

CMA-GEPS 对中国超强梅雨天气过程的预报能力分析

齐倩倩¹ 朱跃建² 陈静^{1,*} 佟华¹ 郭云谦³

1 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京, 100081

2 美国国家海洋和大气管理局/国家气象局/国家环境预报中心/环境模式中心, 美国马里兰州

3 国家气象中心

摘要 基于中国气象局自主研发的全球集合预报系统CMA-GEPS, 针对2020年6月-7月的长江中下游地区超强梅雨天气过程, 开展了中国梅汛期强降水的预报能力分析。结果表明, 西太副高的稳定维持及夏季风的持续增强为梅汛期强降水的发生提供了有利的动力和水汽条件。CMA-GEPS对西太副高各指数的快速调整趋势预报, 可提前7-10天在预报中呈现; 对西太副高强度和面积预报技巧与NCEP集合预报相当, 表现为偏弱的估计, 脊线和西伸脊点预报技巧与ECMWF集合预报相当, 表现为脊线位置偏南, 西伸脊点偏东的偏差。CMA-GEPS对东亚夏季风指数预报技巧在9天以上, 较控制预报提前2天。CMA-GEPS的控制预报存在强度偏弱, 雨带位置偏南的系统性偏差, 和漏报现象; 基于空间和时间权重修正的邻域方案TSWP, 明显提高了大雨预报的技巧, 减少了漏报的发生, 优于控制预报和传统的单点概率预报, 从而表明, TSWP方案对梅汛期大雨过程的预报是有效且合理的。

关键词 超强梅雨过程, 西太副高, 东亚季风, CMA-GEPS, TSWP 方案

Assessment of CMA-GEPS prediction capability for the extreme Meiyu process

over China

QI Qianqian¹ ZHU Yuejian² CHEN Jing^{1,*} TONG Hua¹ Guo Yunchuan³

1. Center for Earth System Modeling and Prediction of China Meteorological Administration (CMA), Beijing 100081

2 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)/National Weather Service (NWS)/National Centers for Environmental Prediction (NCEP)/Environmental Modeling Center(EMC), College Park, Maryland, USA 20742

3 National Meteorological Center, Beijing 100081

Abstract Based on the Global Ensemble Prediction System in China Meteorological Administration (CMA-GEPS), the extreme Meiyu process over China in 2020 was evaluated. Results show that, during the Meiyu season, a strong and stable western Pacific subtropical high (WPSH) and a gradually strengthened East Asian summer monsoon provide favorable dynamic and moisture conditions for strong rainfall. For the western Pacific subtropical high, CMA-GEPS could skillfully forecast the evolution trend of WPSH index with 7-9 leading days; the CMA-GEPS prediction skills of WPSH strength and area are about the same level as the results from the NCEP ensemble prediction system, and the WPSH strength presents the weaker bias compared with the observation; the prediction skills of ridge line and western boundary index with CMA-GEPS are comparable with the results from ECMWF ensemble prediction system, and the forecasting bias is mainly attributed to the more southward location of ridge

作者简介: 齐倩倩, 女, 1990 年出生, 博士, 高级工程师。主要从事数值集合预报技术研发及诊断评估。

Email: qiqianqianhenu@163.com

通讯作者: 陈静, 从事集合预报技术研发。E-mail: chenj@cma.gov.cn

***资助课题:** 国家自然科学基金青年基金项目 (41906022)、中国气象局数值预报中心青年基金 (400441)

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41906022), the Youth Fund of Numerical Weather Prediction Center of CMA (Grant 400441),

line and more eastward center position of western boundary. For the East Asian summer monsoon, CMA-GEPS could skillfully predict the index with 9 leading days, which was two days earlier than the control forecast. The CMA-GEPS control forecasting bias is mainly attributed to the weaker precipitation intensity and more southward location of strong rainfall belt, and also the control forecasting fails to predict the heavy rain in some regions in the middle and lower reaches of Yangtze river. With the time-spatial weight probability (TSWP) neighborhood scheme, the prediction skills related to the heavy rain with CMA-GEPS are improved obviously, and the scheme reduced the occurrence of precipitation missing report. The results of precipitation probability prediction were verified by observation and Brier Scores, which show that: the TSWP neighborhood scheme is superior to the original single point ensemble probability forecast method and the control forecast, and also has a well application values for the heavy storm prediction in the Meiyu period.

Keywords extreme Meiyu process, western Pacific subtropical high, East Asian summer monsoon, CMA-GEPS, TSWP scheme

1 引言

暴雨是我国多发性重大灾害天气之一。统计结果表明,我国每年因暴雨灾害造成的直接经济损失和死亡人数远超过其它气象灾害(郑国光等, 2019)。因此,对暴雨洪涝灾害的预报和防治始终是我国防灾减灾的重点任务。每年6、7月的梅雨天气,常造成我国长江中下游地区频繁的强降水过程(陶诗言等, 2008)。尤其是,2020年6月-7月发生了历史上一次超强的梅雨季,该时期长江流域降水强度之强、持续时间之长均为历史同期罕见。持续的强降雨导致长江中下游地区发生了极为严重的洪涝灾害(刘芸芸和丁一汇, 2020; 张芳华等, 2020)。

大量研究表明,梅雨期的强降水是多尺度天气系统相互作用的结果,而连续性强降水过程是在有利的大尺度环流背景下产生的(徐海明等, 2001)。在该大尺度环流形势背景下,高、低空急流运动为强降水的发生提供必须的动力和水汽条件。西太平洋副热带高压以及来自洋面的季风活动是影响梅雨汛期的两个主要系统。对我国影响巨大的西北太平洋副热带高压,简称副高,是一个稳定而少动的暖性深厚天气系统。其外围西北侧的西南气流,是向暴雨区输送水汽的重要通道。副高的位置和强度变化是长江流域旱涝的最主要特征,在中国梅汛期,副高持续偏强,西北太平洋对流层低层盛行异常风场,从而副高西侧来自印度洋和孟加拉湾的水汽输送明显增强,可为长江中下游地区持续性降水提供充沛的水汽条件。我国东部地区处于亚澳季风区,梅汛期降水具有典型的夏季风降水特征。东亚夏季风以阶段性的方式进行季节推进和撤退,其异常活动会影响到江淮流域的入梅时间及梅雨持续天数,进而对我国梅汛期降水产生重要影响(丁一汇和张建云, 2009)。

随着数值模式预报技术的发展,强降水预报水平已得到明显提高(李泽椿等, 2004; 矫梅燕, 2010)。但受降水系统本身及模式误差影响,强降水预报仍存在较大误差。考虑到定量降水预报在时间和空间上均存在较大不确定性,因此,大量的研究以集合数值预报为依托,通过应用不同概率预报方法,以期提高暴雨等小概率极端性天气事件的概率预报水平(陈静等, 2005; 刘家峻等, 2010; 黄红艳等, 2016; 高守亭等, 2018)。邻域概率法是处理高分辨率降水集合预报不确定性的一种新方法,该方法利用某格点(x,y)及其邻域空间若干点的降水概率值代替格点(x,y)的降水值,通过邻域格点的确定性预报获得中心格点的概率预报(Theis et al. 2005)。Azadi and Zakeri (2010)基于邻域概率法,对伊朗地区进行降水预报试验,认为该方法在预报一致性、预报质量等方面都优于确定性模式预报结果。刘雪晴等(2020)将权重系数引入到邻域概率法中,设计了权重修正邻域方案及二分类权重修正邻域方案,并应用在CMA-REPS中,提高了概率预报的可靠性。在已有的邻域概率法计算中,前人的研究

大都仅考虑了空间不确定性,没有考虑时间不确定性是否会产生预报效果更好的概率预报问题,另外,也没有专门应用在强水概率预报中。因此,在本研究中,我们将权重系数引入到邻域空间和预报时间中,设计一种基于空间和时间权重修正的邻域方案,并将其应用在CMA全球集合预报系统(CMA-GEPS)中,探讨对梅汛期大雨的预报能力。

鉴于以上的研究背景,本研究试图采用中国气象局数值预报中心自主研发的CMA-GEPS业务产品,开展2020年中国超强梅雨天气过程的预报能力分析。首先结合实况,分析2020年中国超强梅雨期的天气过程,包括2020年6月-7月长江中下游降水的阶段性变化和500hPa位势高度的环流形势场特征,并分析副热带高压活动、南海夏季风和水汽输送与梅雨的关系。其次,评估CMA-GEPS对梅汛期两个主要影响系统副高和东亚季风的预报能力。进一步地,从概率预报的角度,设计一种基于空间和时间权重修正的邻域方案,针对长江中下游地区8次典型大雨过程,评估CMA-GEPS对梅雨期典型大雨的概率预报能力。

2 资料和方法介绍

2.1 数据资料

本文分析梅汛期降水特征所用的观测资料包括:24小时累积降水、500hPa位势高度、850hPa矢量风及水汽通量散度。分析时间段为:2020年6月1日—7月31日。降水观测资料为同期CMAPAS(CMA Multi-Source merged Precipitation Analysis System)中国区域地面-卫星-雷达三源融合降水分析产品(潘旻等,2015)。其他要素观测资料来源于NCEP/NCAR再分析数据。

本研究主要评估CMA-GEPS对梅雨期天气过程的预报能力分析。CMA-GEPS是在CMA全球数值预报模式的基础上,由中国气象局数值预报中心独立自主研发的预报系统。该系统采用奇异向量法产生初值扰动(刘永柱等,2013;李晓莉等,2019),使用SPPT方法和SKEB扰动方案产生模式随机扰动(袁月等2016;彭飞等,2019),共生成31个集合预报成员,包括30个扰动预报和1个控制预报。集合成员水平分辨率为50km,即 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$;垂直60层,输出范围为全球。该业务系统每天00UTC和12UTC起报,预报时效为360小时,其中,84小时以内预报模式输出的时间间隔为3小时,84-192小时模式输出间隔为6小时,192-360小时模式输出间隔为24小时。

作为对照分析,本研究也采用了ECMWF集合预报和NCEP集合预报资料。ECMWF集合预报是在IFS(Integrated Forecasting System)模式系统基础上,采用奇异向量法扰动方案和集合卡尔曼滤波生成50个成员初值,和1个未扰动成员,并采用随机物理扰动方案(SPPT)对参数化过程中预报倾向进行扰动,每天两次预报,时效0-15天,空间分辨率为18km。NCEP发展的GEFS(Global Ensemble Forecast System)则采用卡尔曼滤波方案生成20个成员初值和随机全倾向扰动法(STTP)生成21个成员,每天四次预报,时效0-16天,模式水平分辨率为33km。为了便于对比分析,本文将三套模式预报数据统一插值到相同的标准经纬度格点上。

2.2 方法介绍

本研究从概率预报的角度,设计一种基于空间和时间权重修正的邻域方案,并与传统的概率预报结果做对比,针对8次大雨过程,评估CMA-GEPS对梅雨期典型暴雨的预报能力。空间和时间权重修正的邻域方案设计如下。

首先,对降水场做二进制处理。对累积降水阈值 q ,单个格点 (i, j) 的二进制降水概率BP

(Binary Probability) 为:

$$BP_{(i,j)} = \begin{cases} 1 & F_{(i,j)} \geq q \\ 0 & F_{(i,j)} < q \end{cases}, \quad (1)$$

其中, $F_{(i,j)}$ 为预报格点的24小时累积降水量, 累积降水阈值 q 可根据实际降水量及研究对象确定, 由于本文针对的是大雨天气过程的概率预报研究, 因此 q 取25mm。

其次, 对二进制降水概率BP做空间邻域格点权重修正。修正原则基于模式特点及经验得出, 本文选取5点邻域概率方案(中心格点加上周围临近四个点, 一共5个格点, 邻域窗为正方形)。中心格点的权重应为最大, 为0.5, 周围四个临近格点等权, 为0.125。即, 权重

$$\text{系数 } \alpha_{m(i,j)} = \begin{cases} 0.5 & (i,j) \text{ 为中心格点} \\ 0.125 & (i,j) \text{ 为邻域格点} \end{cases}, \quad m \text{ 表示邻域中的格点。}$$

然后, 将邻域内二进制概率配以不同的权重系数, 从而计算出中心格点的空间权重修正概率值 (Spatial Weight Probability, SWP) :

$$SWP_{(i,j)} = \frac{\sum_{m=1}^N \alpha_{m(i,j)} * BP_{m(i,j)}}{\sum_{m=1}^N \alpha_{m(i,j)}}, \quad (2)$$

其中, N 为邻域范围内的格点总数, 由于本文选用的是5点邻域概率方案, 因此, $N = 5$ 。

最后, 将空间权重修正概率配以随预报时间的权重系数 (Time-Spatial Weight Probability, TSWP)。具体的,

$$TSWP_{(i,j)} = \begin{cases} 1 & SWP_{(i,j)} \geq T_t \\ SWP & SWP_{(i,j)} < T_t \end{cases}, \quad (3)$$

其中, T_t 为概率阈值。TSWP计算中涉及的概率阈值的最优选取方案, 主要基于经验和试验确定, 具体地, 在预报第1天, T_t 为0.5; 在预报第2天, T_t 为0.375; 在预报第3天, T_t 为0.25;

在预报第4天及更长预报时间上, T_t 为0.125。

将TSWP方法分别应用于每个集合成员, 就可以得到 n 个权重修正邻域概率场, 考虑到全体集合成员的权重修正邻域概率值, 则可以在各成员邻域概率场的基础上生成中心格点的权重修正邻域集合概率 (Time-Spatial Weight Ensemble Probability, TSWNP) :

$$TSWNP_{(i,j)} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n TSWP_{(i,j)}, \quad (4)$$

其中 n 为集合预报成员个数, $TSWP_{(i,j)}$ 为中心格点上各集合成员的权重修正邻域概率值。

3 CMA-GEPS 对超强梅雨天气过程的预报能力分析

3.1 梅汛期降水天气背景分析

2020年6月1日-7月31日总累积降水量空间分布图(图1(a))的结果可看出, 累积降水量超过500mm的降水中心主要集中在华南中北部和长江中下游沿江地区, 尤其在长江中下游沿江区域普遍达500mm上, 局地甚至超过1000mm。另外, 从降水的时间-纬度剖面图

(图 1(b)) 可看出, 6 月上旬强降水中心主要位于江南至华南北部, 中旬降水北抬, 并长时间稳定维持在长江中下游区域, 期间有小幅的南北摆动, 造成降水的南北跨度范围变宽。7 月下旬降水强度明显减弱, 梅雨趋于结束。

500hPa 位势高度环流形势场配置的变化是导致 2020 年超强梅雨的一个关键环流因子。与梅雨汛期前 (5 月 20 日-5 月 31 日) 500hPa 位势高度场相比, 欧亚中高纬环流表现为“两脊一槽”型, 乌拉尔山以西和鄂霍次克海为较强的高压脊, 且向脊区伸展, 巴尔喀什湖附近为低压槽, 经向度较大 (图 2)。该环流形势场的配置有利于来自中高纬地区的冷空气自西北向东南影响我国, 而冷空气活动是持续性强降水形成的重要因素之一。另外, 西太副高南北位置的异常变化是导致 2020 年出现超强梅雨的一个关键环流因子, 在此期间, 西太副高共经历六次北抬和南退的阶段变化 (图 3), 其周期性变化与梅雨的开始和结束、主雨带的北抬和停滞、强降水过程的发生和维持都有很好的对应关系。

另外, 低纬度地区暖湿气流的向北输送是梅雨发生和维持的重要水汽条件 (刘芸芸等, 2006; He et al., 2007)。从图 4 可看出, 低空西南急流是强水汽输送带, 它不仅将来自阿拉伯海、孟加拉湾和南海的暖湿气流输送到我国南方, 为梅雨的形成提供必要的水汽条件, 从而导致梅雨不仅长时间持续, 并且期间暴雨过程也频频发生。

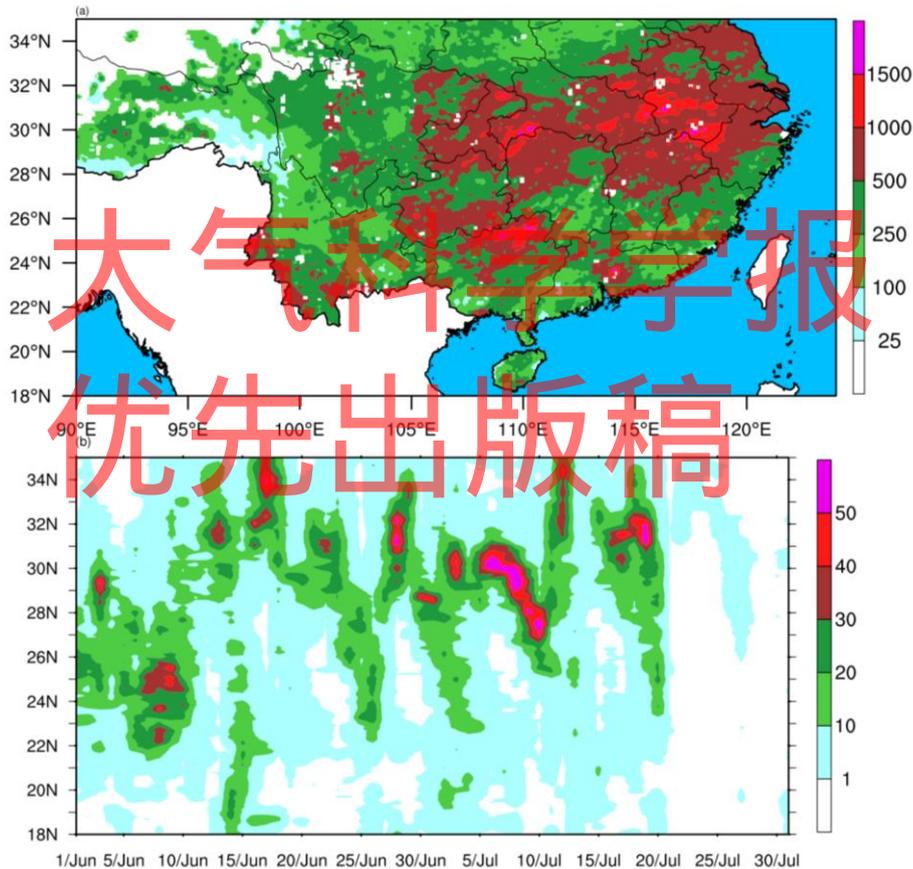


图 1 6 月 1 日—7 月 31 日降水量的空间及时间分布。(a) 累积降水量总分布; (b) 100E-120E 平均降水量的时间—纬度剖面。

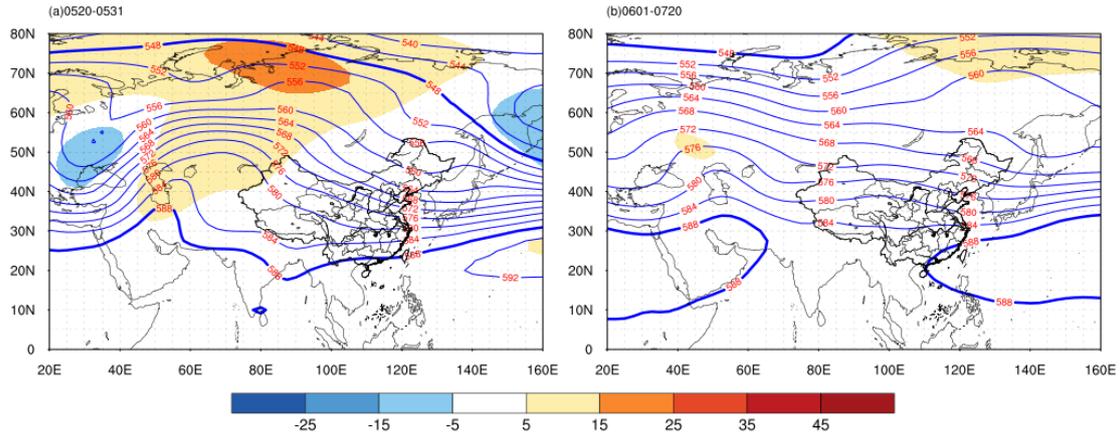


图2 2020年(a)梅雨前(5月20日-5月31日)平均500hPa位势高度场的空间分布和(b)梅雨期(6月1日-7月20日)平均500hPa位势高度场的空间分布(单位:10gpm),其中,等值线为平均场,填色为距平场。

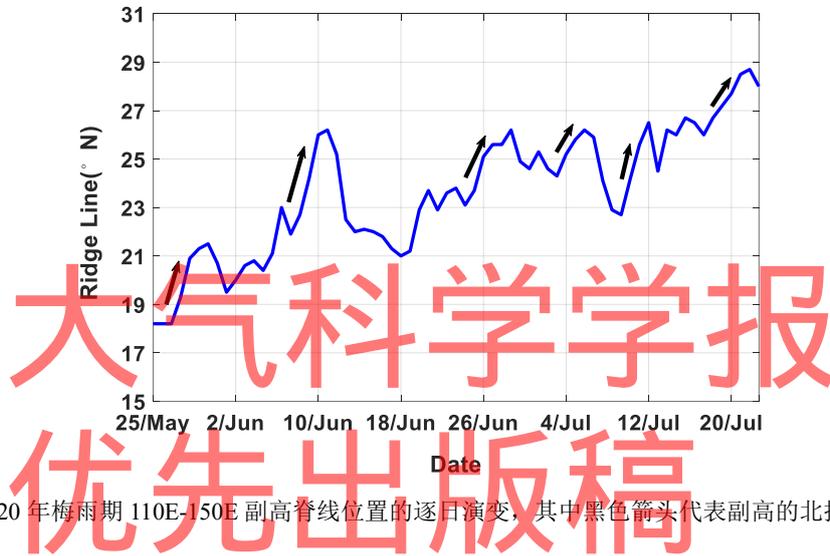


图3 2020年梅雨期110E-150E副高脊线位置的逐日演变,其中黑色箭头代表副高的北抬过程。

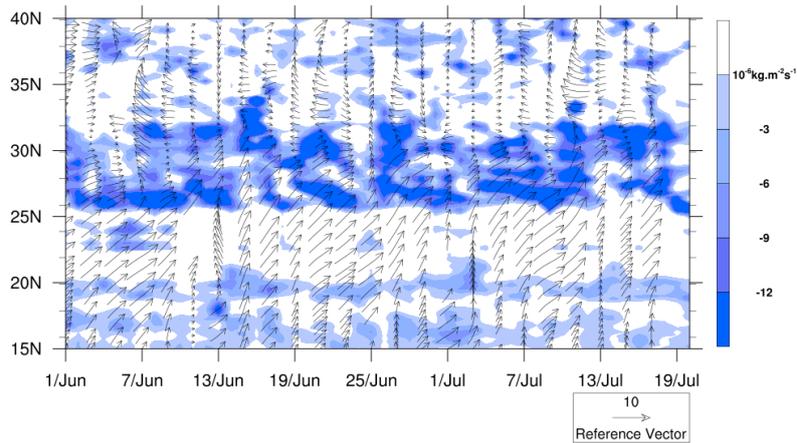


图4 2020年梅雨期前后100-120E平均的850hPa矢量风(箭头,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)及整层水汽通量散度(填色)的时间—纬度剖面。

3.2 CMA-GEPS 对梅雨相关因素的预报能力评估

3.2.1 CMA-GEPS 对梅雨期西太平洋副热带高压的预报能力评估

西太副高的强度、面积、脊线位置和西伸脊点 4 个特征指数综合刻画了西太平洋副热带高压的位置和强度特征。4 个特征指数的计算采用刘芸芸等 (2012) 的定义, 方法如下: (1) 西太副高面积指数: 10°N 以北、 $110^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$ 范围内的 500 hPa 位势高度场上所有数值不小于 5880gpm 的格点所覆盖形成的面积; (2) 西太副高强度指数: 西太副高面积内每个格点的 500 hPa 高度值减去参考值 5870 gpm 的差进行累计; (3) 西太副高脊线指数: 10°N 以北、 $110^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 范围内的 5880 gpm 等值线所包围的副热带高压体内纬向风场上满足 ($u=0$, 且 $\partial u/\partial y > 0$) 要求的特征线所在纬度的平均值; (4) 西太副高西伸脊点指数: $90^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$ 范围内西太副高面积的最西格点所在的经度。

首先评估 CMA-GEPS 对梅汛期东亚 500hPa 位势高度场的空间预报能力。分别以 2020 年 6 月 10 日、6 月 15 日、7 月 10 日、7 月 13 日为例, 图 5 给出了 CMA-GEPS 提前 9 天、12 天和 14 天预报的 500hPa 位势高度场的均方根误差的空间分布。图中结果表明, 相对于高纬度而言, 低纬度是误差低值区, 反映出该预报系统对低纬高度场的预报偏差相对较小。随着预报时间增长, 中高纬度地区均方根误差逐渐增大。当预报时间增加至 12 天及以上时, 均方根误差迅速增大, 环流场与分析场差别加大, 预报能力明显降低。对于描述副高的 588 线 (图 6), 9 天时效预报虽然成员离散度变大, 但集合平均场(蓝实线)仍然可以清晰地体现副高形势, 只是副高强度较分析场偏弱, 集合离散度偏小; 11 天及以上预报, 各成员间离散度增加, 平均场趋于平滑, 面条图中仍有少数部分成员依然可以预报出当前的副高形势。6 月 10 日到 6 月 15 日副高脊线有明显北跳, 7 月 10 日到 7 月 13 日副高西伸脊点明显西移, 集合平均预报在提前 11 天预报上仍可以呈现出来这种趋势。

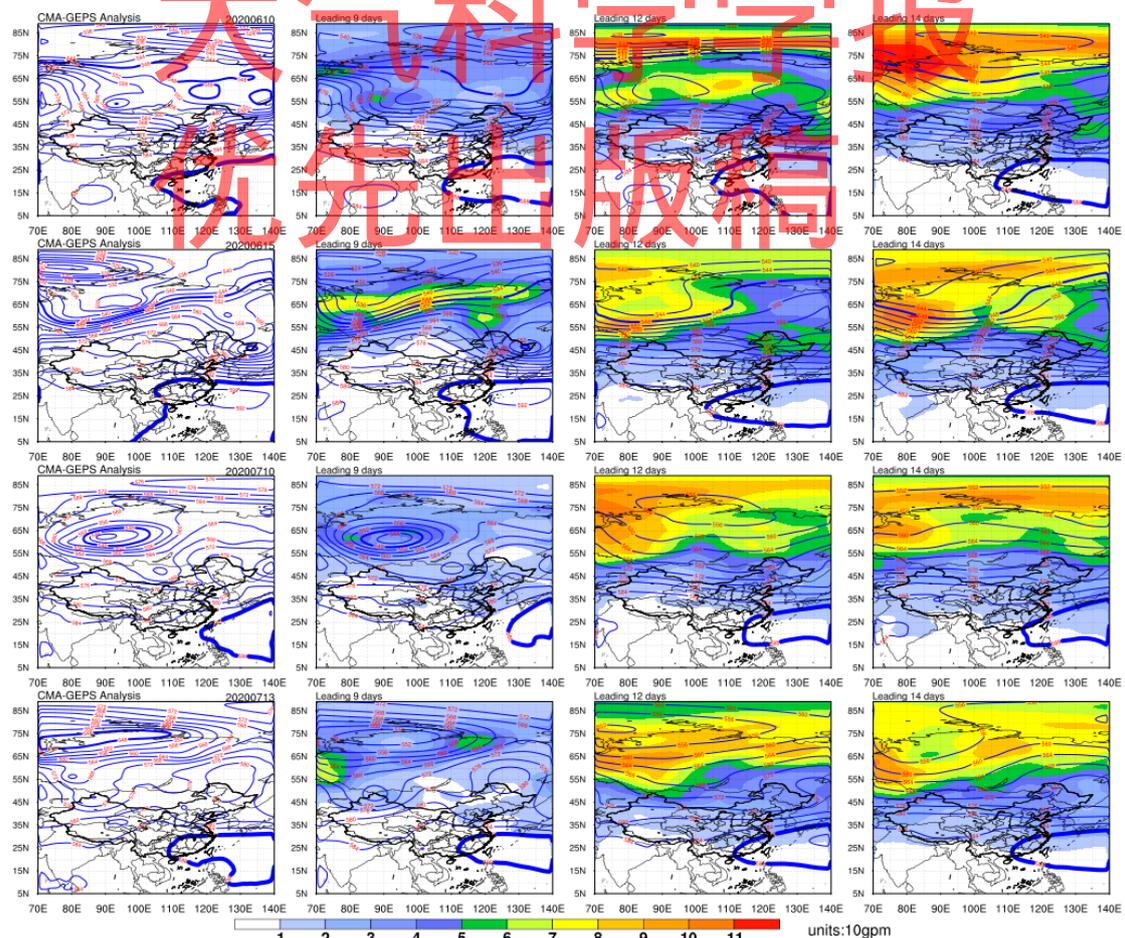


图 5 CMA-GEPS 的 500hPa 位势高度场及均方根误差的空间分布。从左至右分别为：分析场、提前 9 天、12 天、14 天预报。从上到下分别为：2020 年 6 月 10 日、6 月 15 日、7 月 10 日、7 月 13 日。

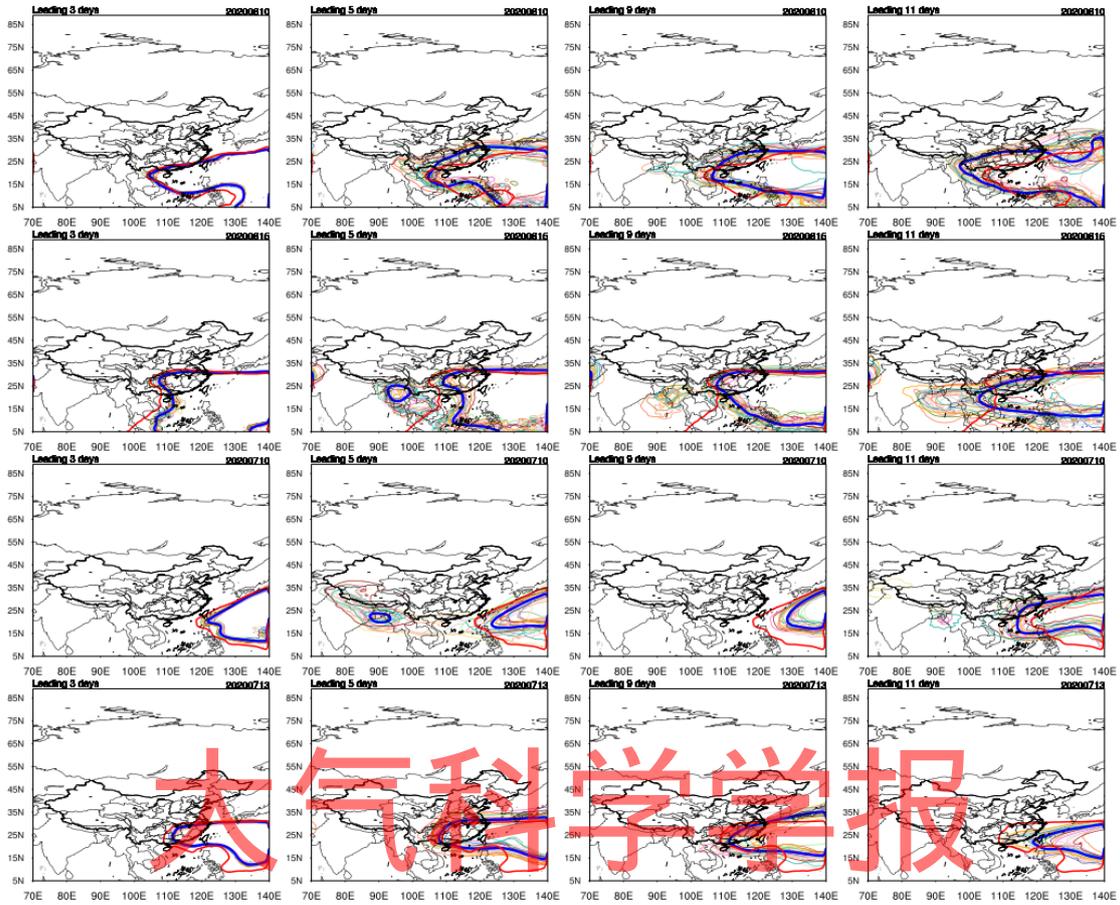


图 6 CMA-GEPS 的 588 线面图。红色粗线条为分析场，蓝色粗线条为集合平均，其他颜色线条为集合成员。从左至右分别为：提前 3 天、提前 5 天、9 天、11 天预报。从上到下分别为：2020 年 6 月 10 日、6 月 15 日、7 月 10 日、7 月 13 日。

西太副高的 4 个标准指数，可较好地刻画西太副高的强弱和位置变化。图 7 给出了西太副高各指数集合平均在不同预报时效下的时间序列。对于强度和面积指数（图 7(a)(b)），基本上所有预报时效下，CMA-GEPS 集合平均预报的西太副高强度偏弱，面积偏小，但在提前 9.5 天预报上，仍能抓住副高演变的发展趋势，尤其是强度和面积发展的转折点上，可以较好地描述。对于脊线指数预报（图 7(c)），大部分预报时效下，模式预报的西太副高脊线位置偏南。但在提前 9.5 天预报上，脊线北跳和南撤的趋势依然可以抓住。对于西伸脊点指数预报（图 7(d)），6 月上旬大部分预报时效西伸脊点位置与分析场相比更偏西，其余大部分时间西伸脊点与分析场相比更偏东，尤其是西伸脊点的峰值预报，基本是偏东，这与模式预报的西太副高强度偏弱有关。

图 8 给出了 CMA、ECMWF 和 NCEP 三套业务集合预报系统的西太副高强度、面积、脊线位置和西伸脊点的不同预报时长下的相关系数。结果表明，随着预报时长的增加，三套集合预报系统的西太副高指数相关系数评分逐渐下降。以 0.5 作为有效预报技巧的阈值，对于 CMA-GEPS，西太副高强度和面积的有效预报技巧均为 9.5 天，脊线位置预报技巧约为 8.5 天，西伸脊点预报技巧约为 6.5 天。对于 ECMWF 集合预报系统，西太副高强度和面积的有效预报技巧可达到 12.5 天，脊线位置预报技巧约为 9.5 天，西伸脊点预报技巧约为 7.5

天。对于 NCEP 集合预报系统，西太副高强度和面积的有效预报技巧达到 11.5 天，脊线位置预报技巧约为 12.5 天，西伸脊点预报技巧约为 9.5 天。综上，ECMWF 集合预报系统在西太副高强度和面积的预报技巧最高，NCEP 集合预报系统在西太副高脊线位置和西伸脊点的预报技巧最高；CMA 集合平均预报技巧在西太副高强度和面积预报上与 NCEP 相当，在西太副高脊线和西伸脊点预报上与 ECMWF 相当。

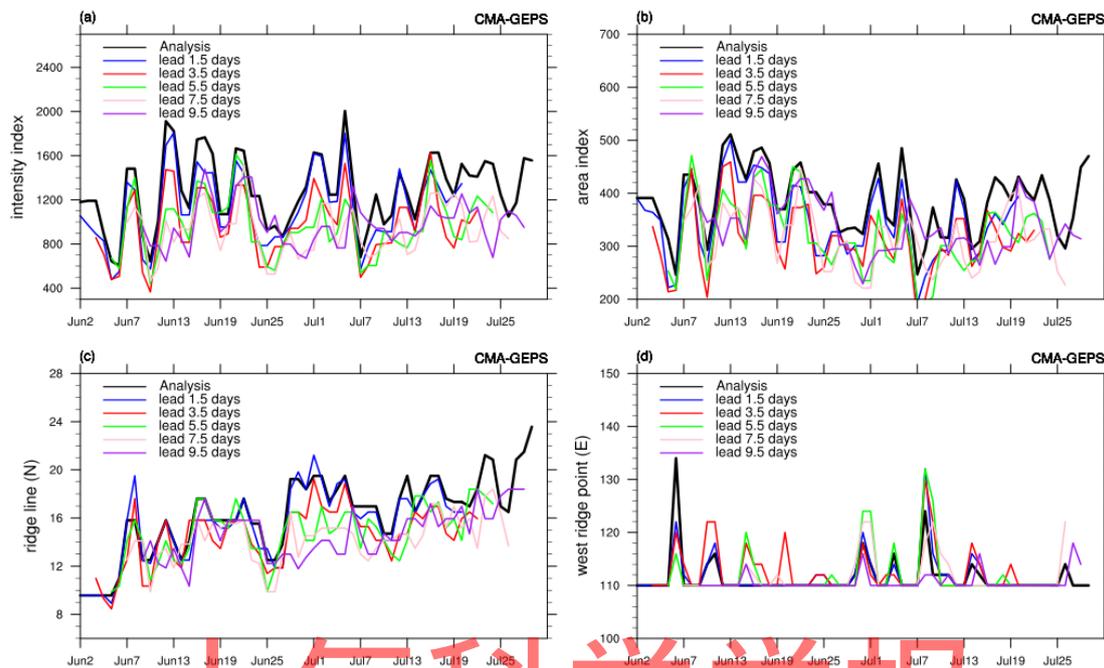


图 7 不同预报时效下西太副高西伸脊点指数时间序列。

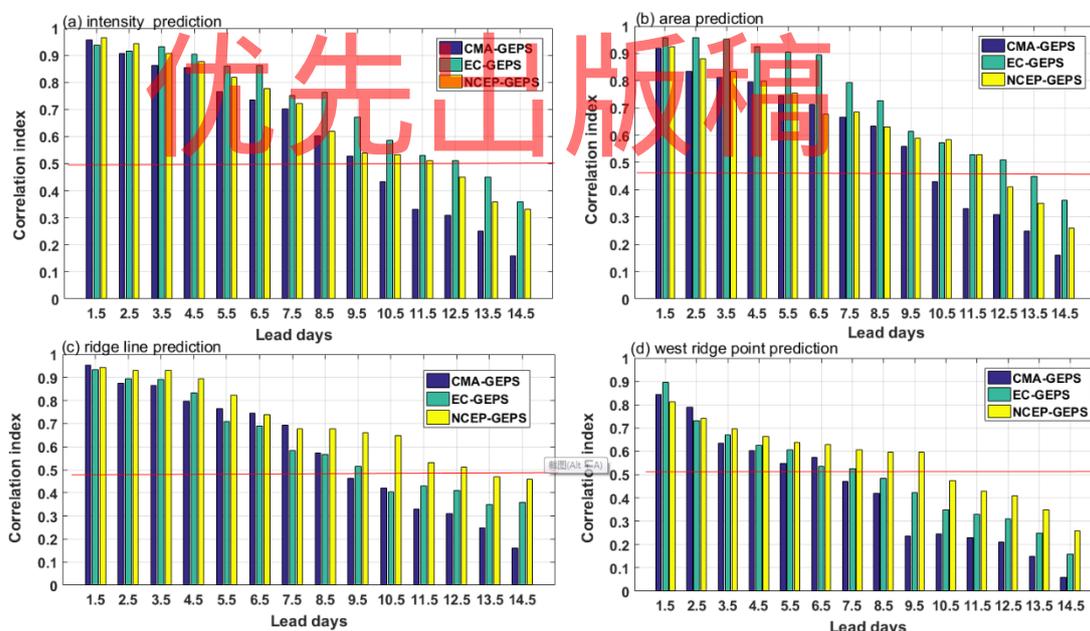


图 8 CMA, ECMWF 和 NCEP 集合预报系统副高不同指数的相关系数评分对比

3.2.2 CMA-GEPS 对梅雨期夏季风指数的预报能力评估

梅雨是夏季季风涌来的充沛水汽和中高纬度的冷空气交汇产生，暴雨往往发生在季风增强期。本研究中，东亚副热带夏季风指数采用张庆云等（2003）定义的指数，即将东亚热带季风槽区（100E-150E, 10N-20N）与东亚副热带地区（100-150E, 25N-35N）平均的 850hPa 纬向风之差作为季风指数。该指数为正，代表夏季偏南风从副热带海洋吹向陆地，指数越大，表示东亚夏季风风力越强。图 9 给出了不同预报时效下东亚夏季风指数的逐日演变。梅汛期，夏季风指数均为正，并呈现周期性发展。从 CMA-GEPS 各预报时效的结果可看出，在 1-7 天预报时，其指数发展趋势均能够与分析场吻合，尤其对季风指数分析场中的快速调整预报上，可以提前 7 天左右在预报中进行提示，很好地描述夏季风持续增强和衰退的周期性变化趋势。在夏季风指数达到最强时，各预报时效下其指数都偏弱。分别计算提前 1-10 天集合平均预报和控制预报的夏季风指数和再分析资料夏季风指数的相关系数（图 10），可以看到随着预报时效增加，相关系数逐渐减小，表明预报的偏差逐渐增大。以 0.5 作为有效预报技巧的阈值，CMA-GEPS 对季风指数的预报天数可达约 9 天左右，较控制预报提前 2 天。

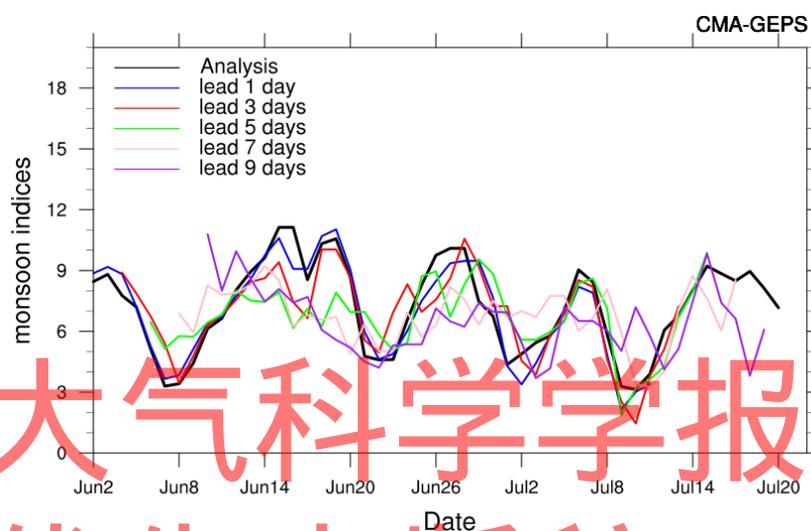


图 9 不同预报时效下夏季风指数时间序列。

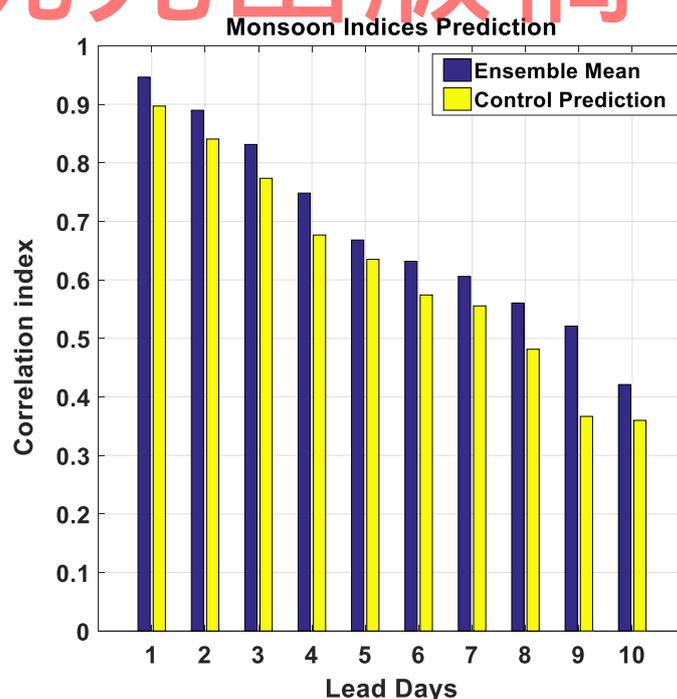


图 10 CMA 全球集合平均预报和控制预报夏季风指数的相关系数评分对比。

3.3 CMA-GEPS 对梅雨期典型大雨过程的预报能力评估

2020 年 6 月上旬-7 月下旬，长江中下游地区多次出现大范围的连续强降水，多地降水量达到 100mm 上。本研究从概率预报的角度，设计一种基于空间和时间权重修正的邻域方案 (TSWP)，与传统的概率预报结果做对比，选用 8 次大雨天气过程，分别提前 24h、48h 预报，评估 CMA-GEPS 对梅雨期典型暴雨的预报能力。试验以控制预报和单点概率预报大于 25mm 的大雨过程作为参考，采用 Brier 评分对预报结果进行评估对比，以分析 TSWP 方案结果的可靠性。

Brier 评分是集合预报常用的评分方法，表示的是均方概率误差，即集合概率与真实观测概率的偏差，表达式如下：

$$BS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_n - O_n)^2, \quad (5)$$

其中，N 为格点数， P_n 是第 n 个格点被检验事件（如 24h 累积降水）的集合预报概率，其值为 0-1。 O_n 是第 n 个格点的观测频率，如果观测大于设定的阈值，则事件发生，值为 1，否则为 0。BS 范围为 0-1，值越小越好。

6 月 27 日-28 日经历了副高北抬和东亚季风增强，6 月 29 日-30 日经历了副高南退和东亚季风减弱。7 月 7 日-8 日经历了副高南退和东亚季风减弱，7 月 9 日-10 日经历了副高北抬和东亚季风增强。受副高北抬和东亚季风增强的影响，6 月 27 日-28 日，降水雨带位置逐渐向东北移动（从北纬 29 度，逐渐移动到北纬 34N），受副高南退和东亚季风减弱的影响，6 月 29 日-30 日，降水雨带逐渐向南移动，且降水强度逐渐减弱（图 11 (a1) (b1) (c1) (d1)）。受副高南退和东亚季风减弱的影响，7 月 7 日-8 日，降水雨带位置逐渐向南移动，且降水强度逐渐削弱；受副高北抬和东亚季风增强，降水雨带逐渐向西北方向移动，且降水强度逐渐增强（图 13 (a1) (b1) (c1) (d1)）。这 8 次长江中下游及以南地区发生的大雨过程，受副高和东亚季风影响较大。为此，我们选取 6 月 27 日-30 日及 7 月 7 日-10 日这 8 次典型大雨过程作为分析。对于 24 小时预报结果，图 11 和图 12 结果表明，控制预报能大致预报出这 8 次强降水雨带的位置，但存在系统性预报偏差。结合 3.2.1 及 3.2.2 节的分析，这可能是因为 CMA-GEPS 预报的夏季风偏弱，副高位置偏南，使得季风无法推进更北的区域，从而使得预报的 24 小时累积降水强度偏弱，雨带偏南。传统的单点概率预报相比于控制预报，预报结果有明显改善，但概率值偏低，存在一定程度的漏报。基于 TSWP 方案的结果表明，该方法明显提高了概率预报值，并且对于部分个例，可预报出单点概率预报和控制预报漏报的区域，譬如，6 月 28 日个例，TSWP 方案预报出了湖南西北部的大雨过程；6 月 30 日个例，TSWP 方案预报出了江西和浙江交界处、湖南东部的大雨过程；7 月 9 日个例，TSWP 方案预报出了广西省三江市附件的大雨过程；7 月 10 日，TSWP 方案预报出了湖南，湖北，江西境内部分地区及三省交界处的大雨过程。而这些区域，控制预报及单点概率预报都没有预报出来。

对于 48 小时预报结果，图 13 和图 14 结果表明，控制预报仍能预报出大雨雨带位置，但强度偏弱，漏报严重。传统的单点概率预报相比于控制预报，预报结果有明显改善，但存在漏报。基于 TSWP 方案的概率预报可最大程度地覆盖发生大雨天气过程的地区，多个个例预报出了单点概率预报和控制预报漏报的区域，与实况更为吻合。譬如，6 月 28 日个例，TSWP 方案预报出了湖北东部的大雨过程；7 月 8 日个例，TSWP 方案预报出了东北部的的大雨过程；7 月 10 日个例，TSWP 方案预报出了广西东部、湖南西部大部分地区的大

雨过程。而这些区域，控制预报及单点概率预报都没有预报出来。这表明，TSWP 方案无论在 24 小时和 48 小时预报上，都存在明显的优势，要优于控制预报和单点概率预报。

Brier 评分结果表明，无论是 24 小时预报，还是 48 小时预报，单点概率预报和基于 TSWP 方案的概率预报均明显优于控制预报。对于 24 小时预报，基于 TSWP 方案的概率预报结果略优于单点概率预报（图 15 (a)），对于 48 小时预报，基于 TSWP 方案的概率预报结果与单点概率预报结果相当（图 15 (b)），这是因为基于 TSWP 方案的概率预报增大了预报空报率。结合实际预报结果及 Brier 评分结果，表明，尽管 TSWP 方案在一定程度上增加了空报率，但该方案可预报出控制预报及传统单点概率预报漏报的区域，因此，该方案对大雨过程的预报是有效且合理的。

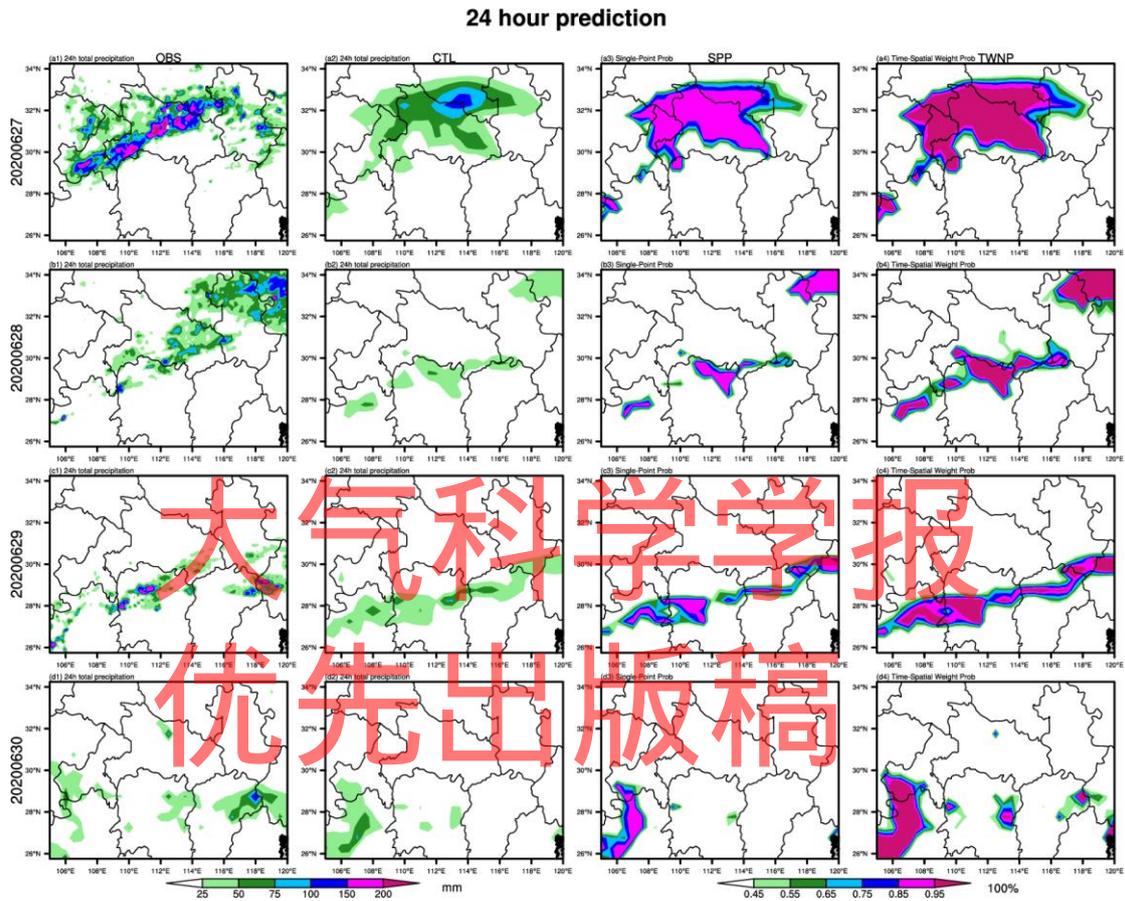


图 11 CMA-GEPS 的 24 小时累积降水预报。从左至右分别为：实况、24 小时控制预报、24 小时单点概率预报及基于 TSWP 方案的 24 小时概率预报结果；从上至下分别为 2020 年 6 月 27 日、6 月 28 日、6 月 29 日及 6 月 30 日。

24 hour prediction

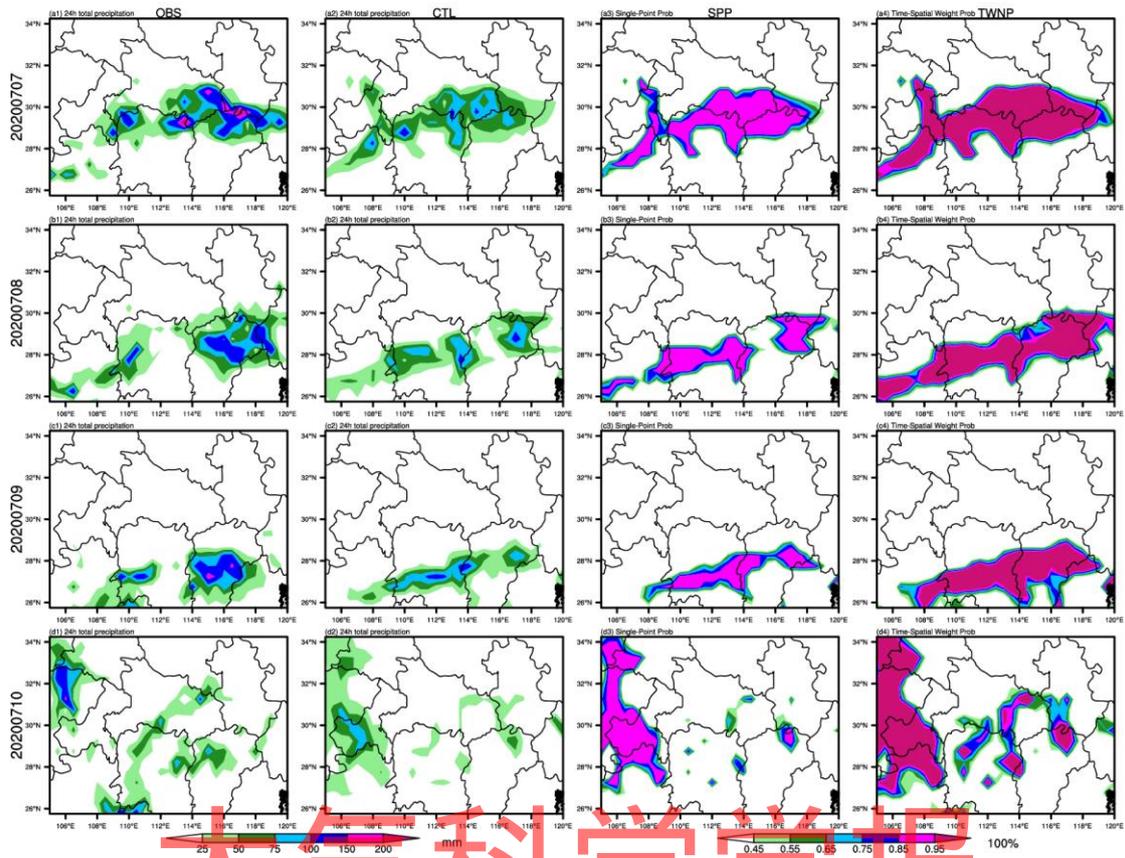


图 12 CMA-GEPS 的 24 小时累积降水预报。从左至右分别为：实况、24 小时控制预报、24 小时单点概率预报及基于 TSWP 方案的 24 小时概率预报结果；从上至下分别为 2020 年 7 月 7 日、7 月 8 日、7 月 9 日及 7 月 10 日

大气科学学报
优先出版稿

48 hour prediction

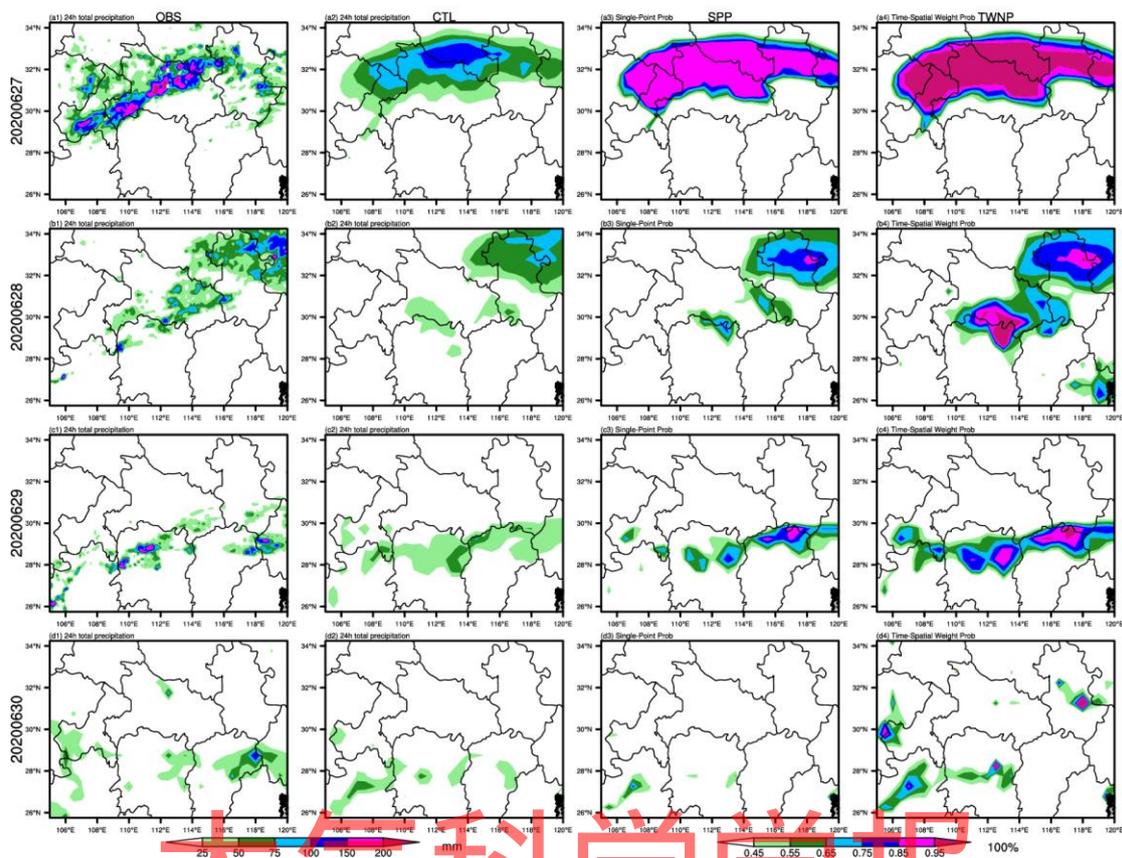


图 13 CMA-GEPS 的 24 小时累积降水预报。从左至右分别为：实况、48 小时控制预报、48 小时单点概率预报及基于 TSWP 方案的 48 小时概率预报结果；从上至下分别为 2020 年 6 月 27 日、6 月 28 日、6 月 29 日及 6 月 30 日。

优先出版稿

48 hour prediction

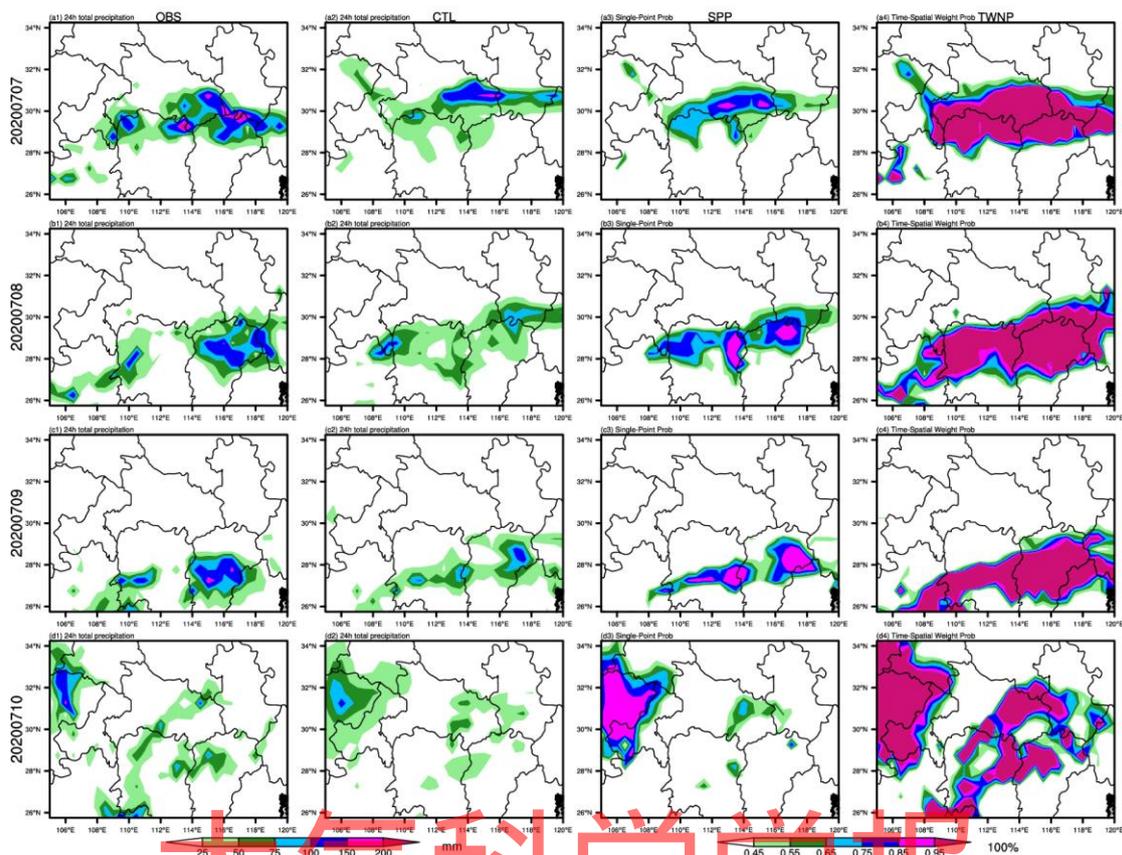


图 14 CMA-GEPS 的 24 小时累积降水预报。从左至右分别为：实况、48 小时控制预报、48 小时单点概率预报及基于 TSWP 方案的 48 小时概率预报结果；从上至下分别为 2020 年 7 月 7 日、7 月 8 日、7 月 9 日及 7 月 10 日。

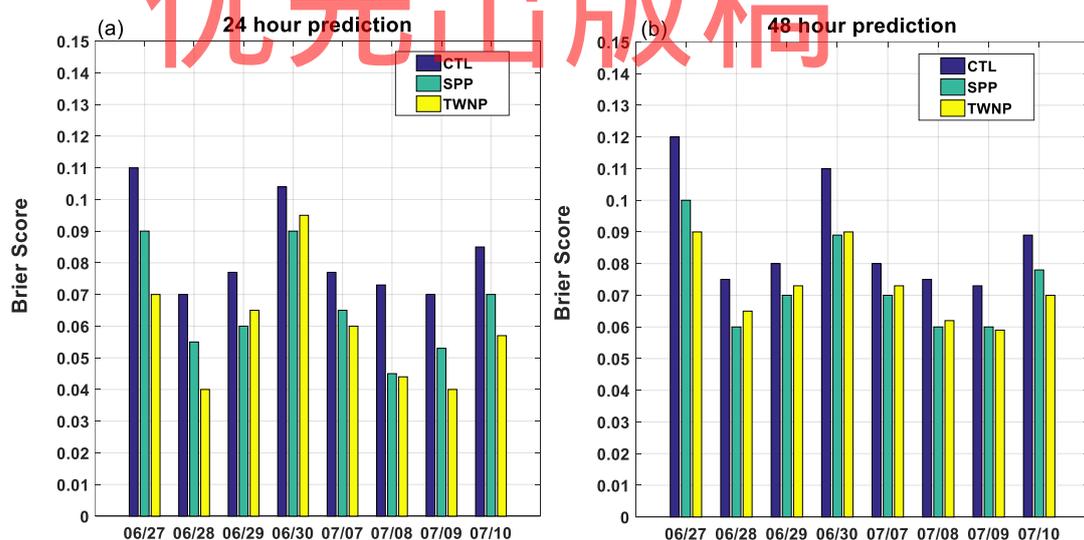


图 15 8 次降水个例的 Brier 评分结果。(a)：24 小时预报结果；(b) 48 小时预报结果。

4 总结和讨论

2020年6月-7月,长江中下游地区发生了历史上极为罕见的超强梅雨天气过程。本文采用中国气象局自主研发的CMA-GEPS,开展了中国超强梅雨天气过程的预报能力分析。首先分析了超强梅雨爆发的相关影响系统,然后诊断评估了CMA-GEPS对梅汛期两个主要影响系统西太平洋副高和东亚季风的预报能力,并设计了一种基于空间和时间权重修正的邻域方案TSWP,针对8次典型大雨过程,对比分析了该方案对超强梅汛期大雨的概率预报能力。主要结论如下:

(1) 西北太平洋副高稳定维持,夏季风持续增强,低纬度地区形成强的水汽输送带,为超强梅汛期降水的发生提供了有力的动力和水汽条件;

(2) CMA-GEPS对中低纬度大尺度环流形势配置有较好的预报能力,可提前12天在预报中有所呈现;对西太副高各指数的快速调整预报,可提前7-10天在预报中有所呈现;CMA集合平均预报的西太副高强度偏弱,面积偏小,脊线位置偏南,西伸脊点偏东;CMA-集合平均预报技巧在西太副高强度和面积上与NCEP集合预报技巧相当,在脊线和西伸脊点预报上与ECMWF集合预报技巧相当。

(3) CMA-GEPS对东亚夏季风指数增强和衰退的周期性变化趋势预报可提前7天呈现;预报的夏季风指数强度偏弱;对东亚季风指数的有效预报可提前9天以上,较控制预报提前2天。

(4) 针对梅汛期长江中下游地区8次典型大雨天气过程,CMA-GEPS在提前24小时及48小时预报上,控制预报能基本预报出8次大雨过程的强降水雨带及雨带位置南北移动的趋势,但存在强度偏弱,雨带位置偏南的系统性偏差;单点概率预报较控制预报相比,结果明显改善,但概率值偏低,仍存在一定程度的漏报;TSWP方案明显提高了概率预报值,可预报出单点概率和控制预报漏报的区域,且Brier评分略优于单点概率预报结果。综合分析表明,TSWP方案对大雨天气过程的预报是有效且合理的。

本文是基于超强梅雨天气背景下,给出了CMA-GEPS的预报性能和偏差。对于其它天气气候背景下,梅汛期降水的可预报性能力如何,还需要进一步深入分析和讨论;另外,TSWP方案提高了CMA-GEPS对梅汛期典型大雨天气过程的预报能力,减少了漏报的发生,但不可避免地增大了空报率,如何设计最优的邻域半径和修正权重系数,以得到更合理的概率预报结果,值得进一步讨论。

5 参考文献

Azadi M, Zakeri Z, 2010. Probabilistic precipitation forecasting using a deterministic model output over Iran [J]. *Research Journal of Environmental Sciences*, 4(2): 138-148.

陈静, 薛纪善, 颜宏, 2005. 一种新型的中尺度暴雨集合预报初值扰动方法研究 [J]. *大气科学*, 29(5): 717-726. Chen J, Xue JS, Yan H, 2005. A new initial perturbation method of ensemble mesoscale heavy rain prediction [J]. *Chin J Atmos Sci*, 29(5): 717-726.

丁一汇, 张建云, 2009. 暴雨洪涝 [M]. 北京: 气象出版社. Ding YH, Zhang JY, 2009. Heavy Rain fall and flood [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).

高守亭, 周玉淑, 冉令坤, 2018. 我国暴雨形成机理及预报方法研究进展 [J]. *大气科学*, 42(4): 833-846. Gao ST, Zhou YS, Ran LK, 2018. A review on the formation mechanisms and forecast methods for torrential rain in China [J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(4): 833-846.

He JH, Sun CH, Liu YY, et al., 2007. Seasonal transition features of large-scale moisture transport in the Asian-Australian monsoon region [J]. *Adv. Atmos. Sci*, 24(1): 1-14.

黄红艳, 齐琳琳, 刘健文, 等, 2016. 多物理ETKF在暴雨集合预报中的初步应用 [J]. *大气科学*, 40(4): 657-668. Huang HY, Qi LL, Liu JW, et al., 2016. Preliminary application of a multi-physical ensemble transform

- Kalman filter in precipitation ensemble prediction [J]. *Chin J Atmos Sci*, 40 (4): 657-668.
- 矫梅燕, 2010. 天气业务的现代化发展 [J]. *气象*, 36(7): 1-4. Jiao MY, 2010. Modernization Process of Weather Forecast [J]. *Meteor. Mon.*, 36(7): 1-4.
- 李泽椿, 毕宝贵, 朱彤, 等, 2004. 近30年中国天气预报业务进展 [J]. *气象*, 30 (12): 4-10. Li ZC, Bi BG, Zhu T, et al., 2004. Advance in operational weather forecast in China[J]. *Meteor. Mon.*, 30(12): 4-10.
- 李晓莉, 刘永柱, 2019. GRAPES 全球奇异向量方法改进及试验分析 [J]. *气象学报*, 77 (3) : 552-562. Li XL, Liu YZ, 2019. The improvement of GRAPES global extratropical singular vectors and experimental study. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(3): 552-562.
- 刘家峻, 张立凤, 关吉平, 等, 2010. 集合预报产品在台风麦莎预报中的应用 [J]. *气象*, 36 (5) : 21-31. Liu JJ, Zhang LF, Guan JP, et al., 2010. Application of ensemble prediction products to the forecast of typhoon masta [J]. *Meteor Mon*, 36 (5): 21-31
- 刘芸芸, 丁一汇, 2020. 2020年超强梅雨特征及其成因分析 [J]. *气象*, 46 (11) : 1393-1404. Liu YY, Ding YH, 2020. Characteristics and possible causes for the extreme Meiyu in 2020 [J]. *Meteor Mon*, 46 (11): 1393-1404.
- 刘雪晴, 陈静, 陈法敬, 等, 2020. 降水邻域集合概率方法尺度敏感性试验 [J]. *大气科学*, 44(2): 282-296. Liu XQ, Chen J, Chen FJ, et al., 2020. Scale Sensitivity Experiments of Precipitation Neighborhood Ensemble Probability Method [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 44(2): 282-296. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18228
- 刘永柱, 沈学顺, 李晓莉, 2013. 基于总能量模的GRAPES全球模式奇异向量扰动研究 [J]. *气象学报*, 71 (3) : 517-526. Liu YZ, Shen XS, Li XX, 2013. Research on the singular vector perturbation of the GRAPES global model based on the total energy norm. *Acta Meteorologica Sinica*, 71 (3): 517-526.
- 刘芸芸, 何金海, 梁建茵, 等, 2006. 亚澳季风区水汽输送季节转换特征 [J]. *热带气象学报*, 22 (2) : 138-146. Liu YY, He JH, Liang JY, et al., 2006. Features of moisture transport in seasonal transition over Asian-Australian monsoon regions [J]. *J. Trop. Meteor*, 22 (2): 138-146.
- 刘芸芸, 李维京, 艾婉秀, 等, 2012. 月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用 [J]. *应用气象学报*, 23 (4): 414-423. Liu YY, Li WJ, Ai WX, et al., 2012. Reconstruction and application of the Monthly Western Pacific Subtropical High indices [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2012, 23 (4): 414-423.
- 潘旸, 沈艳, 宇婧婧, 等, 2015. 基于贝叶斯融合方法的高分辨率地面-卫星-雷达三源降水融合试验 [J]. *气象学报*, (1) : 177-186. Pan Y, Shen Y, Yu JJ, et al., 2015. An experiment of high-resolution gauge-radar-satellite combined precipitation retrieval based on the Bayesian merging method [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, (1): 177-186.
- 彭飞, 李晓莉, 陈静等, 2019. GRAPES 全球集合预报系统模式扰动随机动能补偿方案初步探究 [J]. *气象学报*, 77 (2) : 180-195. Peng F, Li XL, Chen J, et al., 2019. A stochastic kinetic energy backscatter scheme for model perturbations in the GRAPES global ensemble prediction system [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 77 (2): 180-195.
- Theis S E, Hense A, Damrath U, 2005. Probabilistic precipitation forecasts from a deterministic model: a pragmatic approach [J]. *Meteorological Applications*, 12(3): 257-268.
- 陶诗言, 卫捷, 张小玲, 等, 2008. 2007年梅雨锋降水的大尺度特征分析 [J]. *气象*, 34 (4) : 3-15. Tao SY, Wei J, Zhang XL, 2008. Large-scale features of the Mei-yu front associated with heavy rainfall in 2007 [J]. *Meteor Mon*, 34(4): 3-15.
- 徐海明, 何金海, 周兵, 2001. 江淮入梅前后大气环流的演变特征和西太平洋副热带高压北跳西伸的可能机制[J]. *应用气象学报*, 12(2): 150—158. Xu HM, He JH, Zhou B, 2001. The features of atmospheric circulation during Meiyu onset and possible mechanisms for westward extension of pacific subtropical high [J]. *Journal of Applied meteorological Science*, 12(2): 150-158.
- 袁月, 李晓莉, 陈静, 等, 2016. GRAPES 区域集合预报系统模式不确定性的随机扰动技术研究 [J]. *气象*,

42 (10) : 1161-1175. Yuan Y, Li XL, Chen J, et al., 2016. Stochastic Parameterization Toward Model Uncertainty for the GRAPES Mesoscale Ensemble Prediction System [J]. *Meteorological Monthly*, 42 (10): 1161-1175.

张芳华, 陈涛, 张芳, 等, 2020. 2020年6-7月长江中下游地区梅汛期强降水的极端性特征 [J]. *气象*, 46(11): 1405-1414. Zhang FH, Chen T, Zhang F, et al., 2020. Extreme features of severe precipitation in Meiyu period over the middle and lower reaches of Yangtze River in June-July 2020 [J]. *Meteor Mon*, 46 (11): 1405-1414.

张庆云, 陶诗言, 陈烈庭, 2003. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流 [J]. *气象学报*, 61 (5): 559-568. Zhang QY, Tao SY, Chen LT, 2003. The Inter-Annual Variability of East Asian Summer Monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over east asia [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 61 (5): 559-568. doi: [10.11676/qxxb2003.056](https://doi.org/10.11676/qxxb2003.056)

郑国光, 矫梅燕, 丁一汇, 等, 2019. 中国气候 [M]. 北京: 气象出版社. Zheng GG, Jiao MY, Ding YH, et al., 2019. *Climate in China* [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).

大气科学学报 优先出版稿