

杜钧, Grumm R H, 邓国. 2014. 预报异常极端高影响天气的“集合异常预报法”: 以北京 2012 年 7 月 21 日特大暴雨为例 [J]. 大气科学, 38 (4): 685–699, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13218. Du Jun, Grumm R H, Deng Guo. 2014. Ensemble anomaly forecasting approach to predicting extreme weather demonstrated by extremely heavy rain event in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (4): 685–699.

预报异常极端高影响天气的“集合异常预报法”: 以北京 2012 年 7 月 21 日特大暴雨为例

杜钧¹ Richard H. GRUMM² 邓国³

1 美国国家海洋大气局国家环境预报中心, 马里兰州 20740

2 美国国家海洋大气局宾州气象台, 宾夕法尼亚州 19117

3 国家气象中心, 北京 100081

摘 要 对罕见极端高影响天气, 即使一个模式有能力预报它, 其数值预报也至少有以下难点: 一是有多大把握确定所预报的天气是极端事件? 二是其具体的定时、定量、定点预报可靠吗? 本文介绍了集合预报和气候资料相结合的“集合异常预报法”, 并通过北京 2012 年 7 月 21 日(7.21)特大暴雨事件揭示出“集合异常预报法”和集合预报可以提供比单一模式预报更可靠和更准确的信息, 从而可有效地缓解上述两大难点。作者建议中央气象台和其他有条件的台站可采用这种办法提高重大灾害性天气的预报能力。

文中具体讨论了如下三方面: (1) 标准化异常度(SA)的定义以及它同集合预报相结合提高对罕见极端高影响天气预报的可靠性, 并由此可导出一个“社会影响矩阵”来定量地表达一个预报对社会的潜在影响; (2) 利用集合预报, 特别是多模式集合预报可以克服单一模式前后预报的跳跃性或不连续性问题, 由此可延长实际可预报时效, 如北京 7.21 事件超过 100 mm 大暴雨的实际可预报时效提前了 2 天; (3) SA 还有助于认识异常天气发生的原因: 从 SA 的分布看, 造成北京 7.21 大暴雨事件的短期天气尺度背景因素是从西北方向移来的冷锋和台风倒槽的相遇; 从 SA 的演变看, 该事件的中期大背景因素是在北京东北方向有阻塞高压发展并导致北京以西地区的低槽加强和发展(地面强冷空气堆积), 在高纬度形成了一个高、低压系统相间的波列, 发展并维持, 同时诱导热带系统北进。

关键词 极端高影响天气 北京 7.21 大暴雨 社会影响矩阵 可预报性 标准化异常度 集合预报 集合异常预报法

文章编号 1006-9895(2014)04-0685-15

中图分类号 P456.7

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13218

Ensemble Anomaly Forecasting Approach to Predicting Extreme Weather Demonstrated by Extremely Heavy Rain Event in Beijing

DU Jun¹, Richard H. GRUMM², and DENG Guo³

1 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)/National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Maryland 20740

2 National Weather Service at Pennsylvania State, State College, Pennsylvania 19117

3 National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract Even if a numerical weather prediction model is capable of predicting an extreme weather event, several questions remain such as the confidence level of the predicted event and the reliability of the information related to details such as timing, location, and magnitude. In this paper, a method known as Ensemble Anomaly Forecasting, which combines ensemble forecasts with climatology, is introduced and demonstrated by using a case of extremely heavy rain

收稿日期 2013-07-18, 2013-12-14 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41075079、41075044、41275065

作者简介 杜钧, 男, 1962 年出生, 研究员, 主要从事数值集合预报业务和开发研究。E-mail: Jun.Du@noaa.gov

occurring in Beijing on July 21, 2012. The results show that these two questions can be effectively addressed through this method and ensemble forecasts by providing more reliable and consistent information than that provided by a single forecast. Therefore, we strongly recommend that forecasters apply this method in their daily operations to improve their prediction capability of rare high-impact weather events.

The following three aspects are discussed in detail in this study. (1) By comparing a forecast with climatology, the potential rarity of the predicted variable can then be quantitatively measured in terms of standardized anomaly (SA), which normally indicates an extreme event when the departure of a forecast from its climatology mean exceeds three standard deviations. By combining further with ensemble forecasts, the confidence of such an anomaly forecast can also be estimated on the basis of the SA of individual ensemble members, which provides critical information that enables a forecaster to make a more reliable forecast of a potentially rare weather event. A combination of the anomaly and confidence then defines a “societal impact matrix,” which can be used to quantitatively measure a forecast’s potential impact on society. (2) Because the synoptic scale pattern associated with this heavy rain event in Beijing is quite classical for extreme flooding events, it was a highly predictable event from the large-scale pattern perspective. For example, the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Global Forecast System (GFS) model quite successfully predicted a rainfall event of approximately 115 mm over Beijing with a lead time of approximately six days (0600, July 16). However, the detailed information such as rainfall location and intensity were highly variable or uncertain in subsequent GFS forecasts, thus resulting in low predictability. Such shifting of the model solutions from one cycle to another significantly limits the usefulness of a forecast because it is difficult to follow. In contrast, and as demonstrated by this study, ensemble-based—particularly multi-model ensemble-based—ensemble mean and probabilistic forecasts can mitigate some of the issues associated with model shifting by providing more consistent information to greatly increase forecast utility. Additionally, ensemble-based forecasts may extend the practical predictability length. For example, the predictability length of rainfall exceeding 100 mm over or near Beijing can be extended for approximately two days by using THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE) based probabilistic forecasts as compared to that by a single GFS forecast. (3) If observation or analysis is used instead of forecasts in the calculation of SA, SA can also help to determine the possible causes responsible for an extreme event. In this case, the spatial distribution of the SA reveals that the immediate short-range synoptic cause of the extreme rainfall is the merging of a cold front from the northwest and strong ridge extending from a tropical system in the southeast, which formed a favorable moisture, convergence, and vertical lifting environment for the development and maintenance of meso- and small-scale convective systems. The time evolution of the SAs further reveals that the medium-range background cause is the flow’s meridional development to form and maintain a large-amplitude low–high alternating wave train in high latitudes, particularly the development of a blocking system to the northeast of Beijing and a deepening trough to the west, resulting in a strong cold front that enhanced the north–south exchange including the northward advancement of a tropical system.

Keywords Extreme weather event, July 21, 2012 heavy rain in Beijing, Societal impact matrix, Predictability, Standardized anomalies, Ensemble forecasting, Ensemble anomaly forecasting

1 引言

目前, 数值预报已是预报员们制作日常天气预报的主要工具(杜钧和康志明, 2014)。虽然数值预报在一般情况下已基本可信, 但对于罕见的重大灾害性天气事件, 即使模式有能力预报, 它的数值解仍然有两大难点: 一是所预报的事件是否真是异常少见的高影响天气、可信度多大? 二是其相关的细节如降水起止时间、地点以及量级等是否稳定可靠? 虽然, 改进模式和初值质量会对这些难点有所改善, 但基于大气系统的混沌性和模式的高度非线性和复杂性(Lorenz, 1997; 丑纪范, 2002), 这类

少见的极端天气其可预报性往往较低, 因此这些难点不可能完全解决, 而专门处理数值预报中不确定性的集合预报(杜钧, 2002; 杜钧和陈静, 2010)在此却大有用武之地。本文旨在讨论集合预报、集合预报与气候资料结合是处理这些难点的一种有效新途径。本文针对2012年7月21日发生在北京地区的特大暴雨事件, 运用这种新方法分析讨论, 以展示它的有效性和优越性。

2012年7月21~22日北京及其周边地区发生了近60年来最大的暴雨事件。全市平均日降水量达190.4 mm, 个别地区如房山总降水量达470 mm、石景山328 mm、最大小时雨量高达100.3 mm。该事件造成北京城区大面积内涝、交通瘫痪、北京地

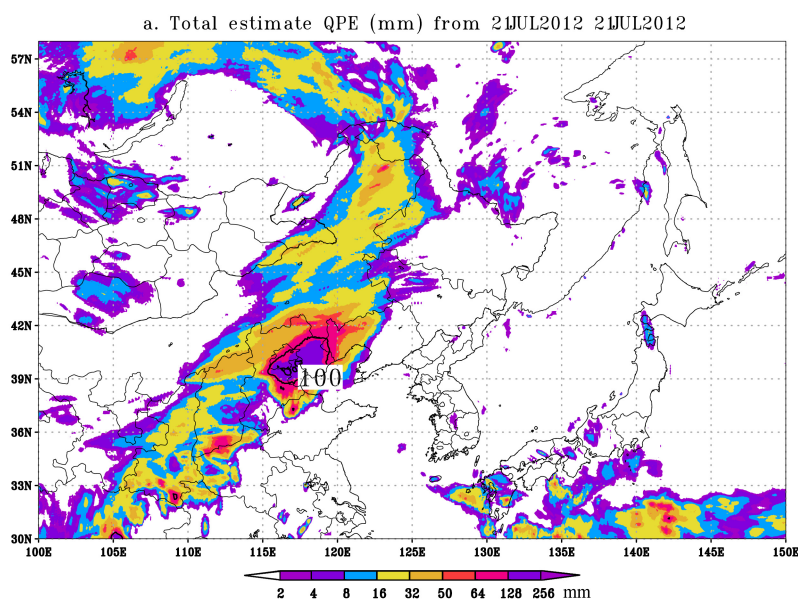


图 1 从 CMORPH 卫星资料估算得到的 2012 年 7 月 21 日 (协调世界时 00:00~24:00) 的降水量 (mm) 分布
Fig. 1 Satellite estimated rainfall (mm) for 21 July 2012 (0000–2400UTC) from the CMORPH satellite dataset

区 79 人死亡 (如包括河北地区则共计 112 人死亡)、经济损失超过百亿元。从卫星观测估计的 7 月 21 日降水 (图 1) 可以看到, 主要降水位于河北、北京、天津和黄海沿岸一带。大片地区日雨量超过 150 mm、有些地区超过 200 mm。这同实况大致一致 (当然, 局部性的峰值如位于京西山谷地带的房山 460 mm 则没有被估计出)。可见, 这次过程的降水强度同登陆台风造成的暴雨相似, 这在北方地区实属罕见。关于这次暴雨过程的详细分析, 有关文献 (湛芸等, 2012; 孙军等, 2012; 方翀等, 2012; 俞小鼎, 2012; Zhang et al., 2013) 已有报道。

2 方法和资料

什么是罕见的或异常的重大影响天气事件? 对于同样的天气, 在一个地方它可能是常见的普通天气, 但对于另一地方它也许就是罕见的高影响事件。譬如, 10 cm 的降雪在哈尔滨是常见的天气, 而对于广州来说却是极其罕见的, 因而引起的社会影响也完全不同。所以, 异常天气的定义应该很自然地要以当地、当时的气候背景作为参照 (图 2)。根据这一观点, 我们把一种天气要素的异常程度定义为它同实际气候平均值的差。另外, 考虑到天气要素在不同的地方、不同的季节其本身的变化率是很不一样的 (如一般来说变化率在高纬度地区大些而在低纬度地区小些, 冬季大些而夏季小些, 等等), 为了便于统一比较, 再将这一差值用该量的

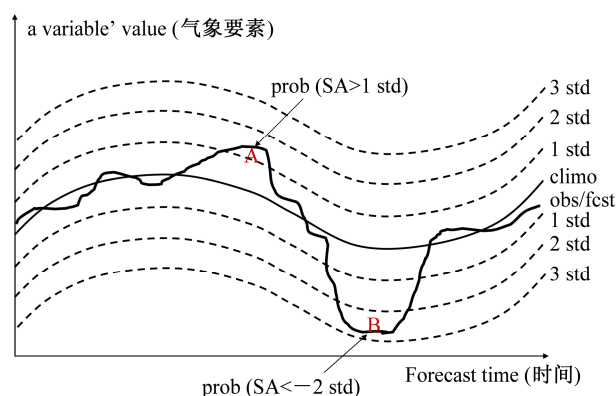


图 2 “标准化异常度”方法: 把一个预报或观测的气象要素 (粗黑线) 同其长期的气候平均 (细黑线) 以及标准差 (虚线) 进行比较来衡量该要素的异常度, 即用偏离气候平均达多少个标准差来表示

Fig. 2 A schematic diagram of Standardized Anomaly (SA) approach for comparing a forecast or an observed parameter (thick black line) with its climatological mean (thin black line) and standard deviation (dash lines) to measure this parameter's abnormality, i.e. a departure from the mean by how many standard deviations

实际气候标准差进行标准化即公式 (1) 和 (2), 并称为“标准化的异常度”或 SA (Standardized Anomaly):

$$A_{s-o}(x, t) = \frac{OBS(x, t) - MEAN_clim(x, t)}{SD_clim(x, t)}, \quad (1)$$

$$A_{s-f}(x, t) = \frac{FCST(x, t) - MEAN_clim(x, t)}{SD_clim(x, t)}, \quad (2)$$

其中, 标准化的异常度 SA 是地点 x 和时间 t 的函数。对于实况 o , 标准化异常度 $A_{s-o}(x, t)$ 就用该

要素的观测值 $OBS(x, t)$ 和实际大气的气候平均 $MEAN_{clim}(x, t)$ 和气候标准差 $SD_{clim}(x, t)$ 即用公式 (1) 计算; 对于预报 f , 标准化异常度 $A_{s-f}(x, t)$ 是用预报值 $FCST(x, t)$ 替代观测值 $OBS(x, t)$ 即用公式 (2) 计算。Grumm 等人的早期研究 (Grumm and Hart, 2001; Hart and Grumm, 2001; Junker et al., 2008; Junker et al., 2009; Graham and Grumm, 2010; Grumm, 2011a, 2011b) 把异常程度超过气候平均值 3 个标准差确定为异常的天气事件 (图 2)。注意, 如果是衡量预报的异常度即用公式 (2), 那么如果预报有很强的系统性偏差的话, 结果就有可能或高估或低估异常度的倾向。所以, 在计算 A_{s-f} 前, 最好对原始的预报资料先进行偏差订正 (马清等, 2008; 李俊等, 2014a); 或者在公式 (2) 中用模式本身的气候 (平均 $MEAN_{model}$ 和标准差 SD_{model}) 代替实际大气的气候, 即

$$A_{s-model}(x, t) = \frac{FCST(x, t) - MEAN_{model}(x, t)}{SD_{model}(x, t)}, \quad (3)$$

公式 (3) 中 $A_{s-model}(x, t)$ 是衡量该预报相对模式气候本身的标准化异常度, 可称为“模式异常度 (Model Anomaly, MA)”。在本文中我们不讨论公式 (3), 因为要把 MA 同实际大气的异常度 SA

直接联系起来还需要进一步研究模式气候同实际气候之间的定量关系。MA 有点象欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 所用的“极端预报指数 EFI (Extreme Forecast Index)” (Lalaurette, 2003; Zsoter, 2006), 但 EFI 考虑的是累积的“集合预报的概率分布”同“模式气候的概率分布”之差:

$$I_{EFI} = \int_0^1 w(p) (p - p_{ens}(p)) dp, \quad (4)$$

其中, I_{EFI} 是极端预报指数值, p 是模式气候的累积概率分布函数 (cumulative distribution function, CDF), $p_{ens}(p)$ 是基于集合预报的累积概率分布函数, $w(p)$ 是一权重函数 (较侧重概率密度分布的两尾端即极端事件)。如图 3 所示, 当集合预报概率密度函数 (PDF, probability density function) 分布的峰值位于气候概率分布峰值的右侧 (靠高值) 时 EFI 为正值, 并且愈靠近高值尾端其正值愈大, 预示高值 (如高温) 异常天气程度愈严重且发生的可能性也愈高 (图 3a、b); 反之, 当集合预报概率密度函数分布的峰值位于气候概率分布峰值的左侧 (靠低值) 时 EFI 为负值, 并且愈靠近低值尾端其负值愈大, 预示低值 (如低温) 异常天气程度愈严重且发生的可能性也愈大 (图 3c、d)。同本方法 (公式 2) 相比, 除了自动消除模式偏差的潜在影响外 [如果公式 (4) 中的 p 不用模式气候而用实况

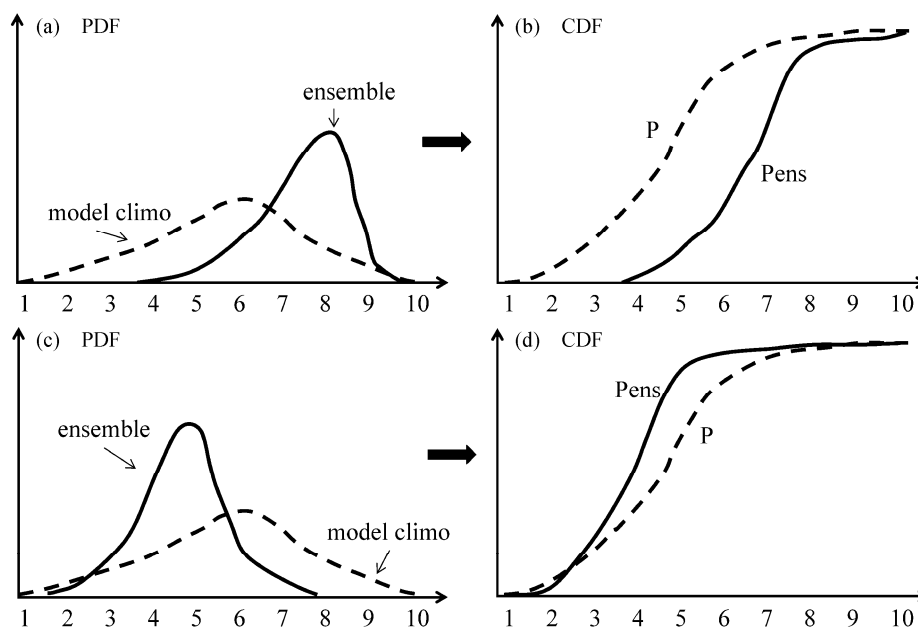


图 3 极端预报指数 (EFI) 方法: 集合预报的概率分布 (实线) 同模式气候的概率分布 (虚线) 相比较, 其中 (a) 和 (c) 为概率密度函数, (b) 和 (d) 为累积概率分布函数

Fig. 3 An illustration of Extreme Forecast Index (EFI) method: A comparison between ensemble-based probabilistic distribution (solid line) and model climate-based probabilistic distribution (dash line) in terms of (a, c) probability density function (PDF) and (b, d) cumulative distribution function (CDF)

大气的气候, 这一优点就没有了], EFI 的优点是直接的概率计算, 其绝对值的大小不但反映了事件的异常度(与模式气候平均值的距离)也包含了预报的可信度(集合预报概率密度函数峰值分布的窄宽和高低); 而本法中的 SA 仅仅只是“异常度”的度量, 要获得预报的可信度信息, 还需要单独应用到各个集合成员, 然后再集中起来计算概率(称为“集合异常预报”法, 见第 3 节的讨论)。EFI 的缺点可能是会漏掉小概率事件: 即当从集合预报中导出的概率很小(只有很少甚至只有一个集合成员报某极端事件会“发生”)而接近模式气候概率使二条 CDF 曲线很接近时, 其 EFI 值可能达不到预先设定的最小阈值而可能出现漏报现象(当然空报率也会小一些); 而本方法只要有一个集合成员报“发生”, 就会使发生概率大于零而给出预警[代价是空报率会增加。注意: 从严格意义上来说, 概率同发生或不发生没有一一对应的关系(杜钧和邓国, 2010), 所以这里的空报只是借用决定论说法的一种泛指]。另外, EFI 方法判断异常天气的能力同如何获得模式气候所用的资料和方法有关, 有研究(夏凡和陈静, 2012)指出当计算所用的模式资料具有较一致的预报误差时, EFI 对异常天气的识别能力较好。虽然本文的主要目的是介绍基于 SA 的“集合异常预报法”而不是比较“集合异常预报法”和 EFI 两方法之间的优劣, 但如能在今后实际应用例子中对此两种方法进行具体比较将是一项值得做的研究。

本文中单一模式预报资料来自美国国家海洋大气局国家环境预报中心(NCEP)的 27 km 全球预报系统 GFS (Yang et al., 2006), 集合预报资料来自 TIGGE^①, 包括美国 NCEP 和欧洲 ECMWF 的全球集合预报 [55 km GEFS (Tracton and Kalnay, 1993; Wei et al., 2008); 32 km ECEF (Molteni et al., 1996; Buizza et al., 2001)], 并以 NCEP 的全球集合预报系统 GEFS 为主。分析资料用的是美国 NCEP 的气候预报系统 CFS (Saha et al., 2006; Saha et al., 2013) 的再分析资料 CFSR (Saha et al., 2010)。实际大气的气候平均和标准差是根据过去 31 年

(1979~2009 年)的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ CFSR 资料, 应用 21 天滑动平均法(该天加上前后各 10 天再乘以 30 年)计算而得。

3 异常天气的预报及其可信度

本节应用方程(2)即 $A_{s_f}(x, t)$ 预报 2012 年 7 月 21 日北京的特大暴雨。这次过程的降水从 21 日上午北京时间 10:00 (协调世界时 02:00) 开始, 22 日北京时间 02:00 (协调世界时 21 日 18:00) 结束(谌芸等, 2012)。所以, 我们选取北京时间 21 日 20:00 (协调世界时 12:00) 为基准点, 24 小时的累积降水时段选取为该基准点的前后 12 小时即北京时间 21 日 08:00~22 日 08:00 (协调世界时 21 日 00:00~22 日 00:00)。根据物理意义和我们的经验, 低层大气的南风分量、水汽输送通量以及整层大气的可降水量是对暴雨预报有指示意义的三个气象要素^②(Maddox et al., 1979; Maddox, 1980; Corfidi, 2003; Junker et al., 2008), 图 4a~c 是根据公式(2)计算的基于 NCEP 27 km GFS 模式单一预报的三要素场 48 小时结果(850 hPa 风的 v 分量、大气可降水量和 850 hPa 高度上水平水汽通量)的 SA。由此可见, 在北京及其西南区域 2 天前的 GFS 预报的异常度相当明显: 850 hPa v 分量和可降水量场超过气候平均值达 3 个标准差, 而 850 hPa 高度上的水平水汽通量异常更高达 6~7 个标准差(北京的气候值为 $0.04 \sim 0.05 \text{ g kg}^{-1} \text{ ms}^{-1}$)。在这样有利的水汽辐合条件下, 2 天半前 24 小时的累积降水预报达到 200 mm 以上(图 4d)、中心峰值更是高达 407 mm (图 10a), 这同实况总降水量是相当接近的。鉴于极端事件往往其可预报性较低, 现在关键问题是: 既使单一模式有能力预报它, 但仅仅基于这单一模式对于强烈罕见的异常事件的预报结果, 在事件发生前数天敢于相信吗?

这时, 如果能同集合预报结合起来我们就可以定量地估计上述单一 GFS 模式的异常预报的可信度。首先, 把公式(2)应用到集合平均预报, 检查经过平滑后的集合平均预报是否也相当异常; 如是, 则说明这种异常天气的信号相当强烈。图 5 是 GEFS 21 个成员集合平均预报的异常度: 南风超强达到 3~4 个标准差(图 5a)、水汽含量超高 4~5

① TIGGE (the THORPEX Interactive Grand Global Ensemble; THORPEX, The Observing System Research and Predictability Experiment) 是世界气象组织(WMO)下世界天气研究计划(WWRP)中的一个研究项目。http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/thorpex_new.html

② 对不同的天气现象, 也许需要用不同的指示性气象要素, 这需要事先做具体的调查分析。

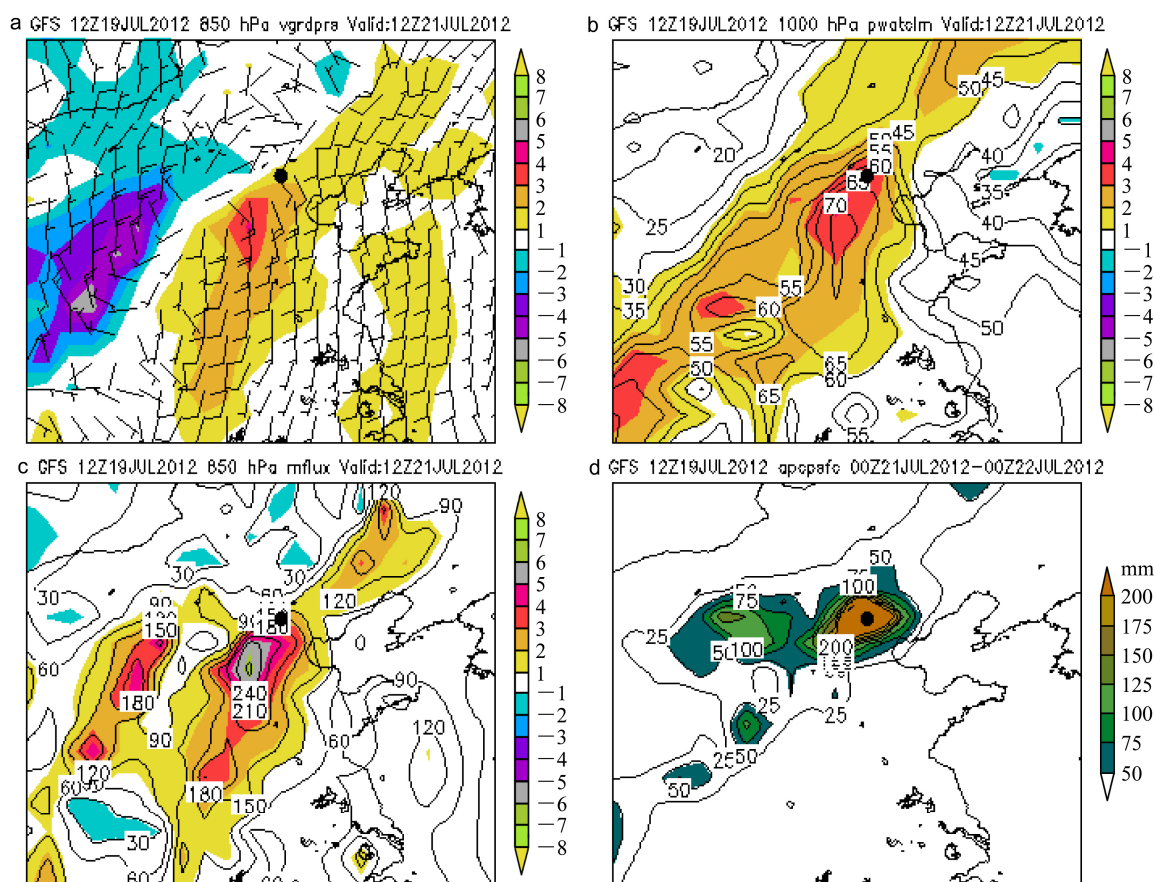


图4 NCEP 27 km 精度的单个 GFS 模式 48 小时预报(起报时间是 7 月 19 日 12:00, 终止时间是 7 月 21 日 12:00): (a) 850 hPa 高度上的风场 (m s^{-1} , 风矢量) 和南风分量 (v) 的异常度 SA (填色); (b) 大气可降水量 (mm , 等值线) 及其异常度 SA (填色); (c) 水平水汽输送通量 ($0.01 \text{ g kg}^{-1} \text{ m s}^{-1}$) 及其异常度 SA (填色); (d) NCEP 27 km 精度的单个 GFS 模式对 7 月 21 日 24 小时 (00:00–24:00) 累积降水量的 60 小时预报结果(起报时间是 7 月 19 日 12:00, 终止时间是 7 月 22 日 00:00)。时间是协调世界时, 图上的黑点表示北京的大致位置

Fig. 4 The NCEP 27 km single GFS 48-h forecasts of 850 hPa (a) winds (m s^{-1} , vector) and southerly wind (v) anomalies SA (color), (b) precipitable water (mm, contour) and its anomalies SA (color), and (c) horizontal moisture flux ($0.01 \text{ g kg}^{-1} \text{ m s}^{-1}$, contour) and its anomalies SA (color), initiated at 1200 UTC 19 July and valid at 1200 UTC 21 July 2012. The NCEP 27 km single GFS (d) 60-h forecast of accumulated quantitative precipitation (mm) for the 24 hour period of 0000–2400 UTC 21 July, initiated at 1200 UTC 19 July and valid at 2400 UTC 21 or 0000 UTC 22 July, 2012. The black dot is the approximate location of Beijing

个标准差(图 5b)、低层水汽辐合超强达 5~6 个标准差(图 5c)。图 5d 是集合平均日降水的 60 小时预报, 可见集合平均在 2 天半前就指出北京附近的日降水可接近 75 mm (半天以后的 20 日早晨的平均预报则达到近 100 mm, 见图 10a)。虽然同实况(近 200 mm)相比还是低估了许多, 但是考虑到 55 km 的模式低分辨率加上集合平均过程中的平滑作用(Du et al., 1997), 这一预报的降水量级已是相当的可观。当然, 更重要的是我们可以把公式(2)应用到每个集合成员得到所有成员的异常度预报; 然后, 就可进一步得到针对某一特定的异常度阈值(如超过 3 个标准差)的概率(集合成员数的相对频率)。此概率的大小就可以用来作为衡量上述单

一异常度预报的一种可信度: 如概率大, 可信度就大, 反之就小。同图 4 和图 5 相对应, 图 6a–c 是基于相同的 GFS 模式, 但水平分辨率约为 55 km 的 NCEP 全球集合预报系统 GEFS 21 个成员所得到的, 相同三要素的异常度超过 3 个标准差的 48 小时概率预报。可见, 北京地区超强的南风异常的可信度达到 50%~60% (图 6a), 水汽含量超强异常的可信度达 100% (图 6b), 低层水汽辐合超强异常的可信度达 80%~90% (图 6c)。如果把异常度的阈值取为超过 2 个标准差, 那么这三个要素场的异常可信度都达到 100% (图略)。图 6d 是 2 天半(60 小时)前 GEFS 所预报的, 从 7 月 21 日 08:00 至 22 日 08:00 (北京时, 协调世界时为 7 月 21 日 00:00

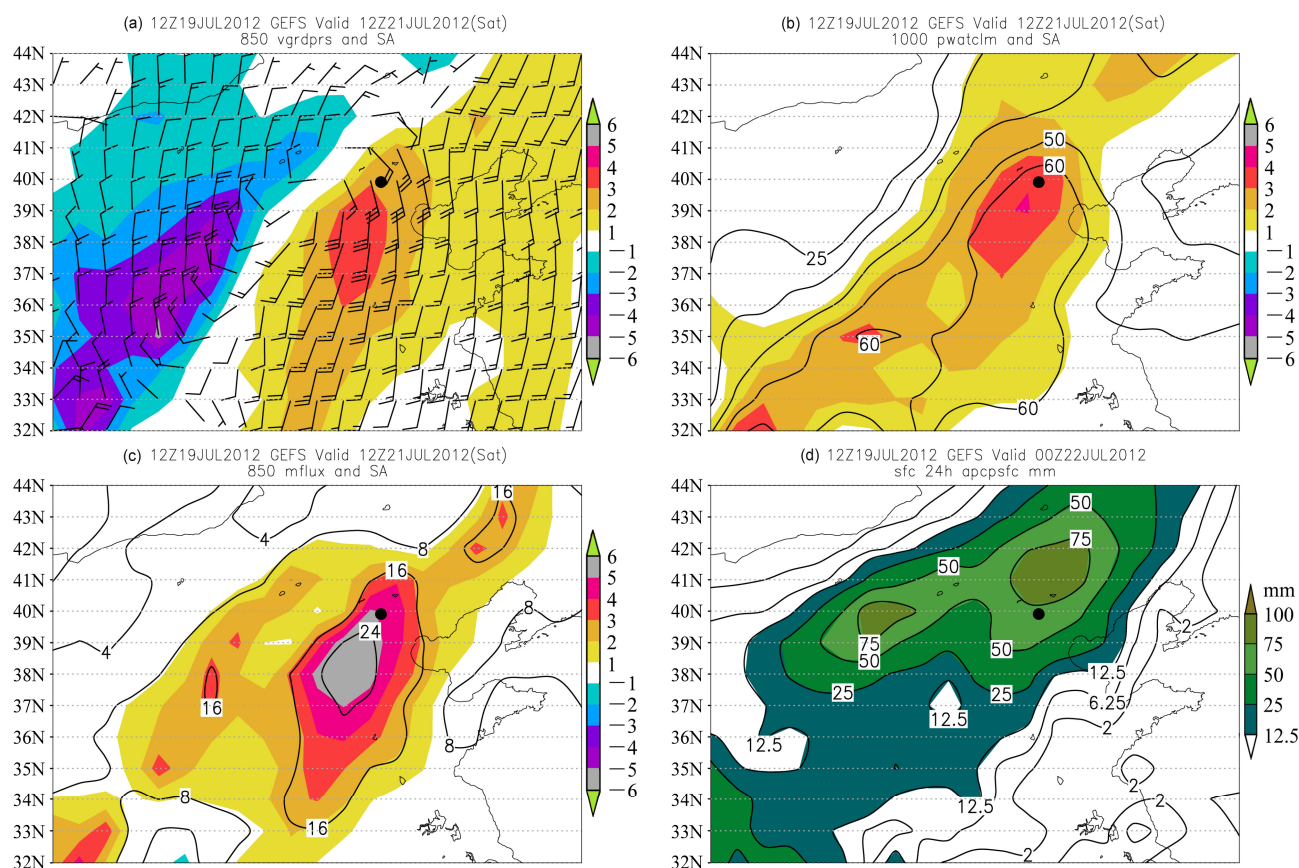


图 5 同图 4, 但是为基于 NCEP 55 km 精度的 GFS 全球集合预报系统 (GEFS) 21 个成员的集合平均预报

Fig. 5 The same as Fig. 4 but for the ensemble mean forecasts derived from the 21 members of the 55-km GFS model based NCEP Global Ensemble Forecast System (GEFS)

至 22 日 00:00) 日雨量达到或超过暴雨 ($>50 \text{ mm}$) 的概率, 北京附近约为 60% (半天后这一概率达到 81%, 1 天后达到 95%, 见图 10b)。所以, 集合平均预报本身的异常度和集合预报给出的异常预报可信度, 都支持上述单一 GFS 预报的极端异常天气可信度很高, 这给了预报员做决策时一个非常重要的信息和参考。事后证明 GFS 的预报是正确的, 北京在 7 月 21 早晨至 22 日凌晨出现了 60 年一遇的特大暴雨。这种集合预报与气候资料相结合定量估计天气的异常度以及异常天气预报的可信度可称之为“集合异常预报法”。

这样, 有了未来天气事件的异常度 (代表天气影响的大小) 和异常预报的概率 (代表预报的可信度), 就可以来构制一个二维定量的灾害性天气预报“社会影响矩阵” (图 7)。“社会影响矩阵”综合考虑了天气的影响度 (横坐标) 和预报的可信度 (纵坐标), 这里假定横、纵坐标都被分成 11 等级, 它就可以定量地来表示某一灾害性天气预报可

能的社会影响大小, 这无疑比现在的单一确定性预报更科学, 因此建议在日常业务预报中早日施用。在具体操作中, 预报的影响度可以用集合平均预报或某一集成员 (如预报天气最严重的成员) 或某一参照预报 (如 GFS) 的, 针对某一变量 (如图 5b 的水汽含量) 或某一综合量 (如图 5a-c 的南风、水汽含量和水汽输送量) 的异常度来定。下面举本例来说明, 假如我们把异常度超过 3 个标准差的影响度定为 7, 那么从图 5 知道三要素综合变量的平均异常度大概为 4 个标准差, 并根据预先制定的某一标准, 假定推得其影响度为 8; 再从图 6 看到其三要素异常度超过 3 个标准差的平均概率为 90%, 再根据某一预定标准推得其预报可信度为 9, 这样 GEFS 对北京 7.21 暴雨的预报在“社会影响矩阵”中的元素值就是 72 (图 7)。影响度和预报可信度具体怎么决定, 可在预报实践中根据集合预报系统的性能和其它情况来决定。“社会影响矩阵”的信息怎么向用户表达和用户怎么用它, 这可在同用户

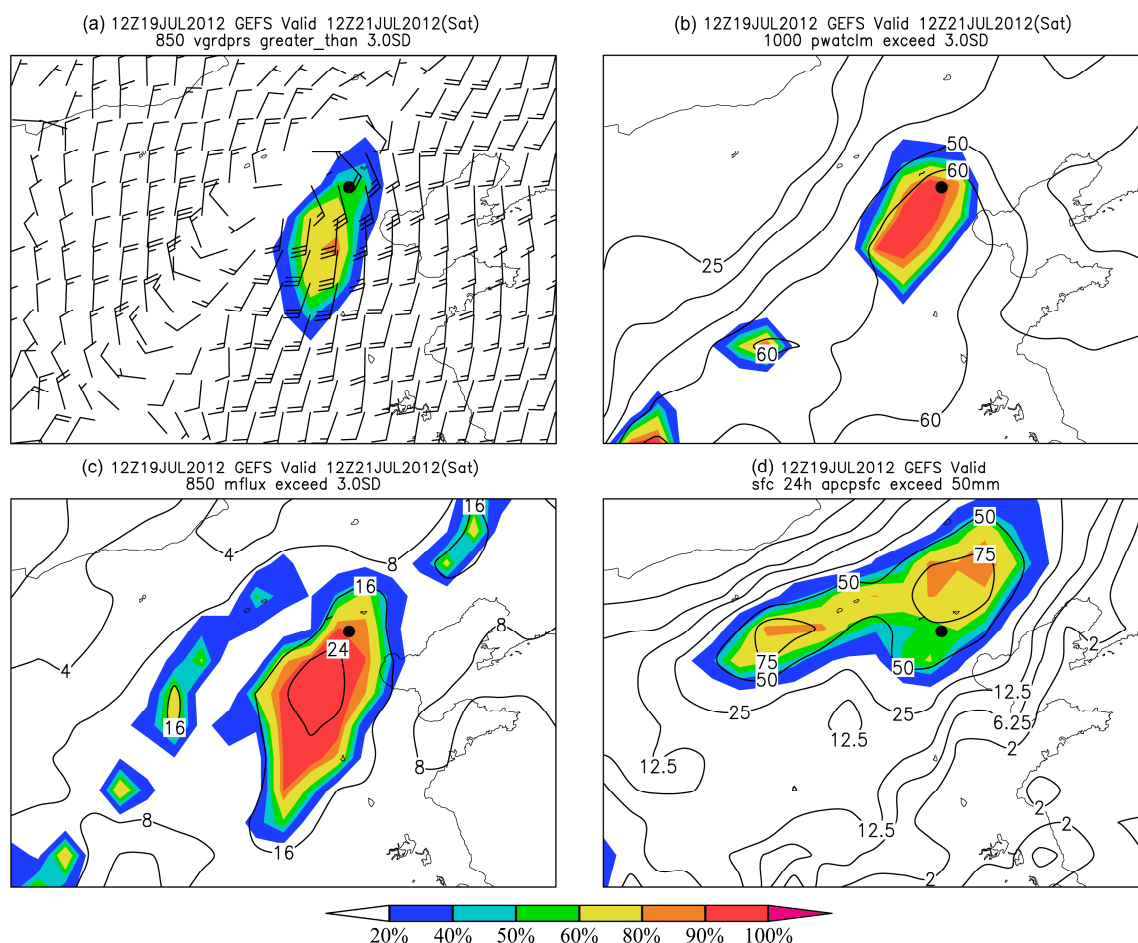


图6 NCEP 55 km 精度的 GEFS 模式 48 小时预报结果(起报时间是 7 月 19 日 12:00, 终止时间是 7 月 21 日 12:00): (a) 850 hPa 高度上的风场 (m s^{-1} , 风矢量)和南风分量(v)的异常度 SA 超过 3 个标准差的概率(填色); (b) 大气可降水量(mm, 等值线)及其异常度 SA 超过 3 个标准差的概率(填色); (c) 850 hPa 高度上的水平水汽输送通量($0.01 \text{ g kg}^{-1} \text{ m s}^{-1}$)及其异常度 SA 超过 3 个标准差的概率(填色); (d) NCEP 55 km 精度的 GEFS 对 7 月 21 日 24 小时(00:00~24:00)累积降水量的 60 小时集合平均预报(mm, 等值线)和降水量超过 50 mm 的概率预报(填色)(起报时间是 7 月 19 日 12:00, 终止时间是 7 月 22 日 00:00)。时间是协调世界时, 图上的黑点表示北京的大致位置

Fig. 6 The NCEP 55-km GEFS 48-h forecasts of (a) 850-hPa ensemble mean winds (m s^{-1} , vector) and the probability that the SA of southerly wind (v) exceeds 3 standard deviations (color), (b) ensemble mean precipitable water (mm, contour) and the probability that its SA exceeds 3 standard deviations (color), and (c) 850-hPa ensemble mean moisture flux ($0.01 \text{ g kg}^{-1} \text{ m s}^{-1}$, contour) and the probability that its SA exceeds 3 standard deviations (color), initiated at 1200 UTC 19 July and valid at 1200 UTC 21 July 2012. (d) The NCEP 55-km GEFS 60-h forecast of ensemble mean accumulated quantitative precipitation (mm) and the probability that the rainfall exceeds 50-mm for the 24-h period of 0000–2400 UTC 21 July, initiated at 1200 UTC 19 July and valid at 2400 UTC 21 or 0000 UTC 22 July, 2012. The black dot is the approximate location of Beijing

交流中逐渐试验和推广。

4 集合预报与单一模式预报的比较

单一模式 GFS 在 5.75 天前(即 7 月 16 日中午 06:00, 协调世界时, 下同)就预报出了北京地区有大暴雨的可能(其日雨量峰值达 115 mm, 图 8a 和图 10a), 根据典型的暴雨形势(Galarneau et al., 2012; Junker et al., 2009; Bodner et al., 2011), 所预报的大尺度的环境场(图 8b)也非常有利暴雨的发生。因此, 从大尺度形势来说这是一次可预报性很高

的事件, 现在的数值预报模式已有能力在近一周前作出大致的预测^①。但问题是在具体的细节方面, 如预报的降水落区位置、量级以及起止时间, 仍然存在很大的不确定性, 其可预报性很低, 而单一预报在这方面往往变化很大、无所适从。比较图 9a 和 d 可见, GFS 的单一预报从一个时次到另一个时

① 关于当前模式的平均预报能力, 读者可参考 Qian et al. (2013) 的文章: 总的说来, 目前数值预报对暴雨预报的能力还较差, 但对环流形势的预报, 欧洲模式在夏季可达 6~7 天, 美国 GFS 的环流预报能力不稳定, 有时候可以超过欧洲模式, 但平均只有 3 天。

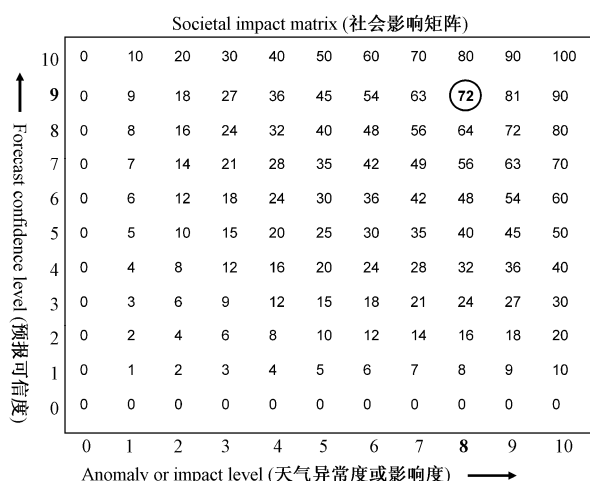


图 7 灾害性天气预报的“社会影响矩阵”(横坐标表示预报的天气事件异常的程度代表潜在影响的大小,纵坐标表示预报的可信度):一个预报所对应的“社会影响矩阵”元素值愈大表示其潜在的社会影响愈大

Fig. 7 “Societal Impact Matrix” of a weather forecast: the horizontal axis indicates the anomalous (impact) level of a predicted weather event, the vertical axis the confidence of this anomaly forecast: a higher value indicates higher societal impact potentially caused by the predicted weather event

次的强降水落区预报存在很大的跳跃性:暴雨中心从 17 日早晨(00:00)预报的辽宁西部,在 12 小时以后的晚间预报(12:00)向南跳跃约 700 km 到了山东北部,数值预报的这种时间上的不连续性,特别是巨大的变化往往让预报员不知所措,其预报的应用价值也就大打折扣。而集合预报在解决这一难题面前却可以起很大的作用,图 9b 和 e 是在相同两时次上的,基于 GFS 模式的集合预报,对降水超过 25 mm 的概率预报,虽然从 00:00 到 12:00 大概率中心的向南位移也很明显(因为用的是同一个 GFS 模式),但由于初值的扰动作用,其不连续性的程度明显减轻,只有量变而没有质变(可能性从原来的 50%减少到 20%),集合预报的作用显而易见。但同时这里也看到基于单一模式和单纯初值扰动集合预报的一个局限性:即如果集合预报所用的模式同单一预报所用的模式相同,那么集合预报就无法改进该模式的系统性误差,如这一例子中 12:00 的降水预报偏南。虽然我们看到初值扰动可以使问题得以缓和,但它不能从根本上得以改进。这时如进一步考虑到模式和物理上的不确定性如应用多模式集合,考虑到不同模式可能有不同的系统性偏差或解,多模式集合预报则有可能使这种系统性的偏差得以纠正,所以我们下面就用多模式的 TIGGE 资料再来作进一步的分析。图 9c 和 f 是 GEFS 的

21 个成员加上欧洲中心 ECEF21 个集合成员后的多模式集合预报的在这两个时次上的降水概率,这种暴雨落区预报在不同时次上的不连续性就不明显了。顺便指出,对这次北京 7.21 大暴雨的预报,欧洲气象中心的全球集合预报系统表现不如美国 NCEP 的全球集合预报系统 GEFS,尤其在降水强度预报上更是如此(图略)。

我们再来看北京单点上降水强度的预报情况:

图 10a 是降水量的预报,单一 GFS 模式的降水量预报在不同时次上的变化同样非常大并且无常,如 16 日 06:00 预报 115 mm 大暴雨,6 小时后减为 33 mm 大雨,再 24 小时后的 17 日 12:00 则变为只有小降水(<8 mm),直到 19 日 00:00 以后其量级才稳定在大暴雨量级上,但期间的强度变化也相当之巨,如 19 日 12:00 高达 400 mm 以上,而后又回到 200 mm 再涨到 300 mm 左右;相反,基于集合预报(GEFS 和 TIGGE)的平均预报的变化就非常平缓,特别是多模式的 TIGGE 平均预报结果:它们缓慢地随着时间的逼近而逐渐增加到 100 mm 左右。当然,由于全球集合预报模式水平分辨率不够,降水强度被明显低估了,所以需要发展高分辨率的区域集合预报系统。譬如,我们用一个 9 km 分辨率的 WRF 模式区域集合预报系统对此个例进行预报,发现其集合平均的降水就可增加一倍,达到 200 mm 以上(李俊等, 2014b)。除了集合平均预报外,集合预报更重要的信息是导出的概率预报。图 10b 是不同时次上的基于集合成员的概率预报,概率在总体上随时间而不断增大,表示这一暴雨预报的可信度愈来愈大,这种概率随时间的逼近而稳定增大是一种衡量可信度的可靠指标。此外,基于单一 GFS 模式集合预报的概率值从一个时次到另一个时次的变化还是很明显,而基于两个模式的 TIGGE 集合预报的概率值变化就平缓了许多。由上可见,集合预报,特别是既考虑了初值扰动又考虑了模式和物理扰动的,如多模式的集合预报,是解决前后预报之间在空间位置和强度上跳跃或不连贯性的一种有效的方法。由于我们所用的大多数资料其时间分辨率是 12 小时(个别的为 6 小时),因此无法准确检验暴雨起止时间的预报。但我们相信,单一 GFS 在对暴雨起止时间的前后预报也一定存在很大的变化,而集合预报可以有效地减轻这种变化的程度。一个前后连贯一致的稳定预报,其应用价值也就大大地得到了提高。所以,在许多情况下

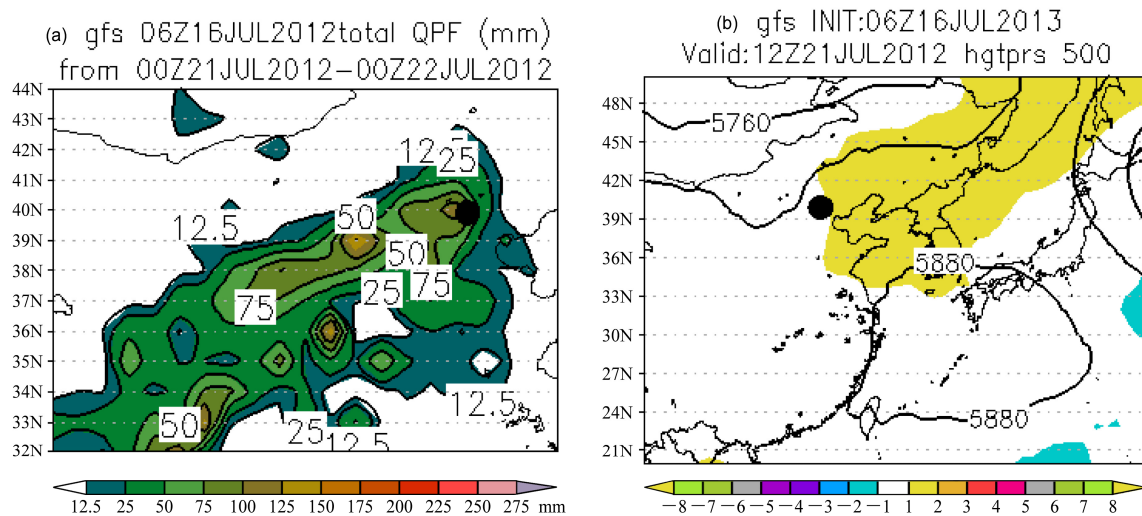


图8 NCEP 27 km 精度的单个 GFS 模式对 (a) 7 月 21 日 24 小时 (00:00~24:00) 累积降水量 (mm) 提前 5.75 天所作的预报 (起报时间是 7 月 16 日 06:00, 终止时间是 7 月 22 日 00:00); (b) 500 hPa 高度场 (m, 等值线) 及其异常度 SA (填色) 提前 5.25 天所作的预报 (起报时间是 7 月 16 日 06:00, 终止时间是 7 月 21 日 12:00)。时间是协调世界时, 图上的黑点表示北京的大致位置

Fig. 8 The NCEP 27-km single GFS 5.75-d forecast of (a) accumulated quantitative precipitation (mm) for the 24-h period of 0000–2400 UTC 21 July, initiated at 0600 UTC 16 July and valid at 0000 UTC 22 July, 2012 and (b) 500 hPa geopotential height (m, contour) and its anomalies SA (color), initiated at 0600 UTC 16 July and valid at 1200 UTC 21 July, 2012. The black dot is the approximate location of Beijing

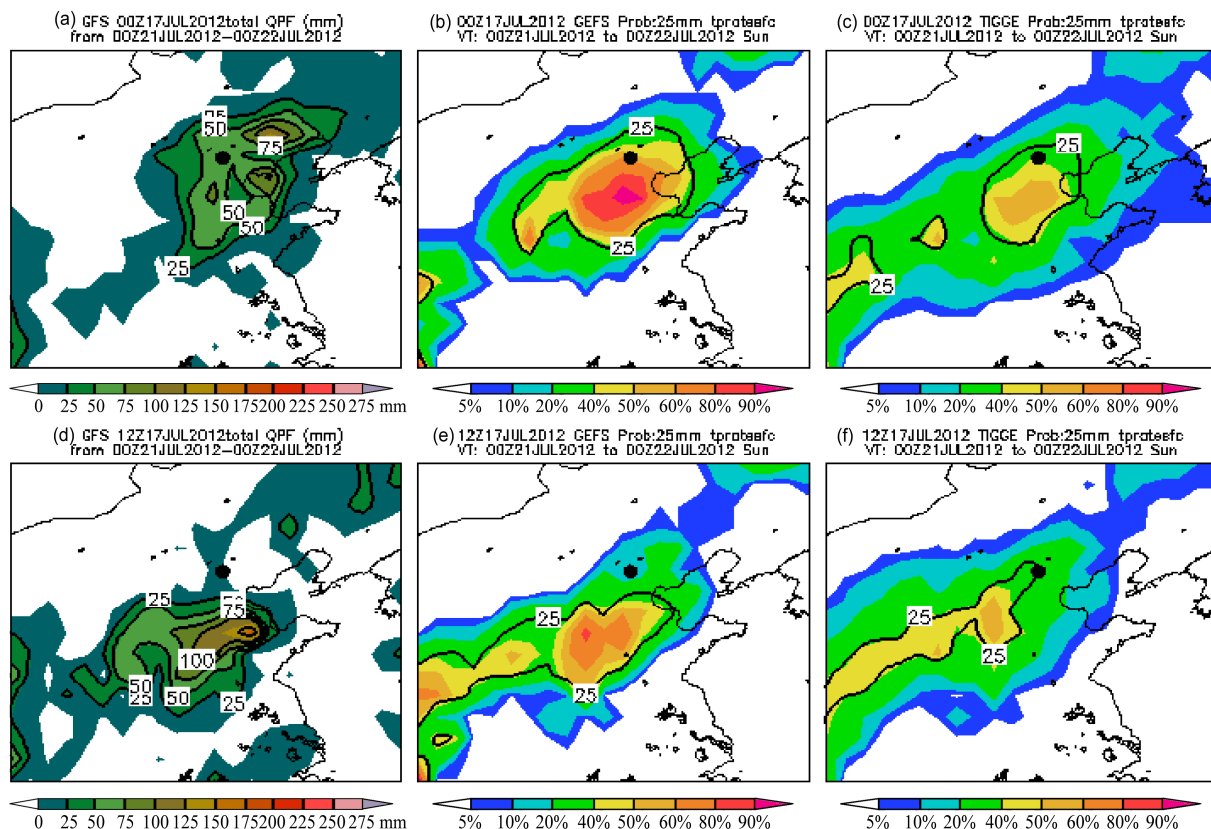


图9 (a, d) NCEP 27 km 精度的单个 GFS 模式对 7 月 21 日 24 小时 (00:00~24:00) 累积降水量 (mm) 的预报, 起报时间分别为 7 月 17 日 (a) 00:00 和 (d) 12:00; (b, e) NCEP 55 km 精度 21 个成员的 GEFS 对 7 月 21 日 24 小时 (00:00~24:00) 累积降水量超过 25 mm 的概率预报 (填色) 以及集合平均预报 (25 mm 等值线), 起报时间分别为 7 月 17 日 (b) 00:00 和 (e) 12:00; (c, f) 与 (b, e) 相同、但是为基于多模式的 TIGGE 集合预报系统 (21 个成员的 55 km 精度的 GEFS 加上 21 个成员的 32 km 精度的 ECEF)。时间是协调世界时, 图上的黑点表示北京的大致位置

Fig. 9 (a, d, the left column) The NCEP 27-km single GFS forecasts of accumulated quantitative precipitation (mm) for the 24-h period of 0000–2400 UTC 21 July, initiated at 0000 UTC 17 July and 1200 UTC 17 July, respectively. (b, e, the middle column) The NCEP 55-km 21-member GEFS probabilistic forecasts (color) of accumulated quantitative precipitation exceeding 25-mm and the ensemble mean 25-mm contour for the same 24 hour period, initiated also at 0000 UTC 17 July and 1200 UTC 17 July, respectively. The right column is same as the middle column, but for the multi-model TIGGE ensemble (21 members of 55-km GEFS + 21 members of 32-km ECEF). The black dot is the approximate location of Beijing.

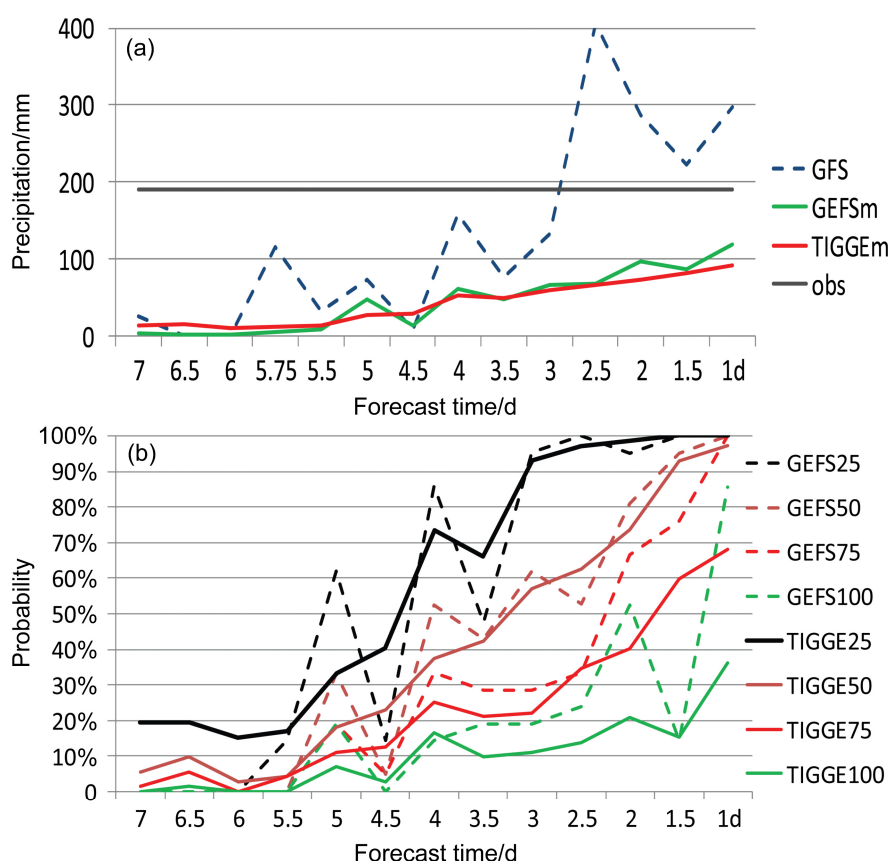


图 10 (a) 单个 GFS 模式、GEFS 平均和 TIGGE 平均对北京单站点 7 月 21 日 24 小时 (00:00~24:00) 累积降水量 (mm) 的预报 (水平粗黑线表示在相同时段内观测到的平均降水量) 和 (b) GEFS (虚线) 和 TIGGE (实线) 在北京单点对相同 24 小时时段内的累积降水量超过 25、50、75 和 100 mm 的概率预报, 起报时间分别从 7 月 15 日到 7 月 21 日的 00:00 (对应于从 7 天预报一直到 1 天预报, 见水平轴)。时间是协调世界时
Fig. 10 (a) The accumulated quantitative precipitation forecasts (mm) of the single GFS, GEFS mean and TIGGE mean (the horizontal thick black line indicates the observed average rainfall during the same period) and (b) the probabilistic forecasts of accumulated quantitative precipitation exceeding 25-mm, 50-mm, 75-mm and 100-mm of the GEFS (the dash lines) and TIGGE (the solid lines), at Beijing for the 24-h period of 0000–2400 UTC 21 July, initiated at various dates from 0000 UTC 15 July through 0000 UTC 21 July (corresponding to day 7 through day 1 forecasts, see the horizontal axis)

特别是对付难以预报的天气现象, 如雾, 多模式的集合预报系统往往可以发挥很大的作用 (Zhou and Du, 2010)。

集合预报比单一预报不仅可以在具体细节上能够提供更加连贯一致的稳定预报结果, 而且集合预报还有可能延长实际预报时效。如图 10a 所示, GFS 单一预报只在事件前 3 天才稳定在大暴雨量级上 (>100 mm), 而基于 TIGGE 集合预报的 >100 mm 大暴雨非零概率则在 5 天前就稳定出现, 并随时间的接近而不断增大 (图 10b), 可见实际可预报时效在本例中提前了 2 天。可以想象, 如果集合预报所用模式的水平空间分辨率 (55 km) 同单一 GFS 模式预报的分辨率 (27 km) 一样高, 大暴雨非零概率出现的时间可能会更提前, 即实际可预报时效可能会更长。集合预报较单一预报另一个无可比拟

的优点是集合预报的离散度还可以向预报员指明当前预报的问题所在 (即集合成员离散度大的地方), 如再对离散度作进一步诊断还可以了解造成预报不确定的深层次原因。如 Li et al. (2014) 用集合预报离散度讨论了中国西南涡东移不确定性的短期来源, 并从目标观测的角度提出了改善其预报的途径; 而 Zheng et al. (2013) 则讨论了北美中纬度气旋强度和路径不确定性的中期原因。关于集合预报技术在暴雨研究和预报中应用的现状和进展, 已有相关的综述文献 (杜钧和李俊, 2014)。

5 结合气候资料分析异常天气成因

第三节介绍了预报同气候资料结合 (即公式 2) 可以定量地衡量预报结果的异常度。不但如此, 如把实况资料 (本文用 NCEP CFS 的再分析资料) 同

气候资料相结合(公式 1), 即 $A_{s_o}(x, t)$, 则可衡量所发生事件的异常度, 并且根据这种异常度的分布和演变可在事后进一步分析造成该异常天气事件的气象原因。图 11 是北京暴雨发生当时 500 hPa 高度场(图 11a)、海平面气压场(图 11b)、850 hPa 风场(图 11c)、大气可降水量场(图 11d)以及根据公式(1) 计算得到的相应异常度分布。可见, 造成这次暴雨过程的短期直接因素是从西北方向移来的冷锋和台风倒槽的相遇, 从而提供了有利的水汽、辐合和抬升条件, 这三个造成大暴雨必备的直接条件(陶诗言, 1980), 在北京及其附近地区大大地得到了满足。从异常度的量级可以推断这种超异常的水汽和辐合条件主要是由于热带的台风倒槽(图 11b-d); 而北京以东、以北地区偏强的高压脊(图 11a)则加强了北京以西冷空气的堆积和冷锋的强度, 从而在锋前的北京地区形成了强烈的

垂直抬升机制。所有这一切提供了产生和维持中、小尺度强对流的有利大环境, 这些不断产生的对流系统(大部分)以及冷锋本身(小部分)直接造成了大暴雨的产生(Zhang et al. 2013), 最后导致了这 60 年一遇的特大暴雨。限于本文所用的是全球模式低分辨率资料, 所以只能看到天气尺度上的原因, 而要进一步分析中、小尺度, 甚至风暴尺度的原因, 则需要具有显式云和对流能力的高精度风暴尺度的模式所提供的分析资料。

如果我们扩大异常度分析在时间和空间上的范围, 还可以从异常度的演变和分布上看到该事件的中期大背景因素。从图 12 看到, 北京 7.21 大暴雨事件是前期高纬度大槽大脊的经向气流的发展和持续的结果: 在北京以东、以北有阻塞高压发展并导致北京以西地区的低槽加强和发展(地面强冷空气堆积), 在高纬度形成了一个高、低压系统相

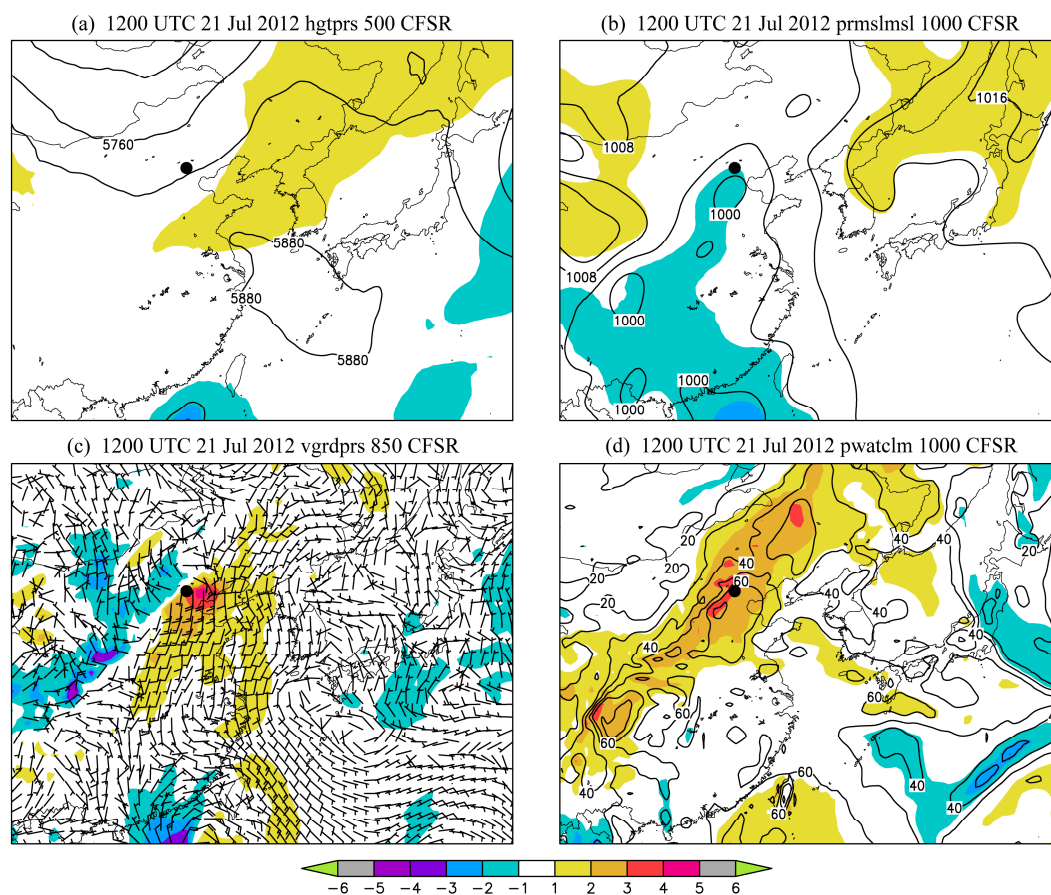


图 11 暴雨发生期间 7 月 21 日 12:00 基于 NCEP CFS 再分析资料的天气尺度形势: (a) 500 hPa 高度场 (m, 等值线) 及其异常度 SA (填色); (b) 平均海平面气压场 (hPa, 等值线) 及其异常度 SA (填色); (c) 850 hPa 高度上的风场 (m s^{-1} , 风矢量) 和南风分量 (v) 及其异常度 SA (填色); (d) 大气可降水量 (mm, 等值线) 及其异常度 SA (填色)。时间是协调世界时, 图上的黑点表示北京的大致位置

Fig. 11 The synoptic scale situation at 12:00 UTC 21 July 2012 during the heavy-rain occurrence based on the NCEP CFS reanalysis data: (a) 500-hPa height (m, contour) and its anomalies SA (color); (b) mean sea-level pressure (hPa, contour) and its anomalies SA (color); (c) 850-hPa winds (m s^{-1} , vector) and southerly wind (v) anomalies SA (color); (d) precipitable water (mm, contour) and its anomalies SA (color). The black dot is the approximate location of Beijing

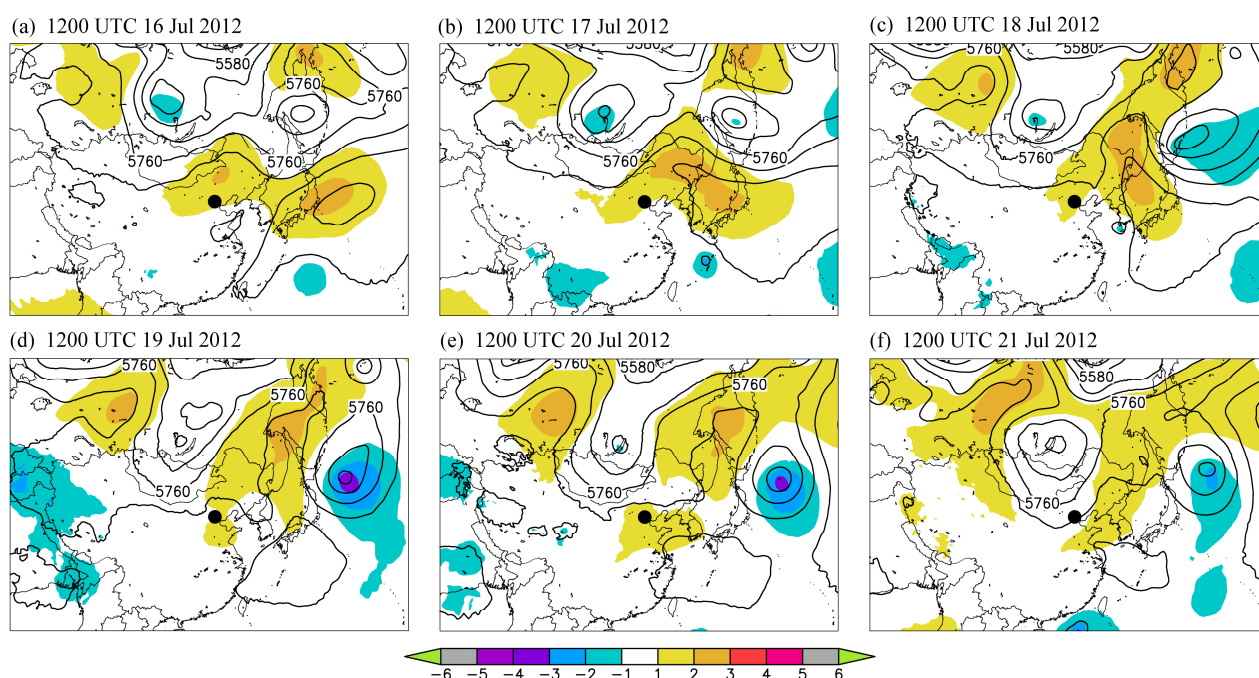


图 12 大尺度天气形势的时间演变: (a-f) 依次为 2012 年 7 月 16~21 日 12:00 基于 NCEP CFS 再分析资料的 500 hPa 高度场 (m, 等值线) 及其异常度 SA (填色)。时间是协调世界时, 图上的黑点表示北京的大致位置

Fig. 12 Time evolution of the large-scale pattern: (a-f) are the NCEP CFS reanalysis based 500-hPa heights (m, contour) and height anomalies SA (color) at 1200 UTC 16–21 July 2012, respectively. The black dot is the approximate location of Beijing

间的波列, 发展并维持, 同时诱导热带系统北进, 这种强经向型形势是很典型的导致持续异常天气, 如大暴雨发展的大背景 (Galarneau et al., 2012)。

6 结语与讨论

(1) 本文介绍了一种预报异常天气的方法即标准化异常度 SA, 它是把预报同气候平均进行比较, 以此度量所报预报结果的异常程度, 一般超过气候标准差三倍确定为极端事件的表征; 并且再同集合预报相结合, 可进一步定量地给出该异常预报的可信度 (概率)。这种集合预报与气候资料相结合, 定量估计天气的异常度以及异常天气预报的可信度称之为“集合异常预报法”。通过北京 7.21 大暴雨事件的预报表明, 本方法是预报异常高影响天气行之有效的一种好办法。作者建议中央气象台和其它有条件的台站采用这种办法, 以提高重大灾害性天气的预报能力。如果把“集合异常预报法”导出的预报异常度和异常预报的可信度二者结合起来, 则可综合地定义一个灾害性天气预报的“社会影响矩阵”, 它可以用来定量地描述一个预报的潜在社会影响。“社会影响矩阵”的信息怎么向用户表达和用户怎么用它, 这可

在将来同用户交流中逐渐试验和推广。

要注意的是, 如果模式预报有很强的系统性偏差的话, SA 就有可能或高估或低估。为了排除模式系统性偏差的误导, 在计算 SA 时最好要先订正模式偏差或直接用模式气候结果代替实际大气气候。另外, 如能在今后实际应用中“集合异常预报法”和欧洲中期天气预报中心的极端预报指数 EFI 法进行具体比较研究, 也是一项很有意义的工作。

(2) 从大尺度形势来说, 北京 7.21 大暴雨事件是一次可预报性很高的事件, 现在的数值预报模式已有能力在近 6 天前作出大致的预测, 但问题是在具体的细节方面, 如降水落区位置、量级以及起止时间, 在后续预报中存在很大的不确定性, 其可预报性很低。分析表明, 单一模式前后不同时效的细节预报, 无论在空间位置上还是在强度上都存在很大的跳跃性或不连续性, 这使其应用价值大打折扣, 使得预报员无所适从; 但基于集合预报特别是多模式集合预报则可以提供更可靠或更连贯的细节预报, 从而大大地提高预报的应用价值。不但如此, 集合预报还可用来延长实际可预报时效, 如在本文中北京地区量级超过 100 mm 大暴雨的实际可

预报时效提前了 2 天。另一方面,集合预报较单一预报无可比拟的优点是集合预报的离散度还可以指明当前预报的问题所在,但本文对此没有做讨论。

同时文中也指出了集合预报的两个局限性:

(a) 单一模式的初值扰动集合预报系统无法或不能有效地改善预报的系统性误差(如雨区偏南),所以需采用多模式或有物理扰动的集合预报系统来克服这个缺点;(b) 全球集合预报模式水平分辨率不够而明显低估降水强度,所以需要应用高分辨率的区域集合预报系统,尤其是对于直接造成大暴雨的中、小尺度强对流系统的预报,则更需要有基于具有显式云和对流能力的高精度模式的风暴尺度集合预报系统。

(3) SA 还可以帮助我们了解异常天气发生的原因。从 SA 的分布可见,造成北京 7.21 大暴雨事件的短期天气尺度因素是从西北方向移来的冷锋和台风倒槽的相遇,因而提供了有利的水汽、辐合和抬升条件的大环境;这一大环境不断产生和维持中、小尺度强对流系统,是造成这一大暴雨的直接因素。虽然由于本文资料分辨率不够,中、小尺度的对流活动在我们的分析中无法分辨,但在其他文献的分析中还是存在的(谌芸等, 2012; 孙军等, 2012; 方翀等, 2012; 俞小鼎, 2012; Zhang et al., 2013)。从 SA 的演变可见,该事件的中期大背景因素是在北京东北方向有阻塞高压发展并导致北京以西地区的低槽加强和发展(地面强冷空气堆积),在高纬度形成了一个高、低压系统相间的波列,发展并维持,同时诱导热带系统北进。

致谢 本文为纪念中国气象界大师、中国现代气象学的主要奠基人之一,陶诗言院士逝世一周年而作。陶先生是本文第一作者杜钧在中国科学院大气物理研究所读研究生期间(1985~1990 年)的导师,杜钧感谢陶先生对他在学术上和生活上多年的教导。众所皆知,陶先生一生对中国的灾害性天气,特别是暴雨等的预报特别关注,所以我们特以他爱好的主题写下此文,希望本文对中国灾害性天气的预报有实际的帮助。也感谢中国科学院大气物理研究所高守亭研究员和黄荣辉院士邀请我们为此特刊撰稿。最后,感谢审稿专家在审核本文时所提的宝贵意见。

参考文献 (References)

- Bodner M J, Junker N W, Grumm R H, et al. 2011. Comparison of atmospheric circulation patterns during the 2008 and 1993 historical Midwest floods [J]. *Natl. Wea. Dig.*, 35: 103–119, <http://www.nwas.org/digest/>.
- Buizza R, Richardson D S, Palmer T N. 2001. The new 80-km high-resolution ECMWF EPS [J]. *ECMWF Newsletter*, 90: 2–9.
- 谌芸, 孙军, 徐珺, 等. 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考 (一) 观测分析及思考 [J]. *气象*, 38 (10): 1255–1266. Chen Yun, Sun Jun, Xu Jun, et al. 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing. Part I: Observation and thinking [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 38 (10): 1255–1266.
- 丑纪范. 2002. 大气科学中的非线性与复杂性 [M]. 北京: 气象出版社. Chou Jifan. 2002. *Nonlinearity and Complexity in Atmospheric Sciences (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- Corfidi S F. 2003. Cold pools and MCS propagation: Forecasting the motion of downwind-developing MCSs [J]. *Wea. Forecasting*, 18 (6): 997–1017.
- 杜钧. 2002. 集合预报的现状和前景 [J]. *应用气象学报*, 13 (1): 16–28. Du Jun. 2002. Present situation and prospects of ensemble numerical prediction [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 13 (1): 16–28.
- 杜钧, 陈静. 2010. 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. Du Jun, Chen Jing. 2010. The cornerstone in facilitating the transition from deterministic to probabilistic forecasts—Ensemble forecasting and its impact on numerical weather prediction [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 36 (11): 1–11.
- 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. Du Jun, Deng Guo. 2010. The utility of the transition from deterministic to probabilistic weather forecasts—Verification and application of probabilistic forecasts [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 36 (12): 10–18.
- 杜钧, 康志明. 2014. 天气预报中不确定性问题的调查分析 [J]. *气象科技进展*, 4 (1): 58–67. Du Jun, Kang Zhiming. 2014. A survey on forecasters' view about uncertainty in weather forecasts [J]. *Advances in Meteorological Sciences and Technology (in Chinese)*, 4 (1): 58–67.
- 杜钧, 李俊. 2014. 集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用 [J]. *气象科技进展*, 待刊. Du Jun, Li Jun. 2014. Application of ensemble methodology to heavy-rain research and prediction [J]. *Advances in Meteorological Sciences and Technology (in Chinese)*, in press.
- Du Jun, Mullen S L, Sanders F. 1997. Short-range ensemble forecasting of quantitative precipitation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 125 (10): 2427–2459.
- 方翀, 毛冬艳, 张小雯, 等. 2012. 2012 年 7 月 21 日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析 [J]. *气象*, 38 (10): 1278–1287. Fang Chong, Mao Dongyan, Zhang Xiaowen, et al. 2012. Analysis on the mesoscale convective conditions and characteristics of an extreme torrential rain in Beijing on 21 July 2012 [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 38 (10): 1278–1287.
- Galarneau T J, Hamill T M, Dole R M, et al. 2012. A multiscale analysis of the extreme weather events over Western Russia and Northern Pakistan during July 2010 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 140 (5): 1639–1664.
- Graham R A, Grumm R H. 2010. Utilizing normalized anomalies to assess synoptic-scale weather events in the Western United States [J]. *Wea. Forecasting*, 25 (2): 428–445.
- Grumm R H. 2011a. The central European and Russian heat event of July–August 2010 [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 92 (10): 1285–1296.
- Grumm R H. 2011b. New England record maker rain event of 29–30 March 2010 [J]. *Electronic J. Operational Meteor.*, 12 (4): 1–31.
- Grumm R H, Hart R. 2001. Standardized anomalies applied to significant cold season weather events: Preliminary findings [J]. *Wea. Forecasting*,

- 16 (6): 736–754.
- Hart R E, Grumm R H. 2001. Using normalized climatological anomalies to rank synoptic scale events objectively [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129 (9): 2426–2442.
- Junker N W, Grumm R H, Hart R, et al. 2008. Use of standardized anomaly fields to anticipate extreme rainfall in the mountains of northern California [J]. *Wea. Forecasting*, 23 (3): 336–356.
- Junker N W, Brennan M J, Pereira F, et al. 2009. Assessing the potential for rare precipitation events with standardized anomalies and ensemble guidance at the Hydrometeorological Prediction Center [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90 (4): 445–453.
- Lalauette F. 2003. Early detection of abnormal weather conditions using a probabilistic extreme forecast index [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 129 (594): 3037–3057.
- 李俊, 杜钧, 陈超君. 2014a. 降水偏差订正的频率 (或面积) 匹配方法介绍和分析 [J]. *气象*, 40 (5): 580–588. Li Jun, Du Jun, Chen Chaojun. 2014a. An introduction and analysis to Frequency- or Area-Matching method applied to precipitation forecast bias correction [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 40 (5): 580–588.
- 李俊, 杜钧, 刘羽. 2014b. 北京“7.21”特大暴雨不同集合预报方案的对比试验 [J]. *气象学报*, 待刊. Li Jun, Du Jun, Liu Yu. 2014b. A comparison of IC-, multi-physics- and stochastic physics-based ensembles in predicting Beijing “7.21” extreme heavy rain event [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, in press.
- Li Jun, Du Jun, Zhang Dalin, et al. 2014. Ensemble-based analysis and sensitivity of mesoscale forecasts of a vortex over Southwest China [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 140 (680): 766–782.
- Lorenz E N. 1997. 混沌的本质 [M]. 刘式达, 刘式适, 严中伟译. 北京: 气象出版社. Lorenz, E N. 1997. *The Essence of Chaos (in Chinese)* [M]. Liu S D, Liu S K, Yan Z W, Trans. Beijing: China Meteorological Press.
- 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. Ma Qing, Gong Jiandong, Li Li, et al. 2008. Study of bias-correction and consensus in regional multi-model super-ensemble forecast [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 34 (3): 42–48.
- Maddox R A. 1980. Mesoscale convective complexes [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 61: 1374–1387.
- Maddox R A, Chappell C F, Hoxit L R. 1979. Synoptic and meso-alpha aspects of flash flood events [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 60 (2): 115–123.
- Molteni F, Buizza R, Palmer, T N, et al. 1996. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122 (529): 73–119.
- Qian W H, Li J, Shan X L. 2013. Application of synoptic-scale anomalous winds predicted by medium-range weather forecast models on the regional heavy rainfall in China in 2010 [J]. *Science in China: Earth Sciences*, 56 (6): 1059–1070, doi: 10.1007/s11430-013-4586-5.
- Saha S, Nadiga S, Thiaw C, et al. 2006. The NCEP climate forecast system [J]. *J. Climate*, 19 (15): 3483–3517.
- Saha S, Moorthi S, Pan H L, et al. 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91 (8): 1015–1057.
- Saha S, Moorthi S, Wu X, et al. 2014. The NCEP Climate Forecast System version 2 [J]. *J. Climate*, 27 (6): 2185–2208.
- 孙军, 谌芸, 杨舒楠, 等. 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(二) 极端性降水成因初探及思考 [J]. *气象*, 38 (10): 1267–1277. Sun Jun, Chen Yun, Yang Shunan, et al. 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing. Part II: Preliminary causation analysis and thinking [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 38 (10): 1267–1277.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社. Tao Shiyan. 1980. *Heavy Rain in China (in Chinese)* [M]. Beijing: Science Press.
- Tracton M S, Kalnay E. 1993. Operational ensemble prediction at the National Meteorological Center: Practical aspects [J]. *Wea. Forecasting*, 8 (3): 378–398.
- Wei M, Toth Z, Wobus R, et al. 2008. Initial perturbations based on the ensemble transform (ET) technique in the NCEP global operational forecast system [J]. *Tellus*, 60 A (1): 62–79.
- 夏凡, 陈静. 2012. 基于 T213 集合预报的极端天气预报指数及温度预报应用试验 [J]. *气象*, 38 (12): 1492–1501. Xia Fan, Chen Jing. 2012. The research of extreme forecast index based on the T213 ensemble forecast and the experiment in predicting temperature [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 38 (12): 1492–1501.
- Yang F L, Pan H L, Krueger S K, et al. 2006. Evaluation of the NCEP Global Forecast System at the ARM SGP Site [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134 (12): 3668–3690.
- 俞小鼎. 2012. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析 [J]. *气象*, 38 (11): 1313–1329. Yu Xiaoding. 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012 [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 38 (11): 1313–1329.
- Zhang D L, Lin Y H, Zhao P, et al. 2013. The Beijing extreme rainfall of 21 July 2012: “Right results” but for wrong reasons [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 40 (7): 1426–1431.
- Zheng Minghua, Chang E K M, Colle B A. 2013. Ensemble sensitivity tools for assessing extratropical cyclone intensity and track predictability [J]. *Wea. Forecasting*, 28 (5): 1133–1156.
- Zhou Binbin, Du Jun. 2010. Fog prediction from a multimodelmesoscale ensemble prediction system [J]. *Wea. Forecasting*, 25 (1): 303–322.
- Zsoter E. 2006. Recent developments in extreme weather forecasting [J]. *ECMWF Newsletter*, 107: 8–17.