

任志杰,陈静,田华. T213 全球集合预报系统物理过程随机扰动方法研究[J]. 气象,2011,37(9):1049-1059.

# T213 全球集合预报系统物理过程 随机扰动方法研究<sup>\* 1</sup>

任志杰<sup>1</sup> 陈 静<sup>2</sup> 田 华<sup>2</sup>

1 成都信息工程学院, 成都 610025

2 中国气象局数值预报中心, 北京 100081

**提 要:** 目前我国的 T213 全球集合预报系统采用 BGM 初值扰动方案, 没有考虑模式扰动方法, 在技术上滞后于国际先进数值中心的集合预报系统。本文参考 ECMWF 的模式扰动方法, 设计了我国 T213 全球集合预报系统的物理过程随机扰动方法, 并对 2008 年 7 月 20—31 日进行了集合预报批量试验。试验结果表明: T213 全球中期数值预报模式对物理过程随机扰动很敏感, 对物理过程扰动后, 模式物理量的预报情况发生变化, 且这种变化随着积分时间增长而迅速扩大。在水平方向上主要表现为南北半球中高纬度地区较赤道地区更敏感, 在垂直方向上, 表征大尺度运动特征的物理量(如位势高度、温度、风速等)在南北半球中高纬度地区的低层到高层都很敏感, 尤以 300 hPa 最为明显, 垂直速度、散度等物理量在赤道地区也非常敏感。多初值集合预报加入物理过程随机扰动后, 集合平均均方根误差在积分后期略有改善, 对降水预报水平也有较为明显的提高, 这表明物理过程随机扰动方法具有较好的业务应用前景。

**关键词:** T213, 集合预报, 物理过程随机扰动, 检验评估

## Research on T213 Ensemble Prediction System Stochastic Physics Perturbation

REN Zhijie<sup>1</sup> CHEN Jing<sup>2</sup> TIAN Hua<sup>2</sup>

1 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610025

2 Center of Numerical Weather Prediction of CMA, Beijing 100081

**Abstract:** The CMA T213 global ensemble prediction system using BGM initial perturbation scheme has not considered model perturbation thus lags behind the ensemble forecasting system of international advanced technical centers. This paper referring to the ECMWF model perturbation method, designs a T213 global ensemble prediction system stochastic physics perturbation method, and conducts ensemble prediction tests in 20—31 July 2008. The results show that, the T213 global ensemble prediction system is very sensitive to stochastic physics perturbation. This is because after physics perturbed, predictor variables change significantly, and the changes expand rapidly with the integration time of growth. In the horizontal direction, the middle and high latitudes are more sensitive than the equatorial regions. In the vertical direction, the variables characterizing the large-scale movements, such as geopotential height, temperature, and wind speed are very sensitive from low to upper levels, and the most sensitive is at 300 hPa, in the middle and high latitudes of north and south hemispheres; while vertical velocity, divergence and other physical variables in the equatorial region are also very sensitive. After the multiple initial condition ensemble added to the stochastic physics perturbations, the spread and RMSE of ensemble mean are

\* 国家科技支撑计划(项目编号:2009BAC51B00)资助

2011 年 1 月 12 日收稿; 2011 年 2 月 20 日收修定稿

第一作者: 任志杰, 主要从事集合预报研究. Email: renzj1025@163.com

improved slightly in the late term of integration, while the improvement of the precipitation forecast is significant, which indicates the prospect of operation to the stochastic physics perturbation is good. The next step will be more test assessments, and the operations of the stochastic physics perturbation are as early as possible to shorten the distance between China and the international advanced technology in the ensemble.

**Key words:** T213 model, ensemble prediction, stochastic physics perturbation, verification and evaluation

## 引 言

数值天气预报是当代大气科学技术进步的最伟大的成就之一,已成为当代天气预报最主要的科学途径,并在极端天气事件的预报方面显示了经验预报方法所不具备的独特优势<sup>[1]</sup>。然而数值预报所采用的模式初值、模式本身均有误差,加上大气是一个非线性系统,具有混沌特性,这使得数值预报具有不确定性,显著地影响着模式大气的可预报性<sup>[1-3]</sup>。如果数值预报只提供给用户单一的确定性预报,那么它是不完备的,需要将预报的不确定性定量地提供给用户,从单一值的确定性预报向多个预报值的概率预报转变,集合预报是实现这种转变的关键技术。1992年12月美国(NCEP)和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的中期集合预报系统先后投入业务应用,标志着数值天气预报进入了一个新纪元,随后,

其他国家如加拿大、英国、日本、澳大利亚等国的集合预报系统也相继投入业务应用。集合预报作为一个国家数值天气预报系统的重要组成部分,被WMO列为数值预报领域的四个发展方向之一,显示出强大的生命力,能够成功处理数值预报的不确定性问题<sup>[2]</sup>。

我国全球数值集合预报业务自1998年开始发展。1998年6月国家气象中心在国产神威巨型计算机上建立了基于T106L19全球模式的中期集合预报系统,2001年3月实现业务运行,2006年底建成了基于T213L31的全球集合预报系统。初值扰动方法采用增长模繁殖法(Breeding Vector),集合预报成员为14个,提供集合预报概率,集合平均和离散度的数据、图形、MICAPS格式等的集合预报产品。该系统的业务流程如图1所示,包括观测资料预处理系统、客观分析系统、多初值产生系统、模式预报系统、模式后处理系统和产品生成系统<sup>[4]</sup>。

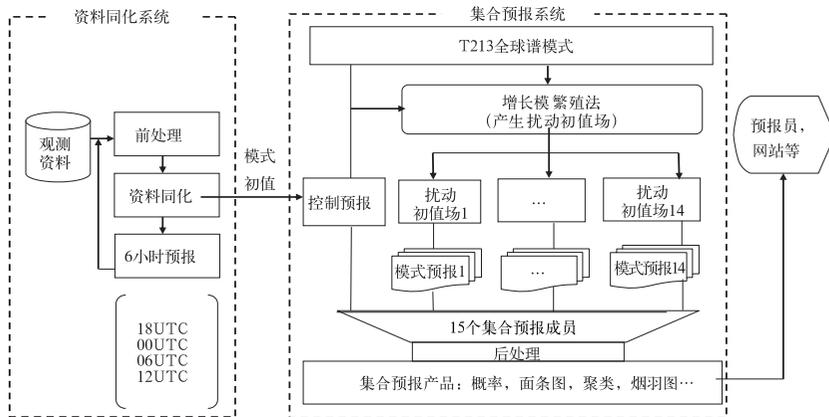


图 1 国家气象中心 T213L31 全球集合预报系统流程图

Fig. 1 The flow chart for NMC T213L31 global ensemble prediction system

目前,数值预报的不确定性不仅仅是由模式初值的不确定性造成的,模式本身的不确定性也是不容忽视的。目前关于集合预报初值扰动方法的研究比较多,集合预报的最新研究结果表明:同时采用初值扰动和模式扰动的集合预报方法能够更好地表现

数值预报的不确定性<sup>[5-6]</sup>。国外一些集合预报系统中都引入了模式扰动,使得集合预报的离散度增加了,同时,预报技巧也有所提高<sup>[7-8]</sup>。我国 T213 集合预报系统采用的是初值扰动方法,还未对模式进行扰动,构建的集合预报系统离散度偏小,也很难表

现模式误差所带来的预报不确定性<sup>[4]</sup>。国外的研究也表明仅采用初值扰动方法构建的集合预报系统普遍存在离散度偏小的问题<sup>[7-9]</sup>。实际上,天气预报系统对模式误差很敏感,尤其是次网格尺度物理过程参数化所带来的不确定性对系统的可预报性起着重要作用<sup>[10-11]</sup>。但是到目前为止,还没有一种理论意义完备且具有实践意义的公式能够将物理过程参数化的不确定性引入到集合预报系统中。目前国际上采用的模式扰动主要有三种方法:(1)在物理过程参数化方案中加入随机扰动项<sup>[7,12]</sup>; (2)使用不同的参数化方案进行随机组合来模拟参数化误差<sup>[9]</sup>; (3)采用多模式方法<sup>[13-14]</sup>。结果表明扰动模式物理过程可以增加集合预报成员之间的发散度,提高小尺度天

气事件的预报概率。对于全球集合预报系统,各大中心主要采用物理过程随机扰动方案。表 1 是国际上全球集合预报系统的技术特征现状。英国气象局对统一模式中的夹卷率系数、临界相对湿度、对流有效位能(CAPE)释放时间、临界弗罗德(Froude)数等进行随机扰动以构造集合预报成员<sup>[15]</sup>。ECMWF 则是在每一次积分时间步长后,在非绝热强迫项中加入随机增倍噪音,当所有参数化过程得到的强迫项的值都加上后,净强迫项值乘上 0.5~1.5 之间的一个随机数,以此反应模式次网格尺度物理过程参数化中存在的<sup>[7]</sup>。ECMWF 从 1998 年 10 月 21 日将该方案应用于业务运行。

表 1 全球主要数值预报中心集合预报系统的技术特点

Table 1 The characters of Ensemble Prediction System of National Numerical Weather Forecast Center

中心	模式系统	成员数	预报时效/天	初值扰动	模式扰动	预报循环
英国	MOGREPS <sup>(*1)</sup> 90 km, L38	24	15	集合卡尔曼滤波波 (ENKF)	Physics SKEB <sup>(*2)</sup> + Random Pert	00+12Z
日本	T319L60	51	9	奇异向量法 (SVs)	Stochastic physics, Backscatter scheme	12Z
ECMWF	T255L62(80 km) T399L62(50 km)	51	1~10 10~16	奇异向量法 (SVs)	SPBS <sup>(*3)</sup> + tend pert	00+12Z
中国	T213L31(50 km)	15	10	增长模繁殖法 (BGM)	无	00+12Z
美国(NCEP)	T190L28	21	16	集合转置(ET)	SPS <sup>(*4)</sup>	00+06+12+18Z
加拿大(CMC)	T190L28	21	16	集合卡尔曼滤波波 (ENKF)	MM, MP <sup>(*5)</sup>	18Z

注: \*1. MOGREPS(Met Office Global and Regional Ensemble Prediction System); \*2. SKEB(Stochastic Kinetic Energy Backscatter); \*3. SPBS(Spectral Backscatter Scheme); \*4. SPS(Stochastic Perturbation Scheme); \*5. MM(Multiple Model), MP(Multiple Physics)

目前我国 T213 全球集合预报系统只采用初值扰动方案,没有考虑模式扰动方法,在技术方法上滞后于国际主流的集合预报系统。本文针对这个问题,参考 ECMWF 的模式扰动方法,设计了我国 T213 全球中期集合预报系统的物理过程随机扰动方案,并进行集合预报试验,分析评估了 T213 模式对物理过程随机扰动的敏感性以及集合预报效果,为发展我国 T213 多初值多模式集合预报系统提供科学依据。

## 1 T213 模式扰动试验方案设计

### 1.1 T213 模式简介

国家气象中心 T213 全球中期数值预报模式是

从 ECMWF 引进的全球谱模式,经过移植改造和自行开发与其匹配的资料分析同化方案(SSl)、模式后处理方案、大规模并行机环境下的自动化运行流程及作业监控方案等,形成我国第四代全球中期数值天气预报系统<sup>[16]</sup>。T213 模式采用地形追随-等压面混合坐标,在垂直方向上有 31 层,模式层顶到达 10 hPa,水平分辨率为 60 km,空间格点数为 640×320,模式积分时间步长为 15 min。模式系统包含一整套比较先进的物理过程,包括长波辐射方案,短波辐射方案,对可分辨山脉的描述采用平均地形方法,次网格地形拖曳参数化方案,湍流扩散方案,云方案和陆面过程,采用质量通量方案描述了各种类型的对流<sup>[17]</sup>。模式还采用高效的计算方法,如半隐式-半拉格朗日方法、精简格点、分布并行算法等现代技术。T213 全球中期数值预报模式是我国

T213 集合预报系统的基础模式。

## 1.2 模式随机扰动方案设计

本文参照 ECMWF 的方法,重点研究在辐射传输、湍流混合、次网格尺度地形拖曳、湿对流、积云对流过程产生的综合非绝热强迫项中加入随机噪音,随机扰动方案包括随机数产生方法和物理过程随机扰动方案,详细介绍如下。

### 1.2.1 随机扰动数产生函数

为了获得在给定区间 $[a, b]$ 内均匀分布的一个随机整数,首先利用公式(1)产生 $[0, S]$ 内均匀分布的随机整数。

$$\begin{cases} R_i = \text{mod}(5R_{i-1}, 4M) \\ RND_i = \text{INT}(R_i/4) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $R_0 \geq 1$ 的奇数是初值(随机数种子), $S = b - a + 1$ ,  $M = 2^k$ ,  $k = [\log_2 S] + 1$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots$ 。

然后将每个随机数加 $a$ ,即实际需要的随机数为 $R_i = a + RND_i$ 。本次试验中 $a = -50$ ,  $b = 50$ 。 $R_0$ 是借助物理过程产生的综合温度趋向项得到随机种子数,然后将此随机整数利用式(2)获得 $0.5 \sim 1.5$ 区间内的随机数 $PERT_i$ 。

$$PERT_i = 1 + 0.01R_i \quad (2)$$

扰动值完全是随机确定的。当给定不同的初值 $R_0$ 后,所获得的随机整数序列不同,对同一格点,当随机数发生器的初值 $R_0$ 不同时,扰动误差型态也完全不同,以此可以获得由物理过程参数化方案产生的温度倾向项、比湿倾向项、风速倾向项的随机扰动值。

### 1.2.2 物理过程随机扰动方案

目前,我国的 T213 集合预报系统中每个成员可看做是从初始条件开始对模式方程进行数值积分计算。

$$e_j(t) = \int_{t=0}^t \{A(e_j, t) + P(e_j, t)\} dt \quad (3)$$

$$\frac{\partial e_j}{\partial t} = A(e_j, t) + P(e_j, t) \quad (4)$$

其中 $A$ 和 $P$ 分别表示大尺度和参数化过程,初始条件可表示为

$$\begin{aligned} e_j(t=0) &= e_0(t=0) + \delta e_j(t=0) \\ j &= 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $e_0(t=0)$ 表示在 $t=0$ 时的分析场。 $j=1$ 表示控制预报, $m=15$ 表示包括控制预报在内的共计 15 个集合预报成员,初始扰动 $\delta e_j(t=0)$ 是由增长模培育法产生的。

本文尝试在以上集合预报的基础上,通过对辐射传输、湍流混合、次网格尺度地形拖曳、湿对流、积云对流过程这些物理过程参数化方案计算结束后的综合温度倾向项、比湿倾向项、风速倾向项进行随机扰动来模拟物理过程产生的模式不确定性。每个集合预报成员可看做从初始条件式(5)开始的扰动模式方程的时间积分,如式(6)。

$$e_j(t) = \int_{t=0}^t \{A(e_j, t) + P'(e_j, t)\} dt \quad (6)$$

对于每一个格点 $x = (\lambda, \phi, \sigma)$ (纬度、经度和垂直混合坐标),扰动了的物理过程可表示为:

$$P'_j(e_j, t) \equiv PERT_i \times P_j(e_j, t) \quad (7)$$

### 1.2.3 物理过程随机扰动集合预报试验方案设计

为了分析评估 T213 全球中期数值预报模式对本文设计的物理过程随机扰动的敏感性以及该物理过程随机扰动方案对集合预报系统产生的影响,本文设计了以下两个试验方案(表 2)。

(1) 多初值扰动试验方案。采用目前业务增长模培育法产生的 7 对初值,构造集合预报试验 1。

(2) 多初值加上物理过程随机扰动方案。在第一个试验方案的基础上,利用前面介绍的物理过程随机扰动方案,对 T213 全球中期数值预报模式进行扰动,产生多初值+模式物理过程随机扰动的集合预报试验 2。

试验时段为 2008 年 7 月 20 日至 7 月 31 日,总计 12 天。积分开始时间为试验时段内每天的 12 时(UTC),每天积分 240 小时,共获得 12 天的集合预报结果,以下对试验结果进行详细分析。

## 2 T213 模式对物理过程随机扰动的敏感性

大气是多种天气系统相互作用的结果,物理过程随机扰动对各预报变量产生的影响特征是我们关心的问题。为研究 T213 模式对物理过程随机扰动的敏感性,选取 2008 年 7 月 20—31 日集合预报试验 1 中 Member0 和集合预报试验 2 中 Member0 (表 2)的 24~240 小时积分结果,定义某一积分时效(如 24 小时)两者的平均绝对离差 $S_{\text{var}}(x, y, z)$ ,以衡量物理过程随机扰动对预报变量的影响。

$$S_{\text{var}}(x, y, z) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n | \text{var}_1(x, y, z, t) - \text{var}_2(x, y, z, t) | \quad (8)$$

其中  $\text{var}_1(x, y, z, t)$  和  $\text{var}_2(x, y, z, t)$  分别为集合预报试验 1 中 Member0 和集合预报试验 2 中 Mem-

ber0 的预报变量,  $x, y, z, t$  分别为经向格点、纬向格点、垂直层次、积分日期,  $n=12$  为最大积分天数。

表 2 试验方案设计

Table 2 Test schemes

集合预报试验 1	初值	模式有无扰动	集合预报试验 2	初值	模式有无扰动
Member0	无扰动	×	Member0	无扰动	√
Member1	P1M1	×	Member1	P1M1	√
Member2	P1M2	×	Member2	P1M2	√
Member3	P2M1	×	Member3	P2M1	√
Member4	P2M2	×	Member4	P2M2	√
Member5	P3M1	×	Member5	P3M1	√
Member6	P3M2	×	Member6	P3M2	√
Member7	P4M1	×	Member7	P4M1	√
Member8	P4M2	×	Member8	P4M2	√
Member9	P5M1	×	Member9	P5M1	√
Member10	P5M2	×	Member10	P5M2	√
Member11	P6M1	×	Member11	P6M1	√
Member12	P6M2	×	Member12	P6M2	√
Member13	P7M1	×	Member13	P7M1	√
Member14	P7M2	×	Member14	P7M2	√

### 2.1 物理过程随机扰动对预报变量水平空间分布的影响

图 2 是 500 hPa 位势高度场 24 小时至 240 小时预报的 12 天平均绝对离差随积分时间的演变, 有如下特征:

(1) 500 hPa 位势高度场 12 天平均绝对离差随积分时间快速增长, 并且在中高纬度地区的平均绝对离差大于热带地区。24 小时预报的 500 hPa 位势高度场 12 天平均绝对离差在热带地区小于 1 gpm, 在北半球中高纬度地区小于 2 gpm, 在南半球中高纬度地区小于 5 gpm。至积分 240 小时, 500 hPa 位势高度场 12 天平均绝对离差在热带大部分地区小于 5 gpm, 在南北半球中高纬度地区大于 50 gpm, 在个别地区达到 90 gpm 以上。这表明: 由于大气具有非线性动力系统的的不稳定性, 对物理过程随机扰动是非常敏感的, 模式的微小变动, 就能对预报结构产生较大影响, 也说明对 T213 模式进行模式扰动是非常必要的, 可以反映由模式误差所带来的预报不确定性。

(2) 物理过程随机扰动对南半球 500 hPa 位势高度场的影响较北半球大。对于各个预报时效, 南半球的离差大小和范围总是大于北半球。造成这种现象可能有两点原因: 一是 T213 模式对南半球的

预报技巧较对北半球的预报技巧偏低; 二是由于南半球海洋面积较陆地面积大, 所以表现出比北半球更大的预报不确定性和对物理过程随机扰动的高敏感性。

(3) 积分后期, 在北半球, 物理过程随机扰动主要影响高纬度至极地区域, 对极地区域的影响最大; 在南半球, 主要影响中高纬度地区。至积分 192 小时, 500 hPa 位势高度场 12 天平均绝对离差在 30°S 以南地区大于 40 gpm, 在 60°S 附近出现 3 个大值中心, 中心值大于 90 gpm; 在 45°N 以北地区大于 30 gpm, 最大值位于 80°N 附近, 达到了 62 gpm。至积分 216 小时, 在 30°S 以南地区大于 45 gpm, 在 60°S 附近出现了多个达 90 gpm 以上的高值中心; 在 30°N 以北, 大于 45 gpm 的区域明显扩大, 在北极地区出现了 65 gpm 以上的高值中心。至积分 240 小时, 在 30°S 以南地区大于 50 gpm, 大于 90 gpm 的区域主要分布在 60°S 附近, 范围显著增大; 在北半球极地区域的最大值达到 90 gpm 以上。

另外, 我们对 250 hPa 风速、850 hPa 温度的 12 天平均绝对离差分布和随积分时间的演变也进行了分析(图略), 发现存在与 500 hPa 高度场类似的分布和演变特征, 不同的是分布状况较 500 hPa 位势高度场略均匀, 在此不再赘述。

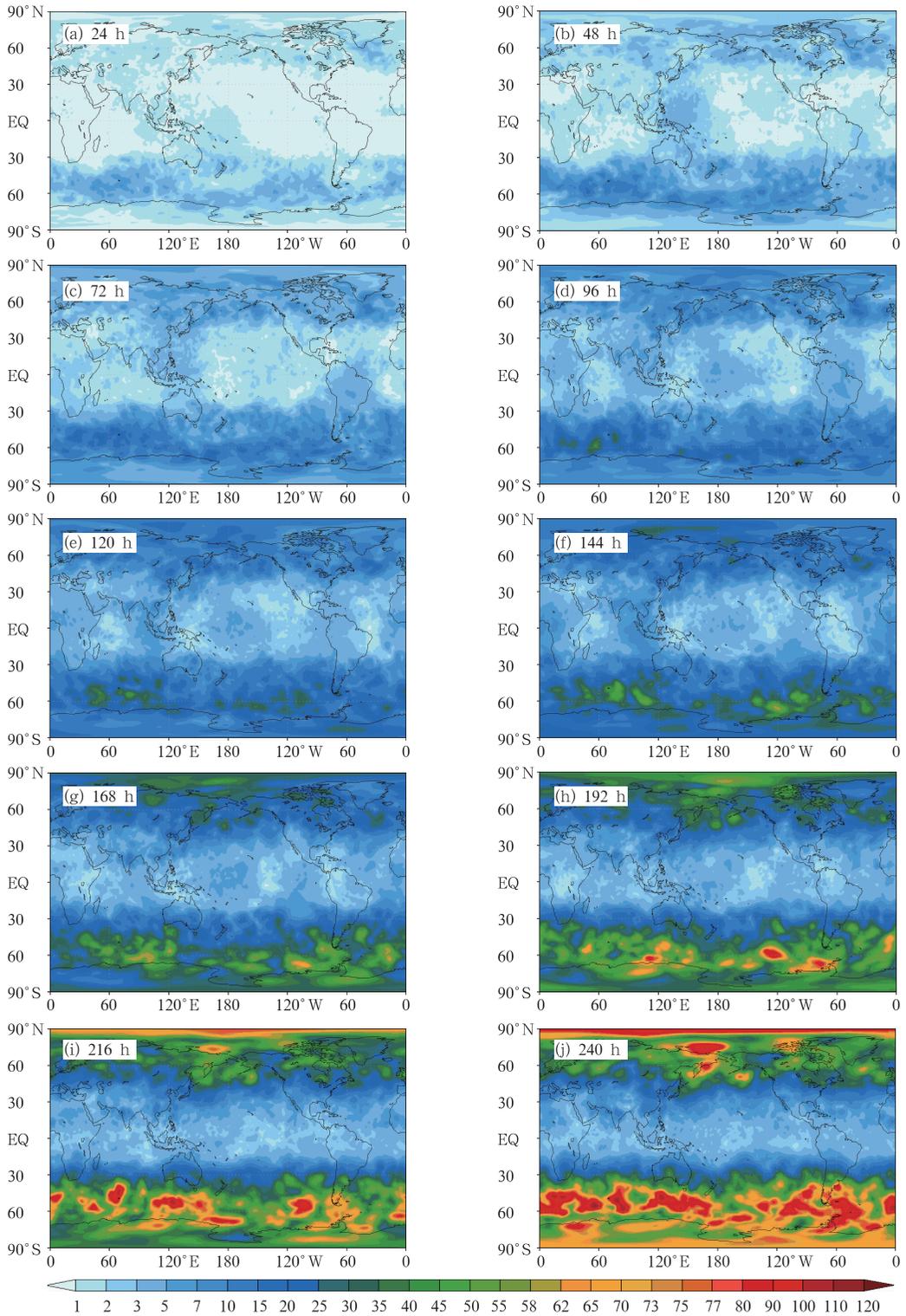


图 2 500 hPa 位势高度场 12 天平均绝对离差(单位:gpm)随积分时间的演变

Fig. 2 Mean absolute dispersion of 12 days in 500 hPa geopotential height field changing with the integration time

### 2.2 物理过程随机扰动对预报变量垂直分布的影响

图 3 是全球位势高度场 12 天平均绝对离差经

向平均剖面图随积分时间的演变,可以发现:

- (1) 随着积分时间增加,平均绝对离差迅速增大。在 24 小时预报场中,南半球 300 hPa 高度上存

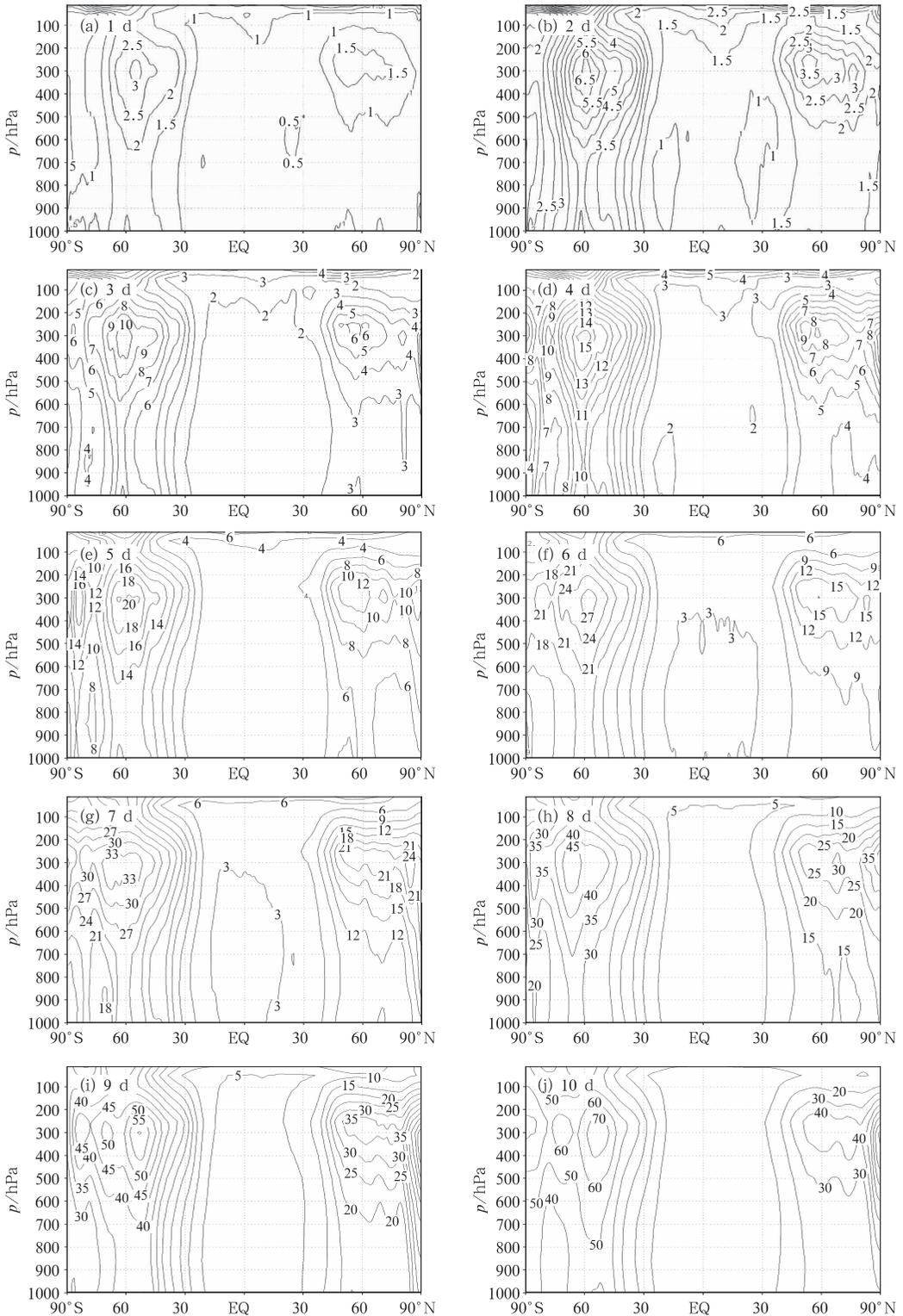


图 3 全球位势高度场 12 天平均绝对偏差(单位:gpm)经向平均剖面图随积分时间的演变

Fig. 3 The mean meridional profile map of mean absolute dispersion of 12 days of global geopotential height field (gpm) changing with the integration time

在一个 3 gpm 的大值中心;北半球的高值中心位于 60°N 附近的 300 hPa 高度上,中心值为 1.5 gpm;在

240 小时预报场中,从南极到 50°S 附近的 300 hPa 高度上出现三个并列的高值中心,三个中心的强度

分别为 70、60 和 70 gpm;北半球的高值中心位于极地区,强度为 80 gpm 左右。

(2) 各层次上的扰动结构具有较高的一致性。对于各预报时次,离差的分布结构很相似,主要表现

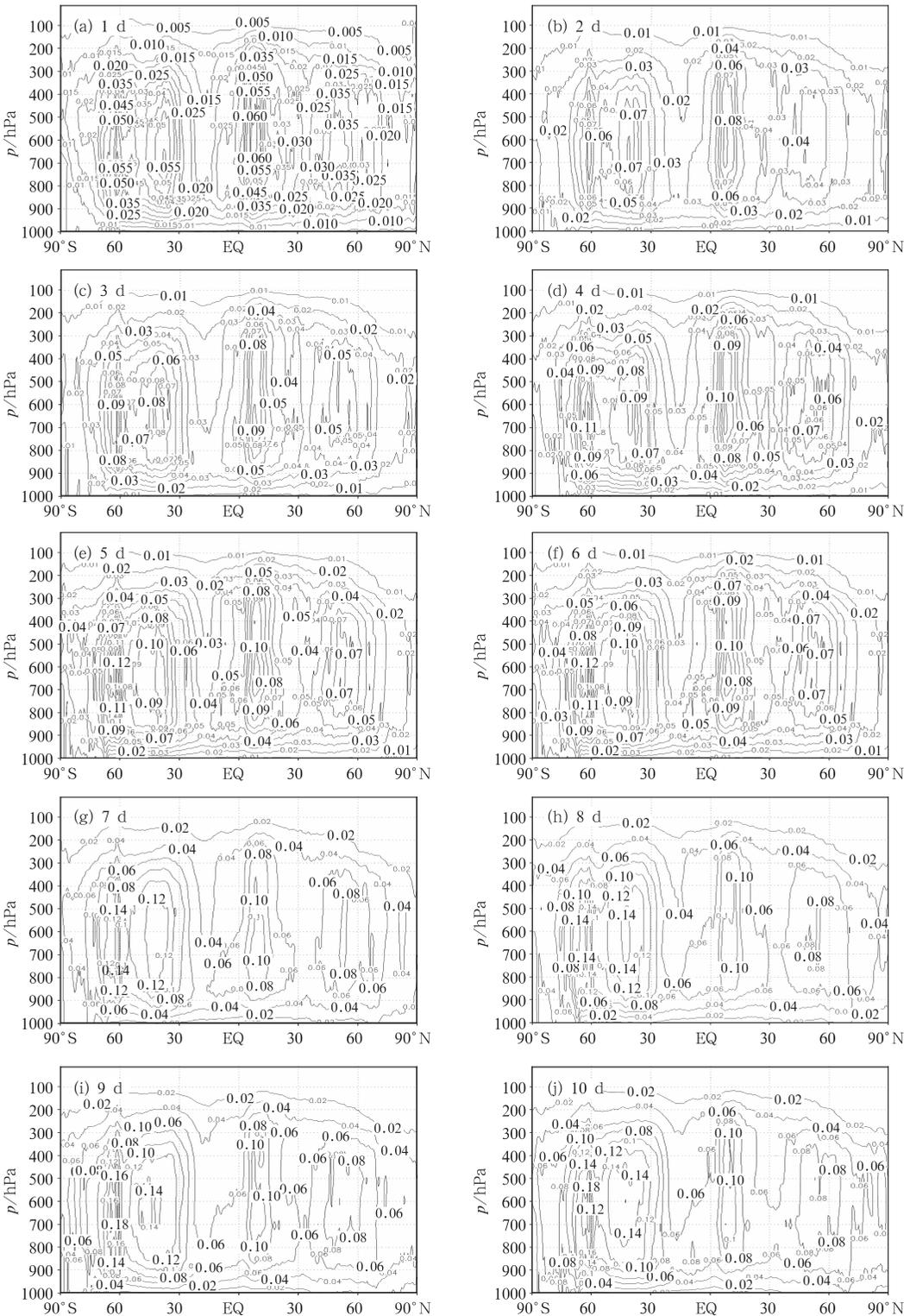


图 4 全球垂直速度场的 12 天平均绝对离差(单位:  $m \cdot s^{-1}$ ) 经向平均剖面图积分时间的演变

Fig. 4 The mean meridional profile map of mean absolute dispersion of 12 days of global vertical velocity ( $m \cdot s^{-1}$ ) changing with the integration time

为从低层到高层,在南北半球中高纬地区为大值区,在赤道地区为小值区。

(3) 从低层到高层,在赤道地区,离差随积分时间增长缓慢;在南北半球中高纬度地区增长速度较快。对于赤道地区的 24 小时预报场,整层的离差值小于 1.5 gpm,之后缓慢增长,至积分 120 小时,整层的离差值小于 6 gpm,此后增长并不明显,几乎达到饱和状态。从积分 24 小时至 240 小时,南半球的最大离差值从 2.5 gpm 增长到 70 gpm,高值中心位置变化不大,位于 60°S 附近的 300 hPa 高度上;北半球的最大离差值从 1.5 gpm 增长到 80 gpm,高值中心位置从 60°N 附近逐渐移到 90°N 附近。

(4) 南北半球中高纬度地区的最大离差值从低层向高层逐渐增加,至 300 hPa 达到最大,在 300 hPa 以上变小。

由此可以看出,进行物理过程随机扰动后,随积分时间增加,位势高度场离差在热带地区容易达到饱和,在南北半球中高纬度地区增长较快。其中,南半球(60°S, 300 hPa)和北半球(60°~90°N, 300 hPa)地区对物理过程随机扰动最敏感。

对绝对涡度、经向风速、纬向风速和温度进行了类似分析(图略),发现 12 天平均绝对离差经向平均剖面图与位势高度场的分布特征相似,这里不再赘述。

图 4 是全球垂直速度场的 12 天平均绝对离差经向平均剖面图随积分时间的演变。与图 3 相比,最大的差别就是在赤道地区,从积分 24 小时至 240 小时,存在从低层到高层的大值中心。散度、相对湿度与垂直速度的分布特征相似(图略)。由此可见,与上升运动有关的物理量(如垂直速度、散度等)在赤道地区对物理过程随机扰动很敏感;表征大尺度运动特征的物理量(如位势高度、温度等)在赤道地区对物理过程随机扰动不是很敏感,而在南北半球中高纬度地区对物理过程随机扰动很敏感。

从上述分析可以看出,物理过程随机扰动对预报效果产生了影响,随着积分时间的增加,各预报变量平均绝对离差均迅速增大,表明大气是不稳定动力系统,不仅对初值误差敏感,对模式误差也非常敏感,说明发展 T213 集合预报模式扰动是非常必要的。

### 3 T213 集合预报效果检验与分析

前面讨论了 T213 全球中期数值预报模式对物

理过程随机扰动的敏感性,下面将对表 2 构造的两个集合预报试验的预报效果进行检验评估,以深入地分析物理过程随机扰动对集合预报的影响。

#### 3.1 形势场检验

集合离散度表征集合预报成员与集合平均的总体偏离程度,也就是集合预报成员之间的发散程度。离散度值小,表示可信度高,同时也说明出现未来实况不在集合预报成员预报范畴内的可能性更高,这也是目前世界上集合预报普遍存在的问题;离散度值大,可信度就会偏低。因此,集合离散度要保持在合适的范围内<sup>[2]</sup>。由此,我们计算了 850 hPa 温度的集合预报离散度、均方根误差。

图 5 是 2008 年 7 月 20 日至 7 月 31 日集合预报试验 1 和集合预报试验 2 的 850 hPa 温度离散度、集合平均的均方根误差的 12 天平均值的时间演变图。由图可见,集合预报试验 1 与集合预报试验 2 的离散度差别不大。积分 48 至 144 小时,集合预报试验 2 的均方根误差大于集合预报试验 1,从积分 168 小时开始,集合预报试验 2 的均方根误差开始小于集合预报试验 1 的。这说明加入物理过程随机扰动后,积分后期的均方根误差得到改善。500 hPa 位势高度、250 hPa 风速也有类似的分布特征(图略),这里不再赘述。

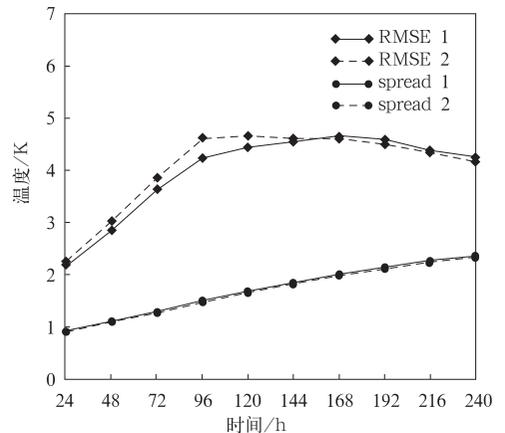


图 5 集合预报试验 1 和集合预报试验 2 的 850 hPa 温度离散度、集合平均的均方根误差的 12 天平均随积分时间的演变图

Fig. 5 The mean spread and RMSE of 850 hPa temperature of 12 days in Test 1 and Test 2 changing with the intergration time

### 3.2 典型个例降水预报检验

以 2008 年 7 月 20 日的暴雨过程为试验个例,对集合预报试验 1 和集合预报试验 2 的降水预报结果进行了对比分析。图 6 是 7 月 23 日 20 时 24 小时累计降水量(实况图),可以看出:主降水带位于山东、江苏、河南南部、安徽北部地区,最大降水中心位于山东和江苏两省交界处,最大降水量在 100 mm 以上。

图 7a 和 7b 分别是集合预报试验 1 和试验 2 的 72 小时降水量集合预报平均。由图可以看出:两者之间存在细微的差别,例如从湖南地区的降水范围来看,集合预报试验 2 的降水范围更加接近实况,而集合预报试验 1 在湖南北部地区出现漏报。由图 8 集合平均中雨的 TS 评分来看,集合预报试验 2 的 TS 值在 24、96、216 小时接近或略低于集合预

报试验 1,在其他预报时刻都明显高于集合预报试验 1。

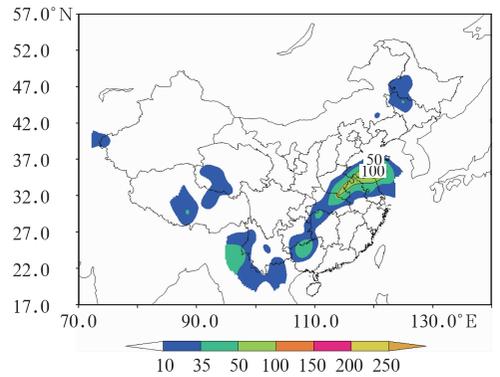


图 6 2008 年 7 月 23 日 20 时 24 小时累计降水量(实况图)

Fig. 6 The observed national map of 24 h precipitation at 20:00 BT 23 July 2008

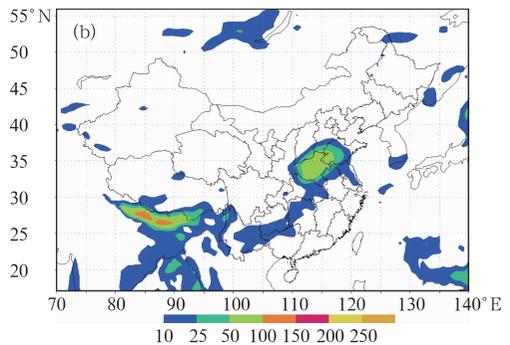
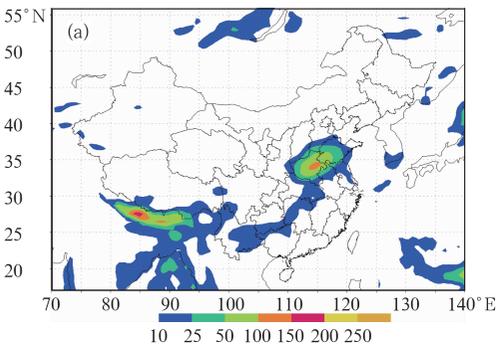


图 7 (a) 试验 1 的 72 小时降水量集合平均预报, (b) 试验 2 的 72 小时降水量集合平均预报

Fig. 7 The 72 h precipitation forecast of ensemble mean in Test 1 (a) and Test 2 (b)

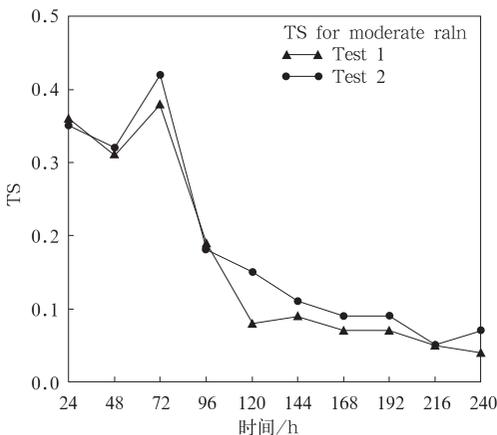


图 8 集合预报试验 1 和集合预报试验 2 集合平均的中雨 TS 评分

Fig. 8 The TS scores for moderate rain of ensemble mean in Test 1 and Test 2

## 4 小结和讨论

本文尝试设计 T213 模式物理过程随机扰动方法,分析模式扰动对 T213 集合预报的影响,得到以下结论:

(1) 模式物理过程随机扰动方案是在每一次积分时间步长后,通过在辐射传输、湍流混合、次网格尺度地形拖曳、湿对流、积云对流这些物理过程计算结束后的综合温度倾向项、比湿倾向项、风速倾向项乘上 0.5~1.5 区间内均匀分布的随机数,进行随机扰动来模拟物理过程参数化产生的模式不确定性。

(2) T213 全球中期数值预报模式对物理过程随机扰动非常敏感,加入物理过程随机扰动后,各物理量的预报情况发生了明显改变,并且这种变化随

积分时间增长而迅速扩大。在水平方向上主要表现为中高纬度地区较赤道地区更敏感;在垂直方向上,表征大尺度运动特征的物理量(如位势高度、温度、风速等)在南北半球中高纬度地区的低层到高层都很敏感,尤以 300 hPa 最为明显,垂直速度、散度等物理量除了在以上地区敏感外,在赤道地区的底层到高层也非常敏感。

(3) 在多初值集合预报中加入物理过程随机扰动后,对 850 hPa 温度、500 hPa 位势高度、250 hPa 风速的离散度没有明显影响,对集合平均均方根误差在积分后期略有改善,对降水预报水平有较为明显的提高,表明模式物理过程随机扰动具有较好的业务应用前景。

本文所做的研究工作仅是初步的,在以后的研究中,对随机扰动参数的选取、集合预报效果的评估等,均需进行更多的试验和评估,以便尽早在我国业务集合预报中加入模式物理过程随机扰动方案,提高集合预报系统的预报技巧,缩短我国与国际先进数值中心在集合预报技术方面的差距。

## 参考文献

- [1] 矫梅燕. 天气业务的现代化发展[J]. 气象, 2010, 36(7): 1-4.
- [2] 陈静, 陈德辉, 颜宏. 集合数值预报发展与研究进展[J]. 应用气象学报, 2002, 13(4): 497-506.
- [3] 杜钧, 陈静. 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, 2010, 36(11): 1-11.
- [4] 田华, 邓国, 胡江凯. 全球 T213 数值集合预报业务系统简介[C]. 2007 年中国气象学会年会, 2007.
- [5] David J Stensrud, Bao Jian-Wen. Using initial condition and model physics perturbations in short-range[J]. Mon Wea Rev, 2000, 128: 2077-2107.
- [6] João Teixeira, Carolyn A Reynolds. Stochastic nature of physical parameterizations in ensemble prediction a stochastic[J]. Mon Wea Rev, 2008, 136: 483-496.
- [7] Buizza R, Miller M, Palmer T N. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1999b, 125, 2887-2908.
- [8] Alberto Arribas. Results of an initial stochastic physics scheme for the Met Office Unified Model[R]. Ex-eter: Forecasting Research Technical Report No. 452, 2004.
- [9] Houtekamer P L, Lefaiivre L, Derome J. A System simulation approach to ensemble prediction[J]. Mon Wea Rev, 1996, 124: 1225-1242.
- [10] 谭燕, 陈德辉. 河南“75.8”大暴雨的中尺度集合预报试验[J]. 气象, 2008, 34(9): 11-20.
- [11] 陈静, 薛纪善, 颜宏. 物理过程参数化方案对中尺度暴雨数值模拟影响的研究[J]. 气象学报, 2003, 61(2): 203-218.
- [12] Berner J, Shutts G J, Leutbecher M, et al. A spectral stochastic kinetic energy backscatter scheme and its impact on flow-dependent predictability in the ECMWF ensemble prediction system[J]. J Atmos Sci, 2009, 66(3): 603-626.
- [13] Harrison M S. Analysis and model dependencies in medium-range forecast: two transplant case studies[J]. Q J R Meteorol Soc, 1999, 125: 2487-2515.
- [14] 严明良, 缪启龙, 沈树勤. 基于超级集合思想的数值预报产品变权集成方法探讨[J]. 气象, 2009, 35(6): 19-25.
- [15] Vannitsem S, Toth Z. Short-term dynamics of model errors[J]. Atmos Sci, 2002, 59: 2594-2604.
- [16] 胡江凯. 国家气象中心 T213L31 数值预报运行监控方案及预报效果评估[J]. 应用气象学报, 2005, 16(2): 249-259.
- [17] 陈起英, 姚明明, 王雨. 国家气象中心新一代业务中期预报模式 T213L31 的主要特点[J]. 气象, 2004, 30(10): 16-21.