地自动站地面风场实况对当日最高气温的影响。图 5a 中显示 17 日 05 时实况东南风风力较小(1 级左右),并不像前一天数值模式预报有 3 级左右的东南风,因此在当时仍无法判断天空状况是否会转好的情况下,根据实况的风场应该对数值模式预报的最高气温向上进行调整,从而减小预报误差。模式前一日预报 18 日早晨地面风向仍为西南风,但是 18 日 05 时上海西部和西北部的自动站风场显示风向已转为西北偏西风(图 5b),同时从上游观测站来看江苏省南部的风向已经转为西北偏北风,低层冷空气向南扩散的速度快于模式预报,据此可以判断冷空气的影响提前了,此时应及时对最高气温的预报向下进行调整。

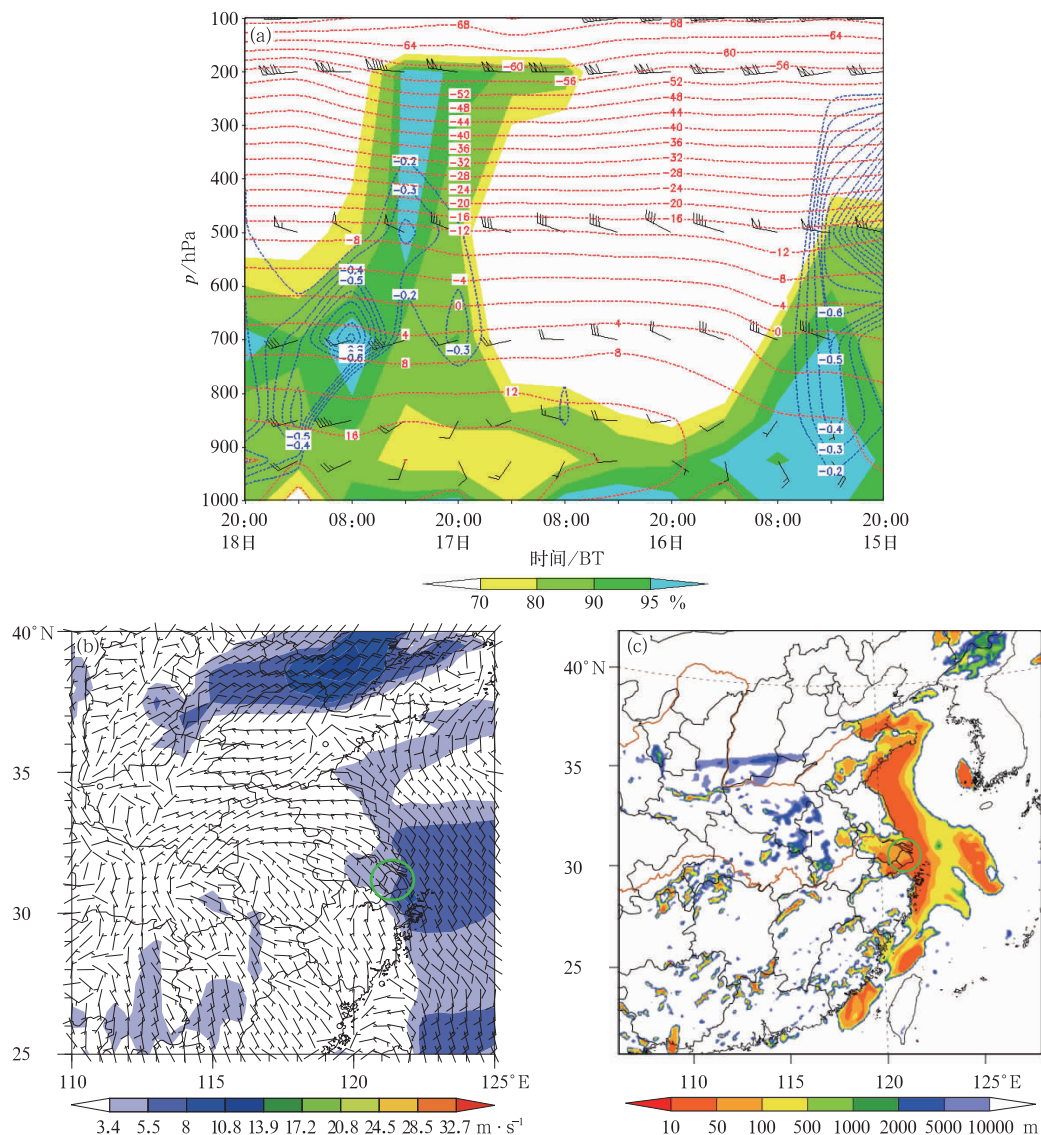


图 3 2015 年 3 月 15 日 20 时起报的 (a) EC 预报上海徐家汇四要素时序演变图,

(b) EC 预报 17 日 08 时 10 m 风场分布图 (绿圈为上海所在位置),

(c) 第二代华东区域模式预报 17 日 08 时能见度分布图 (绿圈为上海所在位置)

(蓝线为垂直速度, 单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$; 红线为温度, 单位: $^{\circ}\text{C}$; 填色为相对湿度)

Fig. 3 (a) Time series of vertical velocity (blue line, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), temperature (red line, unit: $^{\circ}\text{C}$), relative humidity (shaded area), and wind forecasts at Xujiahui Station from EC predictions, (b) 10 m wind field forecast from EC prediction at 08:00 BT 17 March 2015 (Green circle shows the location of Shanghai), and (c) visibility forecast at 08:00 BT 17 from SMS-WARMS (2nd) prediction (Green circle shows the location of Shanghai), initiated at 20:00 BT 15 March 2015

3.1.2 预报的跳跃性

从表 1 中可以看到对同一天的最高气温预报, 不同模式之间会存在较大的差异, 甚至同一模式不同起报时间之间也会存在一定的差异 (预报跳跃性), 预报员对于这些差异应该予以重视, 并分析产

生的原因, 及时与实况比较做出订正, 而不是仅仅参考模式诊断输出的最高气温预报。例如, 对于 18 日最高气温的预报, 华东区域模式在 15、16 和 17 日连续三天 20 时起报的结果跳跃性极大 (其中 15 日 20 时起报最为接近实况), 但却没有引起预报员的足够

重视和细致的分析。预报员认为:由于华东区域模式的预报跳跃性较大(如,18日最高气温预报,15日20时起报为 17.9°C ,16日20时起报为 26.9°C ,17日20时起报为 19.9°C),其结果不太可信,同时,前一天华东区域模式最高气温的预报误差较大(实况为 23.1°C ,15日20时起报为 19.3°C ,16日20时起报为 18.7°C),本次预报的误差可能也会很大,预报结果不太可以参考。

现通过对比三个起报时次徐家汇站地面气象要素随时间变化的预报曲线(图6),来分析华东区域模式预报的18日最高气温差异。15日20时起报,预报18日徐家汇白天为阵雨转阴天(图6a),天空状况较差,地面转风时间较早,18日06时左右就由偏南风转为西北偏西风(图中黑线为标注的转风时间),因此18日白天升温乏力,最高气温预报为 17.9°C 。而16日20时起报,预报18日徐家汇白天为阵雨天气(图6b),天空状况同样较差,但是地面转风时间要到18日16时左右才由南到西南风转为西北偏西风,前期偏南风强盛暖平流显著,虽然天空状况不佳但受到暖平流影响,最高气温预报高达 26.9°C 。17日20时起报的18日徐家汇天空状况与前两个时刻起报的天空状况预报相比要好一些,08时之前有阵雨,之后转为阴到多云,甚至在15时之后预报为多云到晴的天气;尽管如此,由于18日早上10时左右地面风向就由偏南风转为西北风,因此升温时段较短,预报的最高气温为 19.9°C ,后期虽然天空打开有利于升温,但也仅上升到 19.6°C 。

通过对不同起报时次的对比分析得出,影响18日最高气温最关键的因素是冷暖平流,天空状况影响相对较小,而地面转风时间是此次预报的关键。因此,预报员在制作预报和实况监测时应该更关注上游地区实况风场,判断冷锋的移动速度和冷空气影响上海的时间。

3.1.3 预报的不确定性

在日常的业务预报中,使用较多的仍是确定性预报,预报员在使用集合预报时也多仅参考集合平均,往往会忽视集合预报能够提供一些极端情况下的预报能力,同时对集合预报离散度和概率预报所能反映的预报不确定性也未引起足够重视。杜钧和

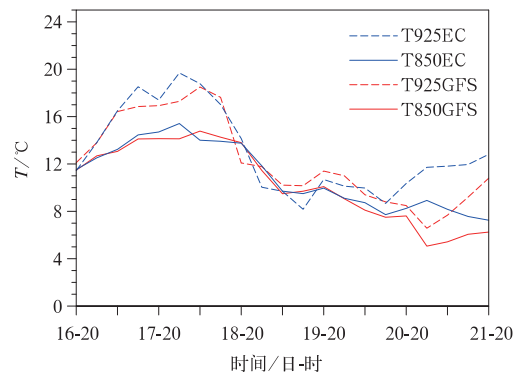


图4 2015年3月16日20时起报的EC和GFS控制预报850和925 hPa温度预报随时间变化图

Fig. 4 Time series of 850 hPa and 925 hPa temperature from EC and GFS control forecasts initiated at 20:00 BT 16 March 2015

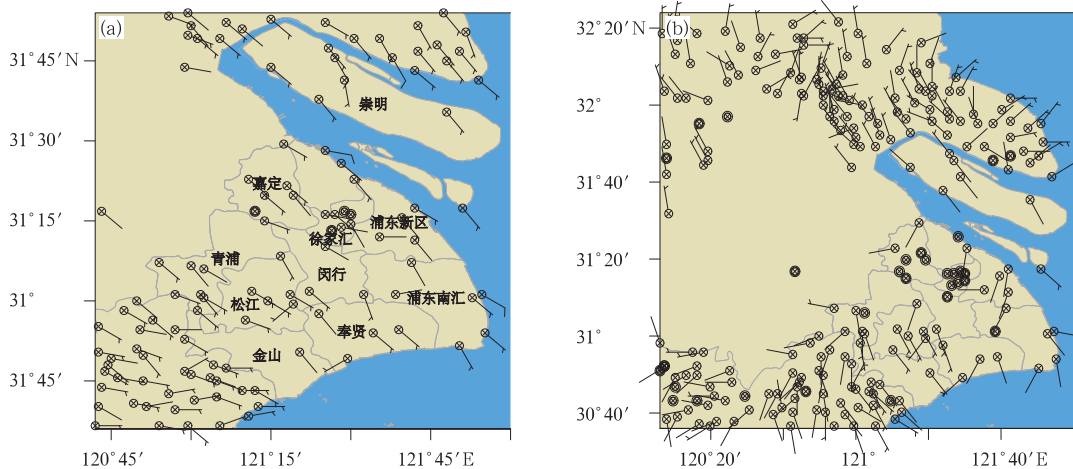


图5 2015年3月(a)17日05时和(b)18日05时上海及其周边地区地面风场分布图

Fig. 5 10 m wind observation in Shanghai and its surrounding areas at 05:00 BT of 17 (a) and 18 (b) March 2015

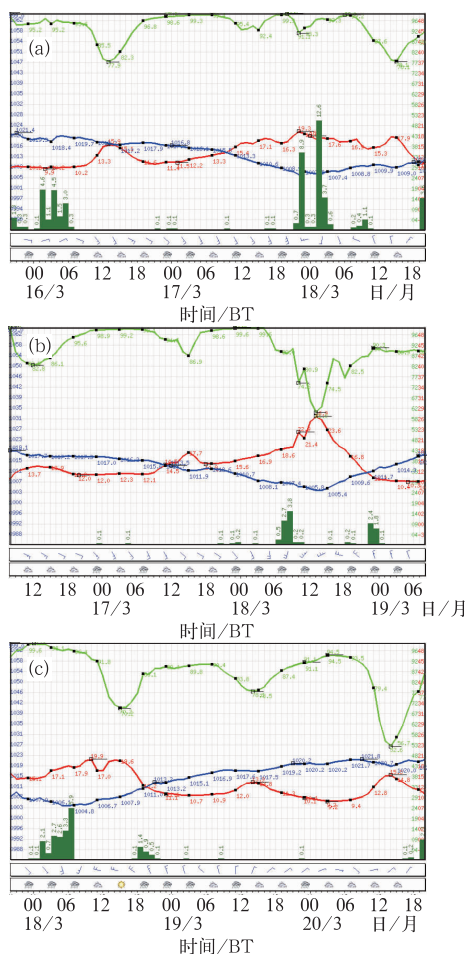


图 6 2015 年 3 月华东区域模式不同起报时次徐家汇站地面气象要素随时间变化的预报曲线

(a)15 日 20 时起报, (b)16 日 20 时起报,
(c)17 日 20 时起报
(红线为温度, 蓝线为气压, 绿线为相对湿度,
柱状为降水量)

Fig. 6 Time series of surface temperature (red line), pressure (blue line), relative humidity (green line), and precipitation (bars) at Xujiahui Station from SMS-WARMS (2nd) prediction, initiated at (a) 20:00 BT 15, (b) 20:00 BT 16, and (c) 20:00 BT 17 March 2015

陈静(2010a)曾指出预报员可以根据集合成员间的离散度大小来发现自己所面临的预报问题, 确定哪里和哪些天气系统或要素的不确定性大、较难预报, 继而从天气的角度去寻找原因。

本文选取表 1 中 48 h 预报时效内对 17 和 18 日最高气温预报离散度最大的两个时次的集合预报进行分析。图 7 是对各集合成员预报的最高气温从小到大依次排列后, 绘制的各集合成员 08 时及最高

气温时刻 2 m 气温、10 m 风向、风速、云量和降水预报时间序列。表 2 中给出了相应的离散度数值, 其中离散度变化率采用如下公式计算:

$$\text{离散度变化率} = \frac{\text{离散度}(T_{\max}) - \text{离散度}(08)}{\min[\text{离散度}(T_{\max}), \text{离散度}(08)]} \quad (2)$$

离散度变化率符号反映了最高气温发生时刻与 08 时相比, 该预报变量的离散度是增大(正值)还是减小(负值), 而其大小反映了离散度(不确定性)变化的程度。

从图 7a 中可见, EC 各集合预报成员预报的 17 日 08 时 2 m 气温多在 12~13℃ 附近, 与实况 13.1℃ 接近, 且离散度较小仅为 0.62℃; 10 m 风速预报多在 3~5 m·s⁻¹, 比实况的 1 m·s⁻¹ 偏大, 但离散度也较小(0.81 m·s⁻¹), 表明 EC 集合预报对徐家汇的 10 m 风速大小预报存在明显的系统性偏大; 风向预报为东南风, 云量接近 10 成云, 这些均与实况一致。从降水预报来看, 大部分成员报了 17 日 02—08 时有 1.5 mm 以下的弱降水, 与实况无降水但有轻雾的天气存在一定差异。表 2 中 17 日 08 时至最高气温发生时刻的离散度变化率均为正值, 表明随着预报时效的延长, 各气象要素预报的不确定性逐渐增大。图 7c 中 EC 各集合预报成员预报的 17 日最高气温在 14~22℃, 均低于实况的 23.1℃, 10 m 风速预报均在 4 m·s⁻¹ 左右, 仍然比实况 1 m·s⁻¹ 偏大; 但从风速分布来看, 基本满足风速预报越小的成员, 其最高气温预报越高(20℃ 以上); 值得注意的是其中有一个成员预报风速较小但最高气温仍然偏低, 其原因是该成员预报的降水率达到了 30 mm·(6 h)⁻¹, 如此强的降水对应天空状况差, 不利于模式升温。从云量预报来看, 均预报了 9 成以上, 比实况略偏多, 但是最高气温预报较高的成员都相比 08 时的云量预报有所减少, 预报出了天空略有打开的趋势; 而从 08 时至最高气温时刻的降水预报来看, 预报降水强度较强的成员其最高气温预报也偏低, 大部分最高气温预报较高的成员均未预报有降水。

表 2 中总云量和降水率的离散度变化率远远大于其他变量且为正值, 表明从 17 日 08 时至最高气温发生时刻, 天空状况和降水不确定变化的程度最大, 且不确定性随时间逐渐增大, 应引起预报员的足够重视, 特别关注最高气温发生时刻的天空状况和降水情况。

图 7b 中 EC 各集合预报成员预报的 18 日 08

时 2 m 气温多在 13~17℃ 附近,实况 16.4℃ 落在该区间中,但离散度(1.81℃)较大;10 m 风速预报多在 2~6 m·s⁻¹,而实况为静风,依旧存在明显的系统性偏大,离散度也较大(1.53 m·s⁻¹);最高气温预报较低的成员 08 时多为西北偏西风,且云量较多,而最高气温预报较高的成员 08 时多为西南偏南风,云量较少。由上文对实况的分析可知,18 日 08 时徐家汇站有降水,满天云,且上海西部的风向已转为偏西风;从降水预报来看,大部分成员报了 18 日 02—08 时的降水,但离散度(4.31 mm)较大。图 7d 中 EC 各集合预报成员预报的 18 日最高气温在 14

~26℃,实况 18.9℃ 落在该区间中;10 m 风速预报均在 3 m·s⁻¹ 以上,仍比实况的 1 m·s⁻¹ 偏大,风向预报显示大部分成员均已转为西北风,而最高气温预报较高的几个成员风向仍为西南偏西风,表明冷空气影响时段对于最高气温预报的影响较大。从云量预报来看,离散度比 08 时更大,最高气温预报较低的成员仍预报满天云,而其他成员则预报降水结束时间较早,天空云量有所减少,有利于气温的上升。而降水预报则显示,大部分成员预报 08 时至最高气温时刻有弱降水,与实况相符。

一般情况下,随着预报时效的延长,预报的离散

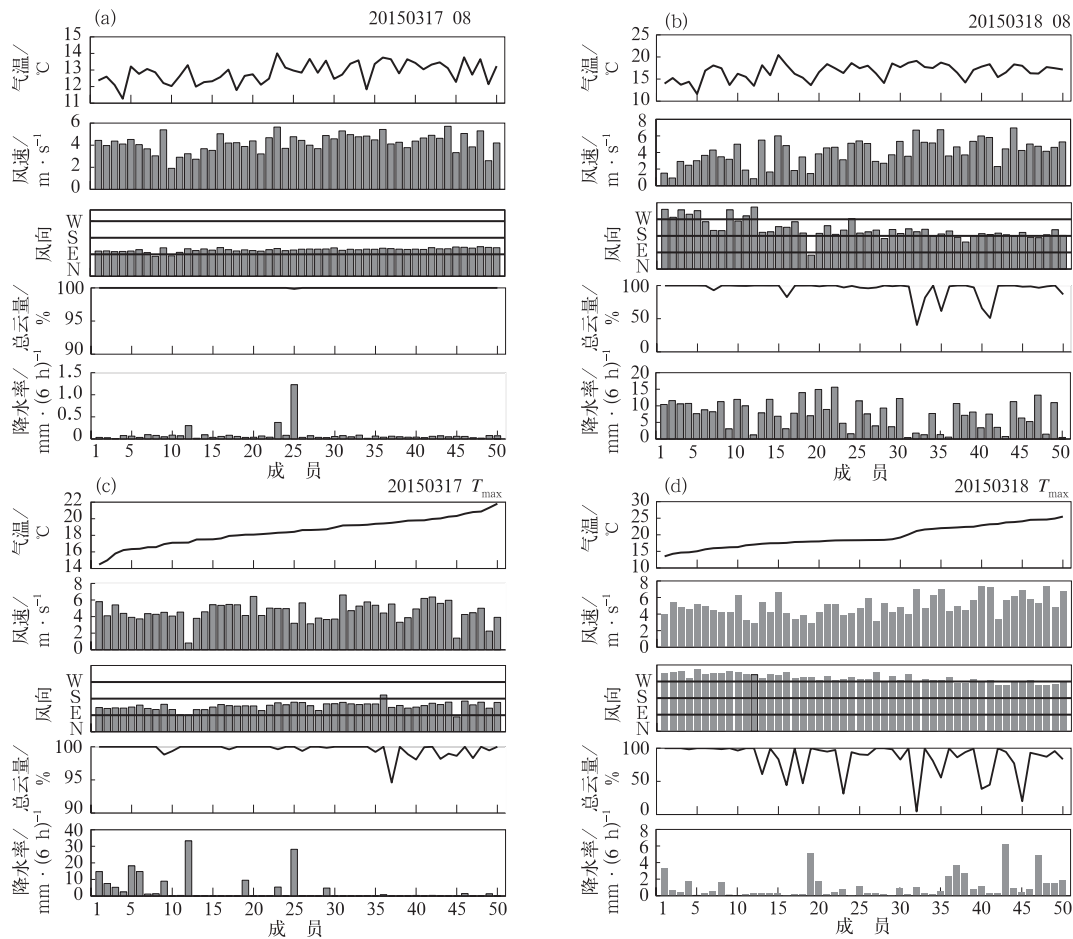


图 7 2015 年 3 月 EC 集合预报各成员预报的徐家汇站 2 m 气温、
10 m 风速、10 m 风向、总云量和降水率

(a)15 日 20 时起报 17 日 08 时,(b)16 日 20 时起报 18 日 08 时,

(c)15 日 20 时起报 17 日最高气温时刻,(d)16 日 20 时起报 18 日最高气温时刻

Fig. 7 2 m temperature, 10 m wind speed, 10 m wind direction, total cloud cover and precipitation rate at Xujiahui Station from EC ensemble forecasts of each member

(a) 08:00BT 17 initiated at 20:00 BT 15, (b) 08:00 BT 18 initiated at 20:00 BT 16,

(c) the maximum temperature time on 17 initiated at 20:00 BT 15, and

(d) the maximum temperature time on 18 initiated at 20:00 BT 16 March 2015

表 2 离散度及离散度变化率
Table 2 Spread and its variation rate

起报时间	15 日 20 时			16 日 20 时		
变量	17 日 08 时 离散度	17 日最高气温 时刻离散度	离散度 变化率	18 日 08 时 离散度	18 日最高气温 时刻离散度	离散度 变化率
2 m 气温	0.62℃	1.63℃	162.9%	1.81℃	3.32℃	83.4%
10 m 风速	0.81 m·s ⁻¹	1.18 m·s ⁻¹	45.7%	1.53 m·s ⁻¹	1.22 m·s ⁻¹	-25.4%
10 m 风向	10.28°	20.33°	97.8%	51.63°	23.02°	-124.3%
总云量	0.02%	0.89%	4350%	12.85%	23.79%	85.1%
降水率	0.17 mm·(6 h) ⁻¹	7.09 mm·(6 h) ⁻¹	4071%	4.31 mm·(6 h) ⁻¹	1.39 mm·(6 h) ⁻¹	-210.1%

度应该逐渐增大;而 18 日的预报则显示出相反的特征,除了 2 m 气温和总云量以外,08 时预报 10 m 风速、10 m 风向和降水率的离散度均大于最高气温时刻,导致离散度变化率呈现负值。其中,降水率和 10 m 风向的离散度变化率绝对值较大,表明这两个要素的不确定性变化程度较大,而这两个要素体现的即是冷空气的影响和降水的停止时间;由于离散度变化率为负值,因此预报员应更加关注 08 时各气象要素的情况,根据实况来不断调整预报结果。

在 EC 集合预报 16 日 20 时起报的 18 日最高气温中,选取与实况(16.8℃)最接近和预报误差最大的两个成员,分别称为最佳成员(预报 16.8℃)和最差成员(预报 25.5℃)。最高气温的预报与模式低层要素的影响关系密切,因此对最佳和最差成员预报的低层温度平流、相对湿度和降水进行分析。18 日 08 时 1000 hPa 高度处,最佳和最差成员的冷暖平流分布存在显著差异;最佳成员的冷暖平流交界零线位于上海西北部地区(图 8a),表明冷锋已影响上海,冷锋后部气温开始回暖;而最差成员的零线位置偏北(图 8c),位于江苏南部,上海仍处在弱的暖平流区内,两者的差值也显示了最佳成员预报的上海地区冷平流强度强于最差成员(图 8e)。两个成员对 18 日 02—08 时的降水预报显示,最佳成员预报上海地区有 1~10 mm 的降水,而最差成员则仅预报了 1 mm 以下的弱降水,降水强度上最佳成员也更接近实况。从低层相对湿度所反映的天空状况来看,最佳成员预报 18 日白天 1000~850 hPa 的相对湿度都达到 90%以上(图 8b),而最差成员预报的则在 75%~85%(图 8d),两个成员的差值也显示在 18 日白天相对湿度预报的差异较大(图 8f)。

3.2 相似个例统计

表 3 为 2007—2015 年上海徐家汇春季(3—5 月)与本文个例相似,最高气温主观预报误差较大

(4℃以上),且 EC 集合平均预报误差也较大(1℃以上)的 11 个预报失败案例统计;除 2012 年以外,温度预报失败每年都有发生。与前文分析的个例相似,天空状况(云量、降水和雾)及冷空气影响的预报与实况存在显著差异,从而导致了预报的失败。在主观预报比实况偏低的个例中(个例 1—4、8、10),除个例 2 以外,上午至中午的实况云量均比主观预报偏少,从而更有利于气温的上升,与前文 2015 年 3 月 17 日的预报失败原因相同,而个例 2 是由于降雨量大小的预报偏差导致的,与造成上文中失败个例的原因不同,但这也是会导致最高气温预报失败的原因之一。在主观预报比实况偏高的个例中(个例 5—7、9、11),上午至中午的实况云量均比主观预报偏多,不利于气温的上升,其中个例 6 与前文 2015 年 3 月 18 日的预报失败原因相似,除了天空状况的预报与实况有偏差以外,还受到了冷空气扩散的影响,导致实况的最高气温比主观预报偏低。

从 EC 集合最高气温预报的离散度来看,除 2010 年 4 月 9 日的 0.99℃以外,其余都在 1℃以上,当 EC 集合最高气温预报的离散度较大时,表明最高气温预报不确定性较大,需要引起预报员的重视。

3.3 预报中仍需改进的方面

从前文的分析可以看出,数值模式预报的跳跃性和集合预报所反映的不确定性都能为预报提供有用的信息,在业务预报中需要开发针对温度预报的数值模式和集合预报分析诊断产品。例如,为方便预报员快速对数值模式跳跃性做出判断,针对同一时次温度预报开发同一模式不同时次起报的要素预报对比图产品(图 6),参考 Zsoter et al (2009)的 Jumpiness 指数及衡量降水预报的 Ehret(2010)的收敛指数、Lashley et al(2008)的预报收敛评分,针对温度预报开发相应的预报跳跃指数产品对跳跃性

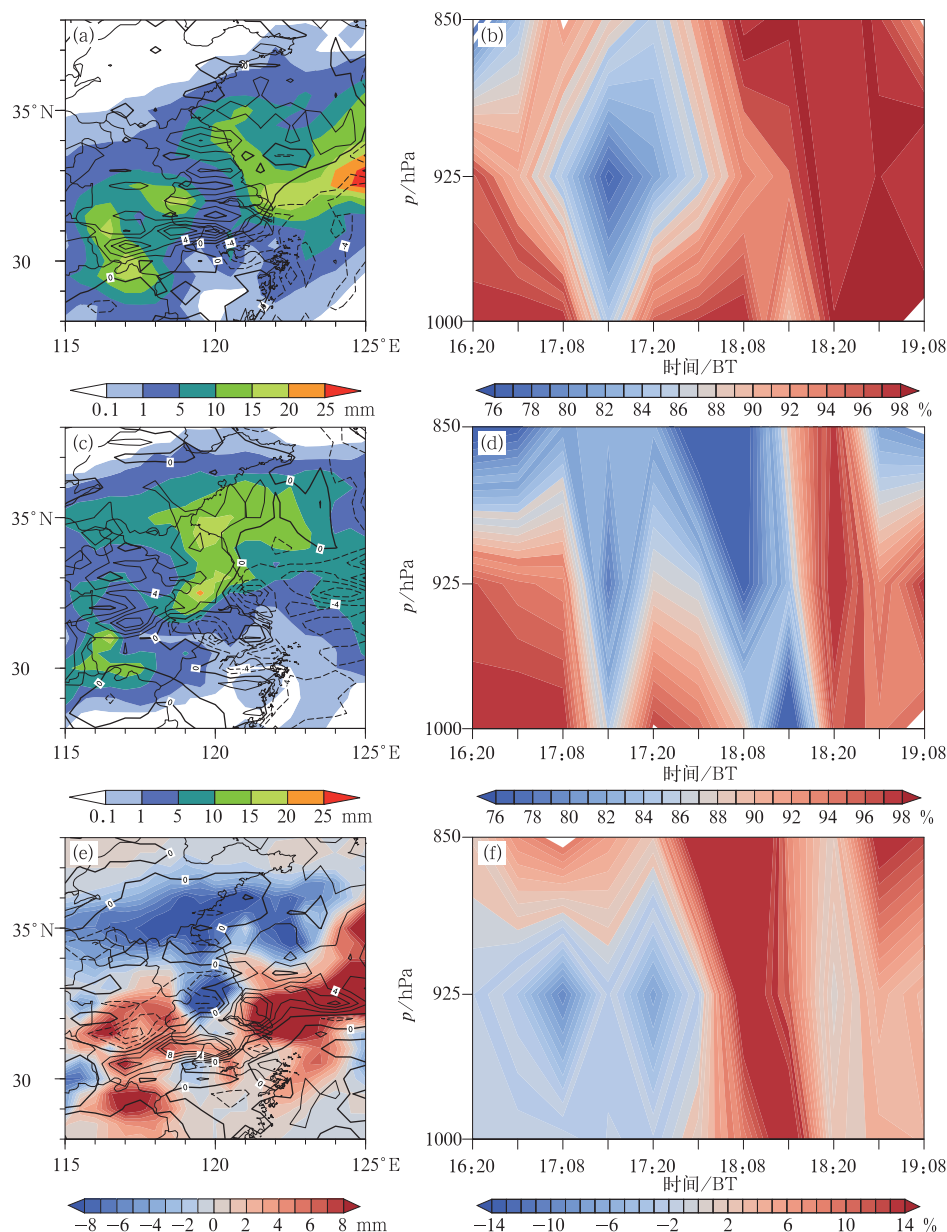


图 8 EC 集合预报 16 日 20 时起报徐家汇站边界层温度平流、相对湿度和降水预报

- (a) 18 日 08 时最佳成员 1000 hPa 温度平流(等值线)和降水(填色)预报,
 (b) 最佳成员 1000~850 hPa 相对湿度预报(填色)的时间序列,
 (c) 18 日 08 时最差成员 1000 hPa 温度平流(等值线)和降水(填色)预报,
 (d) 最差成员 1000~850 hPa 相对湿度预报(填色)的时间序列,
 (e) 18 日 08 时最佳成员与最差成员 1000 hPa 温度平流(等值线)和降水(填色)预报差值,
 (f) 最佳成员与最差成员 1000~850 hPa 相对湿度预报差值(填色)的时间序列

Fig. 8 The advection of temperature, relative humidity and precipitation forecasts in the boundary layer at Xujiahui Station from EC ensemble forecasts

- (a) temperature advection (contour) and precipitation (shaded) at 1000 hPa of the best member at 08:00 BT 18, (b) the relative humidity (shaded) time series of the best member in 1000—850 hPa, (c) same as Fig. 8a, but for the worst member, (d) same as Fig. 8b, but for the worst member, (e) same as Fig. 8a, but for the difference between the best and worst members, and (f) same as Fig. 8b, but for the difference between the best and worst members, initiated at 20:00 BT 16 March 2015

表 3 2007—2015 年春季最高气温预报失败个例统计 (42 h 预报时效,单位:℃)

Table 3 Spring maximum 2 m temperature forecast failure cases from 2007 to 2015 (42 h forecast, unit: ℃)

个例 编号	日期	实况	主观 预报	EC 集合平均	EC 离散度	天气状况
1	2007 年 3 月 10 日	15.4	11	13.6	1.66	实况 预报 阴到多云 阴有时有小雨,下午转多云
2	2008 年 4 月 20 日	22.1	18	16.1	1.39	实况 预报 小雨 阴转阴有阵雨
3	2008 年 5 月 23 日	33.4	27	26.7	1.39	实况 预报 晴到多云 阴有时有阵雨
4	2009 年 4 月 15 日	29.2	25	24.1	1.17	实况 预报 晴到多云 晴转多云 上午前局部地区有雾
5	2010 年 4 月 9 日	12.4	19	16.4	0.99	实况 预报 阴有时有小雨 多云到晴
6	2011 年 5 月 21 日	24.4	30	31.9	1.76	实况 预报 阴局部地区有阵雨 冷空气扩散 多云,局部地区阴有短时阵雨或雷雨
7	2013 年 4 月 24 日	17.9	22	22.1	1.06	实况 预报 阴到多云 多云
8	2013 年 4 月 30 日	21.3	16	15.0	2.70	实况 预报 局部短时小雨 中午转阴到多云 阴有雨,下午转转阴到多云
9	2013 年 5 月 6 日	18.8	23	22.7	1.02	实况 预报 阴有阵雨 多云到阴有短时阵雨
10	2014 年 5 月 14 日	28.1	23	22.6	1.97	实况 预报 小雨,上午转多云 阴有阵雨或雷雨,局部地区雨量可达大雨程度
11	2015 年 4 月 4 日	17.9	22	20.9	2.60	实况 预报 阴有时有阵雨 阴到多云局部地区有阵雨

进行定量分析;为方便预报员快速对集合预报的不确定性做出判断,可以开发针对影响温度预报要素的各成员排序图(图 7),并定量计算各要素的离散度及离散度变化率(表 2)产品。

但是由于大气系统的非线性和复杂性,天气预报依然会存在极大的不确定性;而目前对公众发布的预报都是单一值的确定性预报,预报员在制作预报时还需要考虑前后预报的连续性,在不出现灾害性天气的情况下,第二天早上对预报修正的幅度很难达到合理或接近完美的地步。因此,天气预报的发布形式也应该有所变化,预报员可以将不确定性信息提供给公众,让公众根据各自的需求选择最佳决策结果(杜钧和陈静,2010b;杜钧和邓国,2010)。例如可以利用集合预报提供不同最高气温阈值的概率预报,某一概率所对应的最高气温预报数值,或最高气温的不确定性区间范围等;这样对于不同的用户,例如体弱多病的老人、小孩和体质较好的年轻人可以根据自己需求采取不同的应对措施,也避免了单一预报值修正幅度过大的缺陷。

此外,业务台站缺乏对集合预报的系统性检验

和评估,导致预报员不了解业务化集合预报系统的性能,这也是目前预报员无法更好地使用集合预报的主要原因。根据上文分析可知,在本个例中,EC 集合预报对于徐家汇 10 m 风速的预报存在系统性偏大;在平时的业务工作中预报员需要了解在不同天气形势下集合预报会产生什么样的系统性偏差,并对偏差的量级有所了解,这样才能进行合理的订正。对集合预报的检验和评估还包括衡量集合预报系统离散度对可预报性的反映能力(Whitaker and Lough,1998;Talagrand et al,1997)、集合概率预报的可靠性和分辨率(Wilks,2006;Jolliffe and Stephenson,2012)等。例如,如果对离散度和可预报性关系的检验显示集合系统严重欠离散,则表明集合系统经常会漏报极值,该系统的可信度就下降;预报员在使用该集合预报系统的结果时就应该将这一点考虑在内,防止对极值的漏报。

4 结论和讨论

通过对 2015 年 3 月 17—18 日上海地区连续两

天最高气温预报失败的典型案例进行分析表明,17日由于白天天空状况转好且上海位于暖区中,暖平流显著,加之东南风较小,海面气温较低导致的冷平流对徐家汇站的影响较小,使得实况最高气温达到 23.1°C ,比主观预报的 19°C 高出 4.1°C ;而18日由于冷空气的影响时间较早,天空状况较差,白天升温乏力,实况最高气温仅 16.8°C ,比主观预报的 24°C 低了 7.2°C 。

本文利用预报时所能获得的资料,分析得到了预报失败原因:

(1) 17日最高气温预报偏低的主要原因是对于17日白天天空状况判断失误,这主要是由于预报员对EC确定性数值预报的形势场及影响气温预报的低层湿度场预报过于信赖;此外数值模式对17日的东南风预报偏强,更进一步加大了预报误差。

(2) 造成18日最高气温预报偏高的主要原因是对冷空气影响时间的判断失误,预报员对数值模式预报的形势场和地面风场过于信赖,忽略了本地及上游地区的天气实况,未识别出数值预报存在的偏差;同时,预报员在进行主观订正时将模式前一天预报误差偏差考虑的权重较大,从而导致对天空状况也存在误判。

在春季气温起伏波动大的情况下,当拥有更多临近实况时,预报员应根据实况与数值模式预报的偏差,对预报做出及时有效的订正。同时,分析中也发现预报员对数值预报,特别是对EC确定性预报的形势场和影响气温预报的单一要素场的参考权重过大,而忽视了预报的跳跃性;需要分析产生这些差异的主要原因,寻找关键因子,从而在制作预报时更关注关键要素场的实况变化。随着近几年来集合预报的发展和业务化,预报员也越来越多地开始参考集合预报,但在业务上使用集合预报时,多数预报员仍仅参考集合平均结果。通过此次失败案例的分析来看,预报员应同样重视集合预报离散度所能反映的预报不确定性。随着预报时效的临近,各集合成员之间的预报离散度依然非常大时,应予以足够的警觉;当离散度变化率绝对值较大时,应加强对该要素的监测,根据其符号判断关注的时间段,随时根据实况来订正预报结论。当预报存在极大不确定性的情况下,在现有单一确定预报的基础上,应向公众提供更多不确定性信息量化的预报产品。此外,对集合预报的系统性检验、评估及数值预报释用产品开发也是目前业务台站所欠缺的工作。

此次案例特殊之处在于连续两天的最高气温预报误差都较大,且先偏低后偏高。由于目前的业务发展水平还未达到能使预报员准确掌握模式偏差信息的程度,因此第二天的预报误差里也包含了预报员复杂的心理因素,在前一天预报偏低 4.1°C 的情况下,预报员主观订正时赋予前一天误差的权重过大,从而使预报偏高误差进一步加大。而根据Cui et al (2012)对集合预报客观订正方法中权重大小的讨论显示,订正效果更好的预报中,临近时次的误差权重仅为2%,因此,在业务上需要发展客观订正方法,避免类似本案例中所出现的由于主观订正造成更大的预报误差。

当然在预报失败案例发生后我们有足够的时间和资料来深入分析,而在实际业务预报中,当在一些转折性天气条件下,数值模式对天气系统的预报存在较大偏差时,预报员需要在有限的时间内利用有限的资料分析得出结论,因此预报失误在所难免。随着互联网的迅猛发展,公众有更多的渠道来发表自己的观点和看法,这就要求预报员有更强的责任心,尽可能地避免不必要的预报失误;同时也需要利用这一有利的工具多做科普宣传,例如提高公众对概率预报和可预报性的认识,让公众能更科学地理解预报结果的偏差。

参考文献

- 陈圣劼,姜麟,韩桂荣,等,2015. 2014年春节期间江苏淮北地区气温预报误差成因分析[J]. 气象与环境学报,31(5):63-70.
- 董李丽,李清泉,丁一汇,2015. 全球变暖背景下我国春季气温的时空变化特征[J]. 气象,41(10):1177-1189.
- 杜钧,陈静,2010a. 单一值预报向概率预报转变的基础:谈谈集合预报及其带来的变革[J]. 气象,36(11):1-11.
- 杜钧,陈静,2010b. 天气预报的公众评价与发布形式的变革[J]. 气象,36(1):1-6.
- 杜钧,邓国,2010. 单一值预报向概率预报转变的价值:谈谈概率预报的检验和应用[J]. 气象,36(12):10-18.
- 郭换换,段明铿,智协飞,等,2016. 基于TIGGE资料的预报跳跃性特征[J]. 应用气象学报,27(2):220-229.
- 黄治勇,张文,陈璇,等,2011. 湖北省乡镇温度预报方法初探[J]. 气象,37(12):1578-1583.
- 李佰平,智协飞,2012. ECMWF模式地面气温预报的四种误差订正方法的比较研究[J]. 气象,38(8):897-902.
- 刘帅,贺金娜,全美兰,等,2015. 抚顺地区一次温度预报错误分析[J]. 现代农业科技,(1):233-234.
- 马清,龚建东,李莉,等,2008. 超级集合预报的误差订正与集成研究[J]. 气象,34(3):42-48.
- 马旭林,周勃扬,时洋,等,2016. B08RDP区域集合预报温度场质量

- 评估与综合偏差订正[J]. 大气科学学报, 39(5):643-652.
- 苗爱梅, 胡永祥, 郭玉玺, 等, 1998. 以数值产品为基础的省级分县温度预报方法[J]. 气象, 24(9):41-46.
- 彭琳玲, 孙敏, 潘益农, 2012. 基于条件价值评估方法分析中国公众气象服务效益[J]. 气象科学, 32(4):411-417.
- 孙云, 王丽荣, 匡顺四, 等, 2012. 石家庄春季一次气温预报失误原因探讨[J]. 气象与环境科学, 35(S1):19-23.
- 佟铃, 彭新东, 范广州, 等, 2017. GRAPES 全球模式的误差评估和订正[J]. 大气科学, 41(2):333-344.
- 王婧, 徐枝芳, 范广洲, 等, 2015. GRAPES-RAFS 系统 2 m 温度偏差订正方法研究[J]. 气象, 41(6):719-726.
- 王亚军, 勾晓华, 刘普幸, 等, 2006. 甘肃榆中 200 年来春季气温的变化[J]. 中国沙漠, 26(2):283-285.
- 王冀, 江志红, 张艳梅, 等, 2005. 东北地区春季气温异常环流背景分析[J]. 气象科技, 33(2):128-132.
- 严济远, 徐家良, 1996. 上海气候[M]. 北京:气象出版社:24.
- 张定全, 王毅荣, 2005. 中国黄土高原地区春季气温时空特征分析[J]. 高原气象, 24(6):898-904.
- 张秀丽, 2008. 从一次预报失误看北京周边特殊地形对局地气温的影响[C]//中国气象学会 2008 年年会天气预报准确率与公共气象服务分会场论文集. 北京:中国气象学会.
- 赵江洁, 2007. 一次强降温预报失误原因探讨[J]. 气象研究与应用, 28(3):53-55.
- 智协飞, 季晓东, 张璟, 等, 2013. 基于 TIGGE 资料的地面气温和降水多模式集成预报[J]. 大气科学学报, 36(3):257-266.
- 智协飞, 林春泽, 白永清, 等, 2009. 北半球中纬度地区地面气温的超级集合预报[J]. 气象科学, 29(5):569-574.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等, 2007. 天气学原理和方法:第 4 版[M]. 北京:气象出版社:63, 29.
- Cui Bo, Toth Z, Zhu Yuejian, et al, 2012. Bias correction for global ensemble forecast[J]. Wea Forecasting, 27(2):396-410.
- Ehret U, 2010. Convergence index: a new performance measure for the temporal stability of operational rainfall forecasts[J]. Meteor Zeitschr, 19(5):441-451.
- Jolliffe I T, Stephenson D B, 2012. Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science[M]. 2nd ed. Chichester: Wiley and Sons.
- Lashley S L, Fisher L, Simpson B J, et al, 2008. Observing verification trends and applying a methodology to probabilistic precipitation forecasts at a national weather service forecast office[C]//Proceedings of the 19th Conference on Probability and Statistics. New Orleans, LA: American Meteorological Society.
- Pappenberger F, Cloke H L, Persson A, et al, 2011. HESS Opinions "On forecast (in) consistency in a hydro-meteorological chain: curse or blessing?"[J]. Hydrol Earth Syst Sci, 15(7):2391-2400.
- Talagrand O, Vautard R, Strauss B, 1997. Evaluation of probabilistic prediction systems[C]//Proceedings of the Workshop on Predictability. United Kingdom:Shinfield Park.
- Whitaker J S, Lough A F, 1998. The relationship between ensemble spread and ensemble mean skill[J]. Mon Wea Rev, 126(12):3292-3302.
- Wilks D S, 2006. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences [M]. 2nd ed. San Diego, California: Academic Press.
- Yuan Huiling, Sun Min, Wang Yuan, 2016. Assessment of the benefits of the Chinese public weather service[J]. Meteor Appl, 23(1):132-139.
- Zhi Xiefei, Qi Haixia, Bai Yongqing, et al, 2012. A comparison of three kinds of multimodel ensemble forecast techniques based on the TIGGE data[J]. Acta Meteor Sinica, 26(1):41-51.
- Zsoter E, Buizza R, Richardson D, 2009. "Jumpiness" of the ECM-WF and met office EPS control and ensemble-mean forecasts [J]. Mon Wea Rev, 137(11):3823-3836.