

李勇. 2016. 2011 年长江中下游梅雨期强降水延伸期集合预报性能初探. 气象, 42(9): 1114-1123.

2011 年长江中下游梅雨期强降水延伸期 集合预报性能初探^{*}

李 勇

国家气象中心, 北京 100081

提 要: 针对 2011 年长江中下游旱涝转换时期的环流形势、强降雨期间的四次强降雨过程对欧洲中心集合预报进行了预报性能初步分析。结果表明: 集合平均预报对延伸期预报时效内的大尺度环流调整具有较好的预报性能, 预报提前时效可达 10~15 d。对强降雨过程期间主要影响系统的预报在不同预报时效具有较好的稳定性。随着预报时效的临近, 集合预报各个成员对天气系统预报的发散度逐渐减小。长江中下游强降水的发生与低层 850 hPa 较大的风速有密切关联, 集合预报给出的延伸期预报时效内大风速出现的小概率预报信息是有意义的, 可以为延伸期强降雨过程预报提供参考。

关键词: 环流调整, 强降雨过程, 集合预报, 检验

中图分类号: P456

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.09.009

Performance Analysis on Extended-Range Ensemble Prediction over Middle and Lower Reaches of Yangtze River in Meiyu Period of 2011

LI Yong

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Using ECMWF Ensemble data, the performances of ensemble forecasting about large-scale circulation and heavy rain processes in the mid-lower reaches of the Yangtze River during the drought and flood transition period in 2011 are examined. The results show that ensemble average forecasting has a good performance on the adjustments of large-scale circulation in the whole troposphere in extended-range period of validity. The forecasting period is up to 10—15 days. During different forecasting periods, ensemble average forecasting displays stability of forecasting the main affecting systems during the heavy rain processes. With the shortening of the forecasting period, the dispersion of various ensemble members to weather systems gradually decreases. The forecasting of individual ensemble member including ensemble average and control member has not obvious regularity in different period of validity. The forecast of a few ensemble members is in accord with the real weather condition about main impact systems during different forecasting periods. Occurrence of low-level stronger winds is closely related to heavy rainfall in mid-lower reaches of the Yangtze River. The small probability information of ensemble forecasting is meaningful in the extended-range forecasting period. It can provide a reference for extended-range heavy rainfall forecast.

Key words: circulation adjustment, heavy rain process, ensemble prediction, verification

* 国家科技支撑项目(2015BAC03B04, 2015BAC03B07)以及中国气象局预报员专项(CMAYBY2012-074)共同资助

2015 年 8 月 6 日收稿; 2016 年 7 月 1 日收修定稿

第一作者: 李勇, 主要从事中短期预报技术研究. Email: liy@cma.gov.cn

引言

20世纪90年代以来,随着计算机技术的迅猛发展和由于数值模式物理过程存在不确定性的事实(National Research Council, 2006; 穆穆等, 2011; Lorenz, 1997; 丑纪范, 2002; 朱玉祥等, 2016), 集合预报开始进入欧美等发达国家日常业务预报系统(麻巨慧等, 2011)。我国在集合预报领域起步较晚(李泽椿等, 2002), 对于集合预报研究应用还处在相对初级的阶段(陈静等, 2002; 毛恒青等, 2000; 杜钧, 2002; 陈超辉等, 2009; 段明铿等, 2004; 李俊等, 2015), 一方面是由于集合预报产品信息量巨大, 在有限的时间内准确地找到有价值的预报信息非常困难; 另一方面, 对于集合预报在强降雨等各类灾害性天气过程中的预报性能, 预报员还没有充分了解, 针对集合预报产品的检验和评价方面的研究工作还较少(邓国等, 2010; 段明铿等, 2011; 毛伟峰等, 2011; 周兵等, 2006; 陈良吕等, 2014), 这些均制约着集合预报的广泛应用。

集合平均预报通常比单个模式, 甚至比用更高分辨率模式产生的单个预报准确(Du et al, 1997; 段明铿等, 2009)。对不同类型的高影响天气的集合预报性能检验结果表明集合预报具有更好的预报稳定性(陈丽芳等, 2010)。这些研究通常是检验集合平均、集合离散度与预报误差之间的关系, 多采用统计学方法给出集合预报在一段时间内的整体预报性能, 针对环流转换、天气过程、天气系统等检验集合预报性能的工作还很少。虽然对于具体天气系统而言, 其可预报性本身如何来度量仍然是一个正在研究探索的问题, 目前还没有一个行之有效的解决方法, 但是我们仍然可以针对大尺度环流形势调整、强降雨过程可预报性、部分天气系统等进行天气学检验, 目的在于使预报员对集合预报在某个特定季节、特定地区的预报性能有初步了解, 有助于预报员在进行相关预报时有针对性地参考应用集合预报的相关信息, 为总结或者完善集合预报可用指标打下基础, 增强预报员对集合预报产品的理解和驾驭能力。

2011年夏季长江中下游地区发生了明显的旱涝转换, 雨季开始后连续出现了多次强降雨过程, 集合预报是否对于这一时期环流调整有所反映? 对后期强降雨过程及主要天气系统的预报性能如何? 本文拟从天气学的角度以一个预报员的视角对以上问题进行初步探讨, 希望能为预报员理解应用集合预

报提供一些参考。

1 资料和方法

集合预报资料来自于ECMWF集合预报系统, 该预报系统每日运行两次(00和12 UTC), 有51个预报成员(其中包含一个控制预报及50个集合成员预报), 预报时效为0~360 h, 使用可变分辨率(0~72 h间隔3 h, 72~240 h间隔6 h, 240~360 h间隔12 h), 地面层水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 气压层水平分辨率为 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 。分析时段为2011年5月24日至6月12日12 UTC气压层预报数据, 包括500、200及850 hPa风场; 500及200 hPa高度场; 850 hPa比湿场, 重点分析检验集合预报对大尺度环流调整、副热带高压及南亚高压等天气系统的预报性能。

2 结果分析

2.1 2011年梅汛期前后环流特征分析

2011年1—5月长江中下游地区降水异常偏少, 气象干旱持续发展, 6月3日开始出现强降雨过程并进入多雨期, 为了有针对性地探讨集合预报对强降雨前后环流演变及主要天气系统的预报性能, 首先给出强降水发生前后的环流背景及主要影响系统的活动特征。

典型的梅汛期环流形势初期, 对流层高层主要表现为南亚高压显著加强东伸北抬, 南亚高压从高原向东移动或者扩展, 高压脊线逐渐北抬。2011年6月3日长江中下游强降雨过程开始后, 200 hPa南亚高压中心强度加强的同时, 出现了明显向东西两侧伸展的特征, 脊线则由南海北部(18°N)北抬至华南中部一带(23°N)。

从200 hPa平均散度场(图1a和1b)可以看到, 强降雨过程发生前(图1a), 长江中下游地区高空基本处于辐合区当中, 不利于垂直上升运动的发展。而在强降雨期(图1b), 南方大部地区均处在辐散区, 其中长江中下游地区的高空辐散最强, 有利于垂直上升运动。这种高空散度场的前后变化与什么有关呢? 事实上, 从高空风场可以看到, 强降雨前后高空急流的形态发生了明显的变化。强降雨前(图1a), 中纬度地区存在两个高空急流中心, 我国

西北地区上空的西急流核呈现西北—东南走向,山东半岛至日本海上空的东急流核则呈现东北—西南走向,在长江中下游地区高空气流存在气旋性弯曲,且有明显的风速辐合。在强降雨期间(图 1b),西北地区上空的急流核消失,山东半岛至日本海上空的急流转为东西走向,长江中下游地区处于高空反气旋性切变气流中,有明显的辐散。正是由于强降雨前后高空气流形态的不同造成了辐合、辐散的差异。可见,通过判断高空散度的变化对判断大范围强降雨过程有积极的作用。

从平均 500 hPa 高度场(图 1c 和 1d)可以看到,强降雨前(图 1c)我国中高纬度冷空气势力较强,反映在高度场上是乌拉尔山东部及贝加尔湖东部存在两个低涡中心,特别是贝加尔湖东侧低涡后部的冷平流可以向南扩展至江南地区,而西太平洋副热带高压(以下简称副高)主体位于 127°E 以东,副高西部脊线位于 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$,孟加拉湾地区的高度场较高,不利于将低纬地区的低层暖湿气流输送到长江中下游地区;而在强降雨发生期间(图 1d),我国新疆地区高空脊强烈发展,影响我国东部的冷空气势力有所减弱,冷平流区域位于长江以北,副高明显加强,西脊点向西伸展越过 120°E ,副高西部脊线北抬至 20°N 附近(达到典型江淮梅雨期副高脊线位置),孟加拉湾地区高度场显著降低,有利于将低层暖湿气流向长江中下游地区输送。对比前后形势场可以看出,在中高纬度冷空气势力变化的同时,最为关键的是中低纬度环流的变化,副高西部脊线的位置以及来自印度洋西南气流的强弱都极大地影响长江中下游地区的降水,特别是在副高演变的过程中,平均西部脊线达到 20°N 附近仍然是预报长江中下游地区由于干旱转为多雨的一个显著信号。

对流层低层 850 hPa 风场(图 1e 和 1f)在强降雨前后也有明显的差异。强降雨前(图 1e)整个江淮及其以南均处于平均东北风的控制下,来自印度洋的暖湿气流只能达到中南半岛一带,长江中下游地区被冷平流控制且为气流辐散区。而在强降雨期间(图 1f),印度洋经中南半岛、南海至我国长江以南地区均转为一致的西南气流,特别是在长江中下游地区转为暖平流且有强的气流辐合,有利于强降雨的出现。

从长江中下游四次强降雨过程的对比分析可知(图略),虽然每次过程主要影响系统强度及位置有所差异,但是都具备与强降雨期相似的大尺度环流

特征,这与前期干旱少雨时期形成了鲜明对比。

2.2 集合预报对环流转变的预报性能分析

为了检验集合预报对大尺度环流形势转变的预报性能,选取 5 月 24 日起报的集合平均场进行分析,以 5 d 为单位将预报时效分为三个阶段,即 5 月 24—28 日、5 月 29 日至 6 月 2 日以及 6 月 3—7 日,其中前两个阶段表示强降雨发生前的干旱时期,属于中短期预报时效,第三阶段属于延伸期预报时效,这一时段长江中下游地区出现了第一次大范围强降雨过程。

从 200 hPa 集合平均高度场(图 2a~2c)上可以看到,第一、第二阶段南亚高压主体从西太平洋向西延伸至中南半岛一带,东部脊线位于南海中部地区,相对较为稳定,而第三阶段南亚高压开始分裂出闭合中心,且强度明显加强,东部脊线迅速北抬至华南北部地区,其南北变动约 $7\sim 8$ 个纬距,有利于长江中下游高空辐散加强。从平均风场及散度场(图 2d~2f)的分布可以看到,第一阶段,位于我国上空的急流有东西两个急流核,西北地区上空的西急流核呈现西北—东南走向,而山东半岛至日本海一带的东急流核则呈现东北—西南走向,且东急流核明显强于西急流核,长江中下游地区高空处于两支急流核形成的气旋性弯曲处,同时存在风速辐合,散度基本为负值,不利于该地区出现大范围强降雨。第二阶段,两个急流中心逐渐调整合并为一支直线型急流,黄淮、江淮等地高空开始出现反气旋性切变,但长江中下游大部地区高空仍为辐合区。第三阶段,高空急流保持了与第二阶段相同的形态与位置,强度虽然有所减弱,但由于南亚高压加强北抬,其外围风速也显著加强,使得位于高压东部脊线北侧与高空急流南侧之间的长江中下游地区上空风速出现明显的辐散,对大范围强降雨的出现比较有利。

在 500 hPa 集合平均预报高度场(图 2g~2i)上,第一阶段,副高位于 133°E 以东地区(较实况偏东),江南及沿海一带被西北气流控制。第二阶段,江南地区反气旋环流加强的同时,孟加拉湾附近高度场显著降低,副高主体范围增大,但没有明显西伸。第三阶段,副高异常西伸,与前两个阶段相比, $100^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 平均脊线北抬至 20°N ,来自西南暖湿气流明显加强。对比三个阶段集合平均场可以看到,中低纬度环流变化异常的显著,特别是西太平洋和孟湾地区高度场一增一减明显有利于水汽向我国

南方地区加强输送,加之冷空气势力的减弱,冷暖空气在长江中下游地区交汇。值得注意的是副高脊线

出现在 20°N 附近是长江中下游地区可能出现强降雨的一个前兆信号。

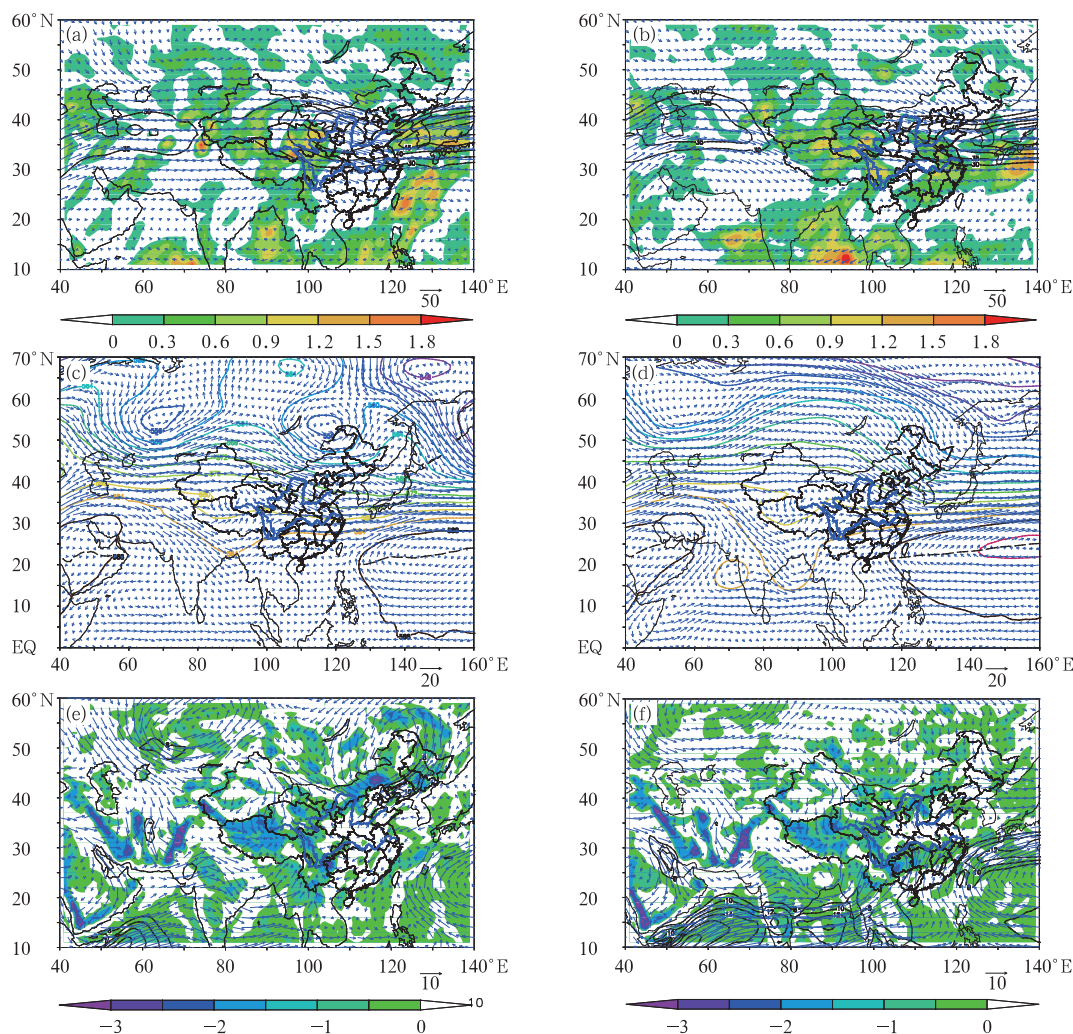


图1 2011年强降雨前(a,c,e,5月23日至6月3日)及强降雨期间(b,d,f,6月3—19日)平均环流场

(a,b)200 hPa 风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)及散度场(单位: 10^{-5}s^{-1});

(c,d)500 hPa 高度场(单位:dagpm)及风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

(e,f)850 hPa 风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)及散度场(单位: 10^{-5}s^{-1})

Fig.1 Average circulation fields before (a, c, e, 23 May–3 June) and during (b, d, f, 3–19 June) heavy rain in 2011

(a,b) 200 hPa wind (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and divergence fields (unit: 10^{-5}s^{-1});

(c,d) 500 hPa height (unit: dagpm) and wind fields (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

(e,f) 850 hPa wind (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and divergence fields (unit: 10^{-5}s^{-1})

从低层 850 hPa 上三个阶段集合平均场(图 2j~2l)可以看到,伴随着南方地区由大范围东北风逐渐转为西南风,水汽的辐合带逐渐从中南半岛经我国西南地区向长江中下游地区移动,强降雨过程期间,长江中下游有明显的负的水汽通量散度,而前两个阶段则为正的水汽通量散度。这种低层环流的变化与对流层中高层系统的变化是对应配合的。对比

前后相邻的三个阶段平均场可以看到,集合平均场在整个对流层中均能够反映出后期(延伸期)大范围环流形势即将调整,虽然无法确定这种调整后的环流持续性(是否能够使长江中下游地区旱涝发生转换),但对于持续干旱的长江中下游地区而言,指出延伸期时段该地区即将出现明显降雨过程这一信息无疑有非常好的指示意义。

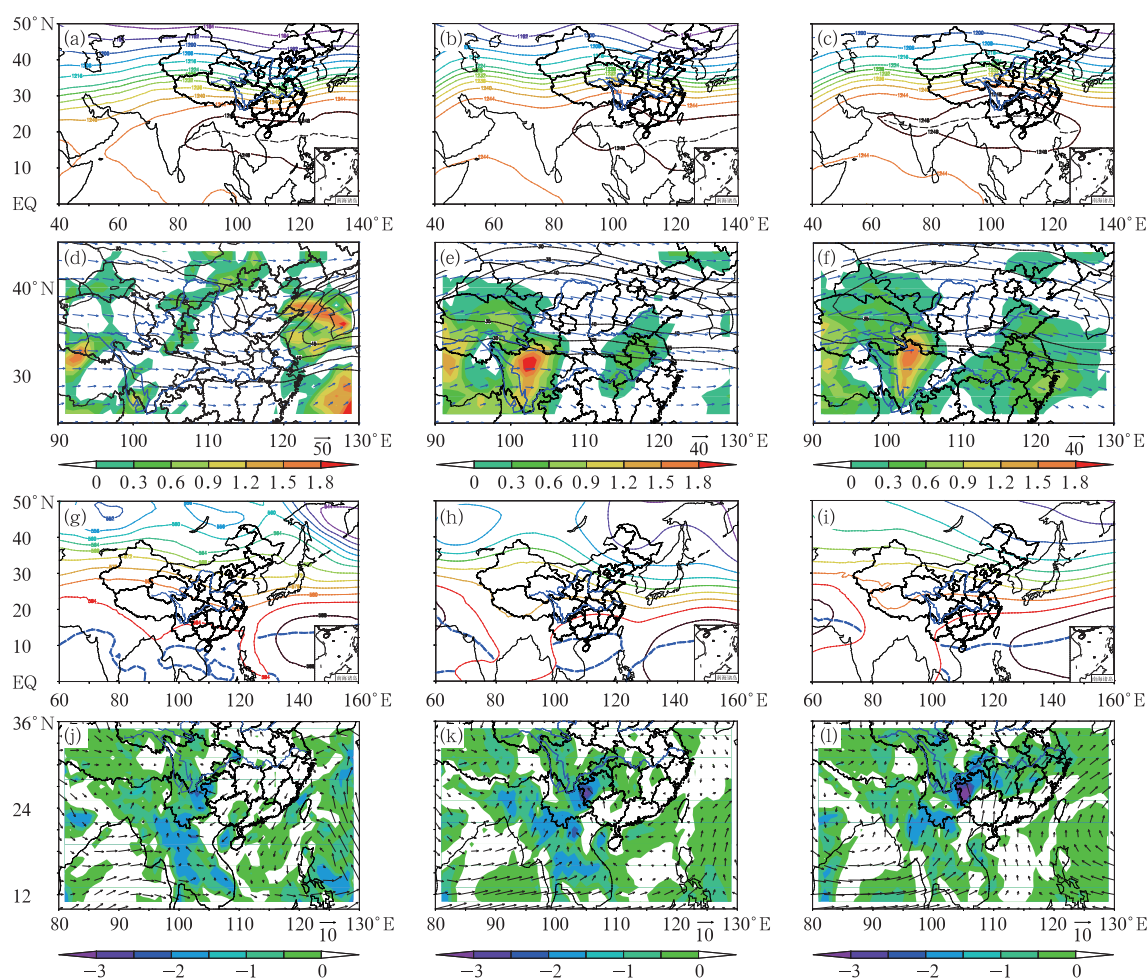


图 2 2011 年环流转换期(a,d,g,j,5 月 24—28; b,e,h,k,5 月 29 日至 6 月 2 日; c,f,i,l,6 月 3—7 日)集合平均场
(a,b,c)200 hPa 高度场(单位: dagpm, 虚线表示高压脊线); (d,e,f)200 hPa 风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
及散度场(单位: 10^{-5} s^{-1} , 阴影表示辐散); (g,h,i)500 hPa 高度场(虚线表示高压脊线, 单位: dagpm);
(j,k,l)850 hPa 风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)及散度场(单位: 10^{-5} s^{-1} , 阴影表示辐合)

Fig. 2 Ensemble average fields during transform period of circulation (a, d, g, j, 24—28 May;
b, e, h, k, 29 May—2 June; c, f, i, l, 3—7 June) in 2011

(a, b, c) height at 200 hPa (unit: dagpm; dashed line: ridge line); (d, e, f) wind (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and divergence (unit: 10^{-5} s^{-1} , shaded: divergence area) at 200 hPa; (g, h, i) height (unit: dagpm) at 500 hPa (dashed line: ridge line);
(j, k, l) wind (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and divergence (unit: 10^{-5} s^{-1} , shaded: convergence area) at 850 hPa

2.3 集合预报在四次强降雨过程中的稳定性分析

从上文分析可以看出,集合平均预报对于延伸期旱涝转换环流形势的调整有较好的预报性能(能够预报出第一次强降雨过程),这种预报性能的稳定性如何?在随后滚动预报中是否均有所体现?针对第一次降水过程,从不同起报时间的集合平均 500 hPa 位势高度场(图 3a~3d)可以看到,随着预报时效的缩短,新疆地区平均高空脊逐渐发展加强并向

东扩展,副高逐渐加强西伸(西伸脊点从 125°E 逐渐西伸至 110°E),而副高平均西段脊线的位置在整个可预报时效内均保持稳定(20°N 附近)。从高空(图 3e~3h)、低空(图 3i~3l)形势来看,在不同预报时效内,位于我国北方地区的高空急流位置、形态及低层西南季风气流均异常稳定,长江中下游地区始终位于高层急流南侧辐散区及低层水汽通量辐合区内,且与中期延伸期预报时效相比,短期预报时效内,高空辐散与低空辐合更强。

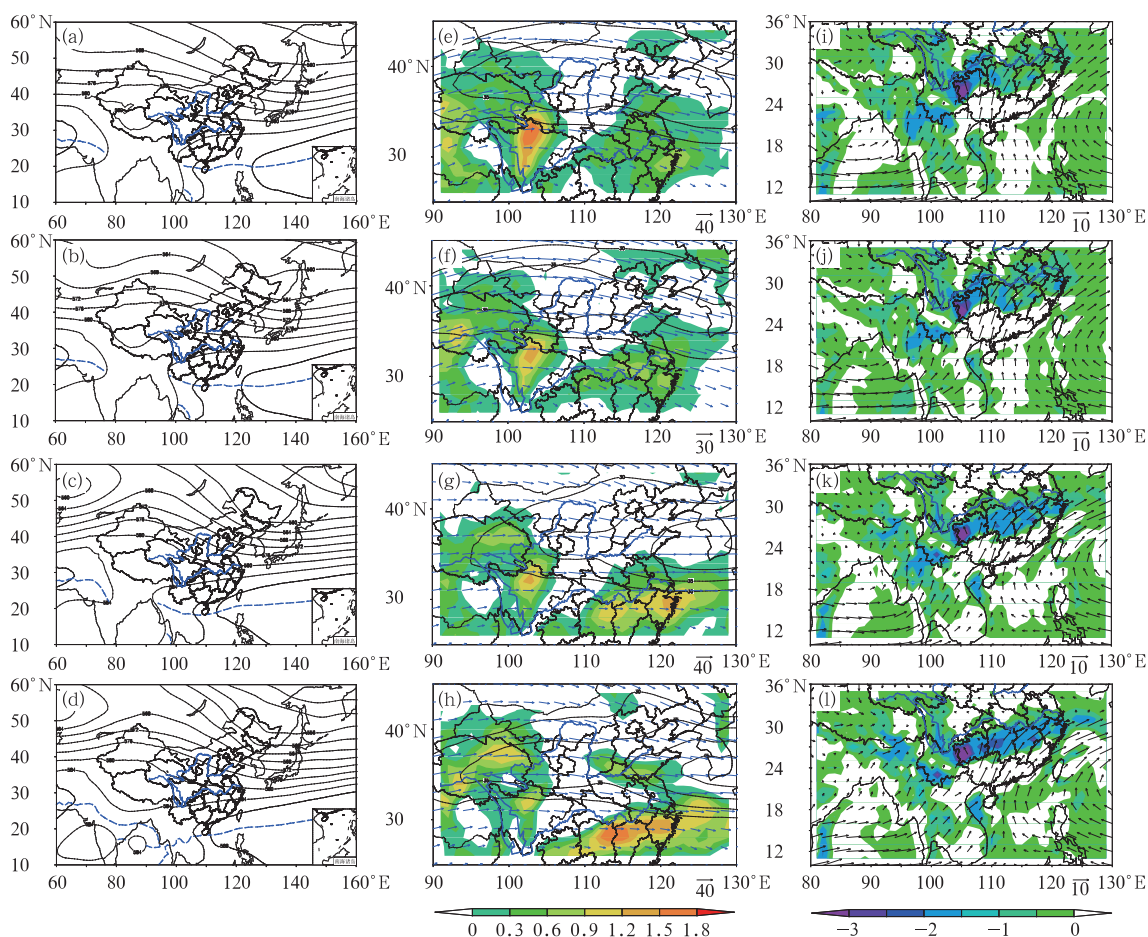


图3 2011年6月3—7日500 hPa平均高度场(a,b,c,d,单位:dagpm,虚线表示副高脊线)、200 hPa平均风场及散度场(e,f,g,h,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 10^{-5} s^{-1} ;阴影表示辐散)和850 hPa平均风场及水汽通量散度场(i,j,k,l,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, $10^{-5} \cdot \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;阴影表示辐合)(a,e,i)5月24日预报;(b,f,j)5月26日预报;(c,g,k)5月29日预报;(d,h,l)6月2日预报

Fig. 3 Average height at 500 hPa (a, b, c, d, unit: dagpm; dashed line: ridge line), wind and divergence at 200 hPa (e, f, g, h, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 10^{-5} s^{-1} ; shaded: divergence area), wind and vapor flux divergence at 850 hPa (i, j, k, l, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, $10^{-5} \cdot \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; shaded: convergence area) during 3—7 June in different initial forecasts

(a, e, i) 24 May; (b, f, j) 26 May; (c, g, k) 29 May; (d, h, l) 2 June 2011

针对其他三次强降水过程(图略)逐一分析可以发现,与第一次过程相似,一旦延伸期时段预报出有利于强降水的中高低层系统(高空急流、副热带高压、西南季风等)及环境场[高(低)空辐散(合)],这些天气系统以及与之配合的环境场在随后不同起报时间的中短期滚动预报中也将稳定出现,且第一、第三次过程短期预报时效主要天气系统的强度强于中期延伸期预报时效相应系统的强度,第二、第四次过程各预报时效主要天气系统的强度基本能够稳定维持。综合以上分析可见,集合平均预报对于2011年长江中下游地区四次强降水过程的预报在整个对流层具有较好的稳定性,且随着预报时效的临近,对主

要影响系统强度的预报能稳定维持或者逐渐加强,没有逐渐减弱的情况发生。

2.4 集合预报成员的预报性能

从上文分析可以看到,集合平均预报对强降雨过程期间大尺度环流背景的预报总体上是较为稳定的,那么集合预报各成员对主要天气系统的预报性能如何?对不同天气系统的预报性能存在何种差异?下文针对南亚高压脊线及副高脊线进行检验分析,成员中包括了集合平均预报,以便反映大多数成员的预报倾向。

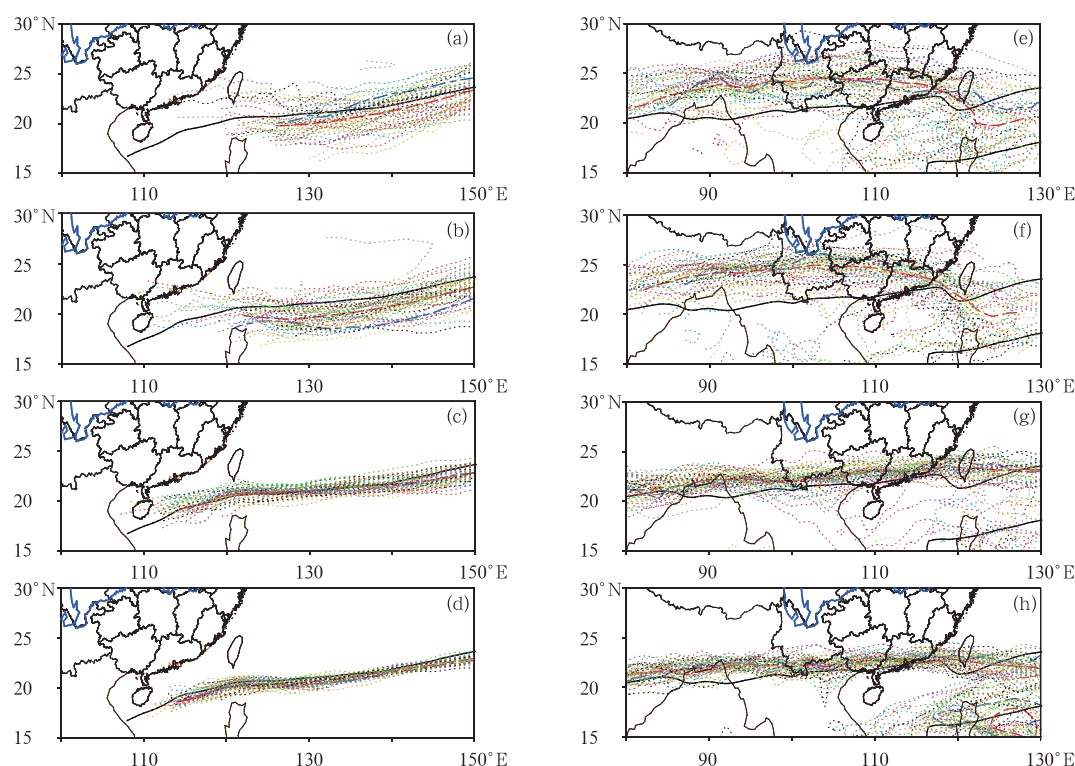


图 4 集合预报在不同起报时间预报的第一次强降雨过程平均
副高脊线(a,b,c,d)和南亚高压脊线(e,f,g,h)位置

(实线表示实况,长虚线表示集合平均预报,长短虚线表示控制预报,点线表示各成员)

Fig. 4 Average ridge line position of subtropical high (a,b,c,d) and South Asia high (e,f,g,h) during the first heavy rain process in different initial forecasts
(solid line: observation; long dashed line: ensemble average; long and short dashed line: control; dotted line: members)

从集合预报在不同起报时间预报的第一次强降雨过程的副高及南亚高压脊线位置(图 4)可见,延伸期预报时效内个别成员预报的副高脊线的最大偏差为 6~8 个纬距(图 4a 和 4b),大多数成员预报明显偏南,进入中短期时效后脊线之间的偏差减小为 2~3 个纬距(图 4c 和 4d)。延伸期预报时效内个别成员对南亚高压脊线预报的最大偏差达到了 8~10 个纬距(图 4e 和 4f),大多数成员的脊线预报基本上以偏北为主,进入中短期时效后脊线之间的偏差减小为 3~5 个纬距(图 4g 和 4h)。从其他三次降雨过程来看(图略),延伸期时效内,副高脊线预报并不总是偏南,而南亚高压脊线预报也并不总是偏北,但在中短期时效逐渐偏差减小,接近实况的变化趋势同样存在。可见,无论是副高脊线还是南亚高压脊线,随着预报时效的邻近,各成员的预报发散度逐渐减小。与南亚高压脊线相比,集合预报成员对副高脊线的预报发散度更小,具有相对较小的不确定性。

在不同的降雨过程中,集合成员整体上对副高脊线和南亚高压脊线预报偏差的规律性并不强。

但是另一方面,应该看到确实有少数成员在延伸期时效内对副高脊线和南亚高压脊线有较好的预报性能。为了说明这一点,针对不同降雨过程,计算了不同起报时间副高及南亚高压脊线位置预报与实况偏差在一个纬距内的集合成员数(表 1),可以看到,5 月 24 日集合预报对第一次强降雨过程(6 月 3—7 日)期间副高脊线和南亚高压脊线位置有较为准确的预报能力的成员数分别是 7 和 3 个,随着预报时效的临近,偏差在一个纬距内的成员数呈现增多趋势,但并不是严格的线性增加。当进入短期时效内,有大约 25 个左右(50%)的成员对副高脊线的预报偏差在一个纬距内,15 个(30%)左右的成员对南亚高压脊线的预报偏差在一个纬距内。而其他三次降雨过程期间,延伸期时效内对副高脊线和南亚高压脊线位置预报偏差较小的成员数多于第一次过

程,达到了 8~10 个,在中短期时效内偏差较小的成员数有所增多,但增多的趋势不如第一次过程明显。

上述结果表明集合预报的少数成员在较长的预报时效内已经能够有效预报副高脊线和南亚高压脊线,这正体现了集合预报的部分优势。值得注意的

是,在延伸期时效内,第一次过程的高压脊线预报偏差较小的成员数比后三次过程高压脊线预报偏差较小的成员数少,这可能与第一次过程正好处在大尺度环流剧烈调整期,模式在延伸期时效预报能力相对较弱有关。

表 1 四次降雨过程期间副高及南亚高压预报偏差在一个纬距内的成员数
Table 1 The number of ensemble forecast members of deviation of less than one latitude to subtropical high and South Asia high in four rainfall processes

过程一								
预报时效/h	240	216	192	168	120	96	48	24
副高脊线	7	11	9	12	28	22	26	25
南亚高压脊线	3	4	7	6	9	14	15	15
过程二								
预报时效/h	312	264	240	192	168	144	120	96
副高脊线	12	11	12	13	12	14	17	20
南亚高压脊线	10	11	10	9	14	17	12	12
过程三								
预报时效/h	288	264	240	216	192	168	144	120
副高脊线	10	8	6	13	8	18	9	15
南亚高压脊线	8	6	6	16	19	17	10	17
过程四								
预报时效/h	312	288	264	240	216	192	168	144
副高脊线	12	17	13	14	16	15	8	12
南亚高压脊线	9	9	10	14	15	18	21	20

注:由于缺少部分预报数据,故过程预报时效不连续。

Note: Due to the lack of some forecast data, the forecasting process time is not connected.

2.5 集合概率预报信息

根据上文分析,集合平均预报能够在延伸期预报时效内预报出环流的转换,这种预报具有一定的稳定性,据此可以做出环流即将转换以及强降雨发生的大致时间的趋势预报,且少数成员对天气系统的预报与实况是接近的,但要确定哪些成员最接近实况仍然较为困难。在这种情况下,概率信息能够为预报员提供一些便利。相较而言,低层水汽及动力条件与强降雨关系更为密切(王秀文等,2012),通过判断低层风场及水汽场的时间演变来确定梅雨期长江中下游强降雨的出现时段是具有一定可行性的。针对 2011 年实况分析可知,四次强降雨过程期间 $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 平均 850 hPa 经向风均超过 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 5a),强降雨出现的地区恰好位于大风速前沿的强水汽通量辐合区(图 5b)。

下文通过分析低层 850 hPa 大风速出现的概率,检验集合概率预报的性能。从图 6 可以看到,针对第一次强降雨过程期间(6 月 3—7 日),随着预报时效的临近,江南地区南风超过 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的概率逐渐增大。5 月 24 日仅为 $20\%\sim 30\%$ (图 6a),

26—29 日达到 $50\%\sim 80\%$ (图 6b 和 6c),6 月 2 日基本在 70% 以上。而对第二次过程(6 月 9—11 日)期间,集合预报在中期延伸期时效超过 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风速概率预报就达到了 50% 以上,进入短期时效后概率变化并不是很明显,基本在 70% 以上,只是概率空间分布与实况更加一致(图 6g 和 6h)。后两次过程期间(6 月 13—19 日)(图略),延伸期时段就能预报出 70% 以上的概率。在随后的中短期预报时效内概率变化不大,维持 70% 以上的高预报概率。对比前后几次过程可以发现,在环流转换期的第一次过程期间,从延伸期到短期时效,预报概率的增加趋势最为明显,而对于环流调整到较为稳定的后三次过程而言,从延伸期到中短期预报时效,概率变化幅度较小,延伸期时效内 850 hPa 出现大风速的概率就已经能达到 50% 左右,这反映了集合预报在环流演变的不同时期对风速概率预报信息的差异。从上述分析来看,集合预报在较长预报时效内给出的小概率预报信息(如第一次降雨过程期间,在延伸期预报内大风速概率值仅为 $20\%\sim 30\%$)可能是有意义的,应引起预报员关注。

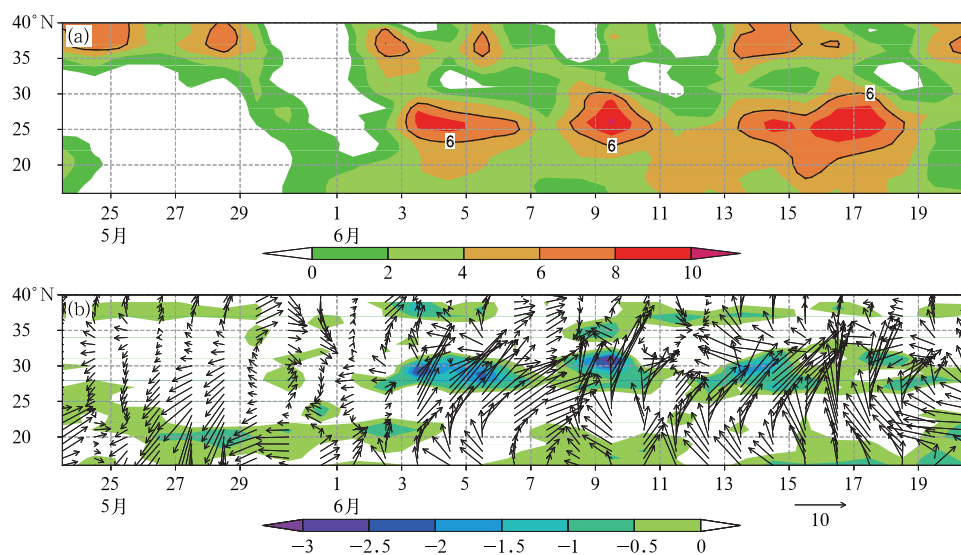


图 5 2011 年 5 月 24 日至 6 月 20 日 (a) 经向风速 (阴影区风速 > 0 , 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) 水汽通量 (风矢量, 单位: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 及水汽通量辐合区 (阴影区, 单位: $10^{-5} \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 的时间-纬度演变
Fig. 5 Time-latitude cross section of (a) meridional winds (shaded; wind speed > 0 , unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (b) moisture flux (vector, unit: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and moisture flux divergence (shaded; divergence < 0 , unit: $10^{-5} \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) during 24 May to 20 June 2011

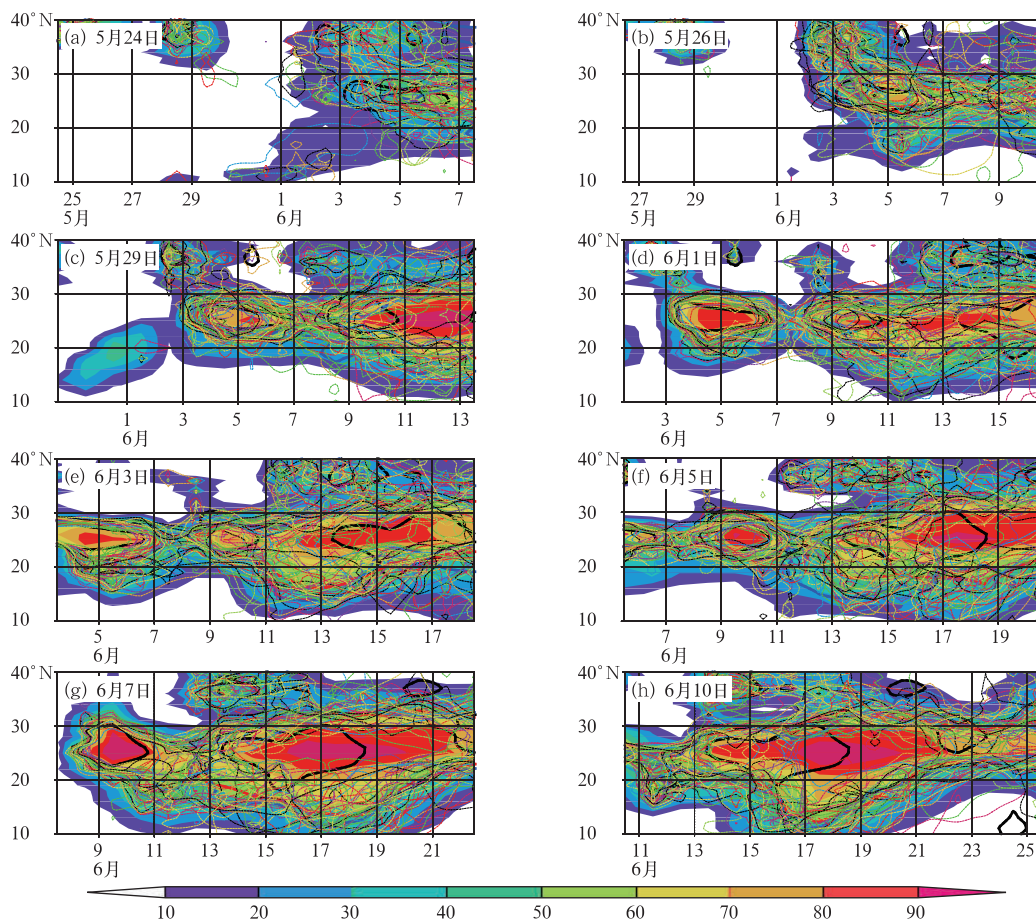


图 6 不同起报时间 850 hPa 全风速大于 $6 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时间-纬度演变概率预报图
(黑色、红色及蓝色实线分别表示实况、集合平均及控制预报; 虚线表示各成员, 阴影表示概率, 单位: %)
Fig. 6 Time-latitude cross section of 850 hPa meridional wind probability exceeding $6 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ in different initial forecasts (black solid line: observation; red solid line: ensemble average; blue solid line: control; dashed line: member; shaded area: probability, unit: %)

3 结论与讨论

本文针对 2011 年长江中下游旱涝转换时期的环流形势、强降雨过程对欧洲中心集合预报性能进行了天气学分析,初步得到以下结论:

(1)集合平均预报能够清晰地反映出对流层高、中、低层形势的转换,特别是在延伸期时段就能够准确预报南亚高压东部脊线、副高西部脊线北抬、低层水汽条件的转换,预报提前的时效可达 10~15 d,对后期强降雨过程的预报无疑有非常好的指示意义。

(2)集合平均预报对大范围降水过程期间主要影响系统的预报在不同预报时效具有较好的稳定性,这就使得利用集合预报进行后期环流趋势、天气系统的演变预报成为可能。

(3)随着预报时效的临近,集合预报各个成员对天气系统预报的发散度逐渐减小。虽然集合成员在不同的预报时效对不同天气系统的预报偏差的规律性不强,但是少数成员的预报与实况较为一致的结果体现了集合预报的某种优势,有效提取集合预报少数成员较准确的预报信息将有助于提高预报准确率。

(4)针对 850 hPa 风场的概率预报检验分析表明,集合预报给出的中长期预报时效内的小概率预报信息是有意义的,这一结论也反映出集合概率信息在中长期预报应用中的复杂性,如何正确应用小概率信息是预报业务研究中的重要方向之一。

综合来看,集合预报对 2011 年长江中下游地区旱涝转换时期大尺度环流具有较好的预报效果,集合预报在延伸期时效的预报稳定性使得将转折性趋势预报、过程预报的时效延长 3~4 d 成为可能。但是,另一方面,由于资料所限,本文仅限于 2011 年的四次降水过程研究,其主要结论的普适性还需要经过大量个例分析及统计检验。

参考文献

陈超辉,王铁,谭言科,等. 2009. 2003 年江淮汛期多模式短期集合预

报方法研究. 热带气象学报, 25(4):449-457.

陈静,陈德辉,颜宏. 2002. 集合数值预报发展与研究进展. 应用气象学报, 13(4):497-507.

陈丽芳,陈勇明. 2010. 集合预报方法在不同类型天气中的预报性能评估. 科技通报, 26(3):331-338.

陈良吕,陈静,陈德辉,等. 2014. 基于 T213 集合预报的延伸期产品释用方法及初步试验. 气象, 40(11):1293-1301.

丑纪范. 2002. 大气科学中的非线性及复杂性. 北京:气象出版社.

邓国,龚建东,邓莲堂,等. 2010. 国家级区域集合预报系统研发和性能检验. 应用气象学报, 21(5):513-523.

杜钧. 2002. 集合预报的现状和前景. 应用气象学报, 13(1):16-28.

段明铿,王盘兴,吴洪宝,等. 2009. 夏季亚欧中高纬度环流的集合预报效果检验. 应用气象学报, 20(1):56-61.

段明铿,王盘兴,吴洪宝. 2011. 500 hPa 位势高度场极端天气事件的 NCEP 集合概率预报效果分析. 大气科学学报, 34(6):717-724.

段明铿,王盘兴. 2004. 集合预报方法研究及应用进展综述. 南京气象学院学报, 27(2):279-288.

李俊,杜钧,陈超君. 2015. “频率匹配法”在集合降水预报中的应用研究. 气象, 41(6):674-684.

李泽峰,陈德辉. 2002. 国家气象中心集合数值预报业务系统的发展及应用. 应用气象学报, 13(1):1-15.

麻巨慧,朱跃建,王盘兴,等. 2011. NCEP、ECMWF 及 CMC 全球集合预报业务系统发展综述. 大气科学学报, 34(3):370-380.

毛恒青,王建捷. 2000. 集合预报业务使用现状和趋势. 气象, 26(6):26-29.

毛伟峰,陈颖,白素琴,等. 2011. 用统计集合方法制作全国汛期降水滚动预测试验. 气象, 37(5):547-554.

穆穆,陈博宇,周非凡,等. 2011. 气象预报的方法与不确定性. 气象, 37(1):1-13.

王秀文,李勇,周兵. 2012. Rossby 波列传播效应在梅汛期强降雨中期预报中的应用研究. 气象, 38(9):1070-1077.

周兵,赵翠光,赵声蓉. 2006. 多模式集合预报技术及其分析与检验. 应用气象学报, 17(s):104-109.

朱玉祥,黄嘉佑,丁一汇. 2016. 统计方法在数值模式中应用的若干新进展. 气象, 42(4):456-465.

Du, J., Mullen S L., Sanders F. 1997. Short-range ensemble forecasting of quantitative precipitation. Mon Wea Rev, 125(10):2427-2459.

Lorenz E N. 1997. 刘式达,刘式适,严中伟译. 混沌的本质. 北京:气象出版社.

National Research Council. 2006. Completing the forecast: Characterizing and communicating uncertainty for better decision using weather and climate forecast. Washington DC: The National Academy Press.