

## HUBEX 区域资料同化系统\*

朱宗申 马清云 郝 民 郭肖容  
陶士伟 刘致远 王建捷 胡 铭

(国家气象中心,北京 100081)

### 提 要

介绍 HUBEX 区域资料同化系统。这个系统采用 6 h 周期的间歇资料同化方法,利用全球粗网格分析场资料,形成冷启动的初估场和同化模式的边界条件。系统还包括资料质量控制、 $\sigma$  面最优插值客观分析、张弛逼近(Nudging)初值化、中尺度同化模式预报和后处理等部分,对来自全球通讯系统、HUBEX 加密观测的资料和国家卫星气象中心的导风资料进行同化。最后,用 1998 年 6 月 24~28 日长江流域的暴雨过程对这个资料同化系统进行测试。

关键词: HUBEX 加密观测 资料同化系统 个例测试

### 引 言

“全球能量与水分循环试验—淮河流域试验和研究(GEWEX/HUBEX)”项目在 1998 年 6 月 11 日至 7 月 23 日共 42 天的加密观测期(IOP)中进行了观测试验,获得许多有价值的资料。由于观测资料并不完善,它们的时、空分布又极不均匀,仅利用单一时刻的资料往往很难得到该时刻高分辨率较真实的三维大气要素场。普遍认为,使用过去多时刻的观测资料,通过数值模式计算,与当前的观测资料结合,有可能得到规则的、动力学上协调的、能够较好描述大气真实状况的四维气象要素场,这就是所谓的资料四维同化<sup>[1]</sup>。国家气象中心(NMC)开发了 HUBEX 区域资料同化系统,它可以利用包括 HUBEX 时、空加密观测在内的多种资料,为 HUBEX 诊断分析和数值模拟研究提供高分辨率规则分布的气象要素场。

### 1 基本方案

HUBEX 区域资料同化系统的区域中心位于  $34^{\circ}\text{N}, 116^{\circ}\text{E}$ , 采用兰勃托地图投影,水平分辨率为 30 km,共  $81 \times 81$  个格点,区域完全覆盖了 HUBEX 的  $\alpha$  尺度试验区范围( $28^{\circ} \sim 40^{\circ}\text{N}, 110^{\circ} \sim 122^{\circ}\text{E}$ ),垂直分辨率为 23 层。图 1 给出 HUBEX 区域资料同化系统的水平网格分布。

\* 本研究得到国家自然科学基金 49794034 的资助。

2000-06-13 收到,2001-03-13 收到修改稿。

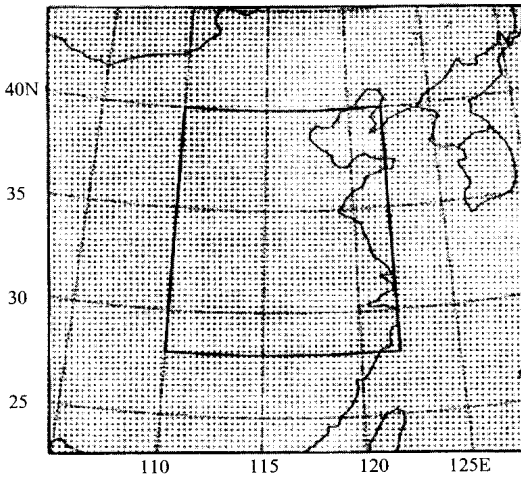


图 1 HUBEX 区域资料同化系统水平网格分布  
(中间区域为  $\alpha$  尺度试验区)

这个同化系统使用来自全球通讯系统(GTS)的观测资料,国家卫星气象中心(NSMC)反演的红外云导风、水汽风资料,以及 HUBEX IOP 的加密观测资料(表 1)。其中,可以增补用于这个资料同化系统的 IOP HUBEX 加密观测,

表 1 HUBEX 资料同化系统使用的资料

种类	来源	内容
TEMP	GTS、HUBEX	高度 温度 湿度 风
PILOT	GTS、HUBEX	风
SYNOP	GTS、HUBEX	气压 温度 湿度 风
SHIP	GTS	气压 温度 湿度 风
SATOB	GTS、NSMC	风
SATEM	GTS	高度 温度
AIREP	GTS	风

包括每天由 2 次增至 4 次的 21 个探空站和由 4~7 次增至 7~8 次的 11 个地面天气站的时间加密资料,以及通常无法获取使用的 13 个地面气候站的空间加密资料。

HUBEX 区域资料同化系统采用 6 h 周期的间歇资料同化方法,图 2 给出系统的流程框图。系统包括初估场和边界条件形成、资料质量控制、客观分析、初值化、同化模式预报以及后处理等几个主要部分。下面对 HUBEX 区域资料同化系统的组成部分作简略叙述。

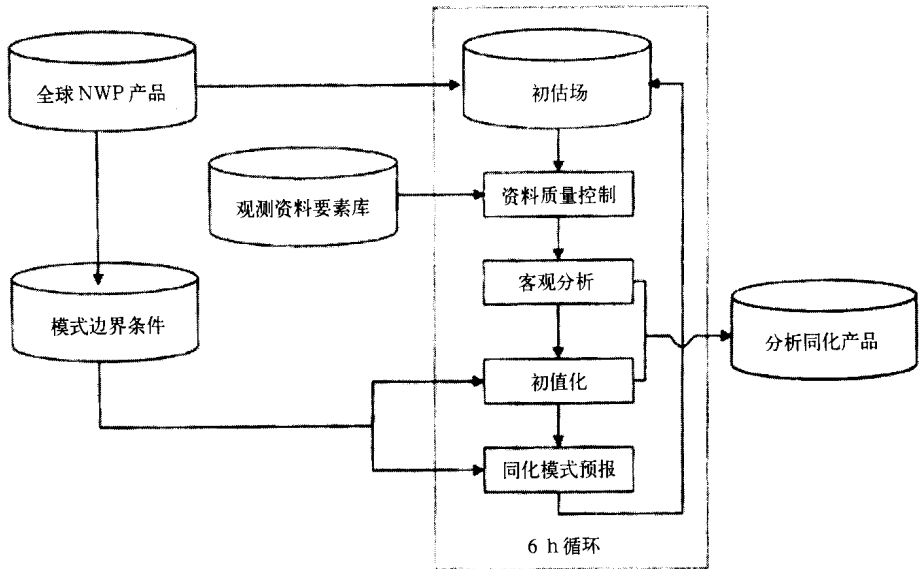


图 2 HUBEX 区域资料同化系统流程框图

## 2 资料同化系统主要技术环节

### 2.1 初估场和边界条件形成

利用全球粗网格标准等压面和等经纬度的高度、纬向风速、经向风速和相对湿度分析场,通过插值计算得到同化系统冷启动时的初估场,以及 HUBEX 区域同化系统初值化和同化模式预报时所需要的边界条件。冷启动后同化循环的初估场,由同化模式自身 6 h 预报产生。

### 2.2 资料质量控制

首先对资料进行预处理,提取同化过程每分析时刻(00:00、06:00、12:00、18:00 UTC)前后 3 h 的观测资料,对它们规格化;然后进行质量控制<sup>[2]</sup>。

质量控制中,首先对观测资料进行气候值检查和垂直一致性检查。后者包括  $\ln p$  线性内插检查,温度垂直递减率检查,静力学检查,风的垂直切变检查等;然后进行观测余差(观测值与初估值的差)的极值检查和水平一致性检查。

经过上述资料的质量控制检查,订正、删除错误资料。通过检查的资料,可以用于下面的客观分析。

### 2.3 客观分析

采用与 NMC 有限区同化预报系统(HLAFS)的客观分析方案<sup>[3]</sup>类似的  $\sigma$  面最优插值增量分析方法。使用的分析方程为:

$$\frac{A_k^a - A_k^o}{E_k^o} = \sum_{n=1}^N W_{kn} \frac{A_n^o - A_n^o}{E_n^o}$$

式中,  $A$  表示任一分析标量温度、高度、纬向风速、经向风速和相对湿度,  $W$  是观测的分析权重,  $E$  是变量的估值均方根误差,上标  $a$ 、 $g$ 、 $o$  分别表示分析值、初估值和观测值,下标  $k$  和  $n$  表示分析格点和观测点,  $N$  是选取用于该格点分析的观测数。

使最优插值的统计分析误差最小,得到求解分析方程观测权重的线性方程组。在已知观测误差和初估值误差的相关和估值均方根误差后,即可求得观测权重,并由此计算得到分析变量值。

温度、高度、纬向风速、经向风速为三维多变量分析,相对湿度为三维单变量分析。其中,  $\sigma$  面坐标系最低层的高度分析增量还用于计算地面场面气压的分析增量,以求得场面气压分析场。

### 2.4 初值化

用最优插值方法对温度、高度、纬向风速、经向风速和湿度场的分析是分别进行的,与同化模式没有直接联系,因此分析得到的质量、风以及湿度场在动力学和热力学上往往不协调,常常产生明显的 spin-up 现象。为了抑制由于分析初值动力学不平衡造成的同化模式积分初期出现的不合理高频振荡,采用张弛逼近(Nudging)初值化方案,通过数值模式积分调整这种不协调。虽然 Nudging 方法可能花费更多的计算时间,但这种方法被认为是中尺度数值预报中一种较好的同化初值化方法<sup>[4]</sup>,并可能利用更多的时间加密观测资料。

使用每次同化初始时刻前 6 h 的模式初值进行 Nudging 模式积分,让模式计算值向客观分析目标场逼近,模式最终结果将作为初始时刻同化模式的初值。下式为 Nudging 方案中的模式方程:

$$\frac{\partial X_f^{n+1}}{\partial t} = A + a^n(X) \times (X_o^n - X_f^n)$$

它与同化模式方程基本相同,仅在右侧最后增加一项订正项。式中  $X$  为模式变量;  $A$  表示平流项和物理过程;  $a$  为订正系数,与变量类型和时间步有关;上标  $n$  为时间步,下标  $o$  表示实况(由前后两个时次的分析场插值得到)、 $f$  表示模式预报。

## 2.5 同化模式预报

利用 PSU / NCAR 开发的中尺度模式(MM5)<sup>[5]</sup>作为系统的同化模式。其主要物理过程包括简单冰相的显式水汽方案、Kain-Fritsch 积云对流参数化方案、Blackadar 高分辨率 BPL 方案、Dudhia 云辐射方案等,采用平滑真实地形。模式与由粗网格分析场形成的边界条件进行三维单向嵌套。由于观测资料在大气高层,特别是 50 hPa 以上很少,与初估场和侧边界的值往往有较大偏差,常常导致高层分析和模式预报频繁出现虚假的小系统。因此,在模式最高 6 层  $\sigma$  面,对质量场进行与 Davies 方法<sup>[6]</sup>侧边界处理类似的垂直层嵌套处理,较好克服模式顶的紊乱现象,保障了资料同化过程的顺利进行。

这个模式同时用作 Nudging 初值化模式的基本版本。

## 2.6 后处理

对同化系统的分析、同化计算结果进行加工处理,形成 1998 年 6 月 11 日~7 月 23 日每 6 h 间隔 0.25° 等经纬度网格的 24 层等压面高度、温度、经向风速、纬向风速和相对湿度场,以及海平面气压场资料。

## 3 对比分析试验

1998 年汛期,长江流域暴雨频繁发生,出现严重的洪涝灾害, HUBEX IOP 正处于这时段的前半期。选取 1998 年 6 月 24~28 日的强暴雨过程,对 HUBEX 区域资料同化系统的性能进行测试。

### 3.1 天气过程

6 月 24 日,长江中游地区出现暴雨。其后,长江流域对流层低层的暖切变向东伸展,从长江下游到贵州一带形成一条东北—西南走向的梅雨锋和相应的强降雨带。由于有弱冷空气从中纬度不断南下,梅雨锋和雨带持续和加强。27 日后,随西太平洋副热带高压的加强北抬,我国境内的梅雨锋和雨带减弱并东移出海。

### 3.2 试验方案

设计了如下不同初值形成方法的试验方案:

(1) 利用 HUBEX 系统,从 6 月 24 日 00:00 UTC 至 28 日 00:00 UTC 进行 4 天的资料同化,得到每 6 h 间隔的分析同化初值场和同化预报的要素场(方案 A);

(2) 利用粗网格全球分析资料作为初估场,直接进行 25 日和 26 日 00:00 UTC 同化区域细网格客观分析,得到模式的初值场(方案 B);

(3) 利用粗网格全球分析资料,插值生成 25 日和 26 日 00:00 UTC 同化区域细网格的模式初值场(方案 C)。

此外,为了讨论同化系统中加密观测的作用,采用方案 A 的方法,使用不包括 NSMC 导风和 IOP 加密探空、地面观测的资料进行资料同化计算(方案 D)。

上述方案生成的 25 日和 26 日 00:00 UTC 初值,分别制作 24 h 和 36 h 的短期预报,对结果进行对比分析,并与观测比较。

### 3.3 试验结果分析

资料同化系统主要用于提供协调、真实和规则分布的分析场和初值场。但是,很难找到较好的直接检验和评估的方法。目前较多地是通过预报效果检验,间接地对其质量进行评价。降水是各种气象要素综合影响的结果,它可以从一个侧面反映大气动力和热力的综合状态;同时,它也是一个重要的预报气象要素。因此,下面着重通过降水进行分析。

#### (1) 同化初值真实性

同化系统中同化模式的 6 h 预报是为下一次同化循环提供初估场,它的好坏直接影响下一次分析的效果。虽然 6 h 同化模式预报的降水并不用来作为初估场,但它的真实性在某种程度上反映了初值所描述的大气动力、热力场的质量。计算显示,各个同化循环的 6 h 模式预报与相应的降水观测实况相比,非常吻合(如图 3a、b)。图 4b 给出 25 日 00:00 UTC~26 日 00:00 UTC 4 次 6 h 同化预报降水量的总和,与观测实况(图 4a)比较也可以发现,不论雨带走向还是暴雨的落区,两者都十分接近。从同化系统的 6 h 降水预报可以间接反映 HUBEX 区域同化系统提供的初值场的真实性。

#### (2) 同化初值协调性

中尺度模式预报中存在的一个重要问题是模式积分初期几个小时内降水往往偏小,这和初值不协调导致与降水联系的中尺度环流发展过于缓慢有关,亦即所谓的  $\text{spin-up}$  现象。图 3b、c、d 是上述三种初值形成方案 A、B、C 前 6 h 的降水预报。可以清楚看到,方案 B 和 C 都只给出非常弱和零散的降水,与实况观测(图 3a)相比,有着很大的偏差;而同化初值方案 A 的预报,与观测非常的接近。

图 5 给出产生强暴雨地点(29.2°N, 115.5°E)地面气压倾向  $\frac{\partial P_s}{\partial t}$  的时间演变,同化初值方案 A 较方案 B、C 更有效地抑制了高频振荡。

由此可见,HUBEX 区域资料同化系统明显改善  $\text{spin-up}$  现象,提供了较协调的模式初值场。

#### (3) 同化初值预报效果

由上述 A、B、C 方案形成的初值制作短期降水预报可以发现,同化初值方案明显优于其它两种方案。图 4a、d、e、f 给出 25 日试验个例的降水观测实况和 24 h 预报计算结果。三种方案虽然都预报了东北—西南走向的雨带,但由粗网格分析插值形成的初值(方案 C)的预报,基本不能报出长江中下游地区的暴雨区;未经同化的细网格分析初值(方案 B)的预报,在强度上较实况明显偏弱;由同化系统形成的初值(方案 A)的降水预报,效果则有显著的改进,较好报出了这条雨带中的暴雨区,只是最强的暴雨中心偏西了 2 个经度。

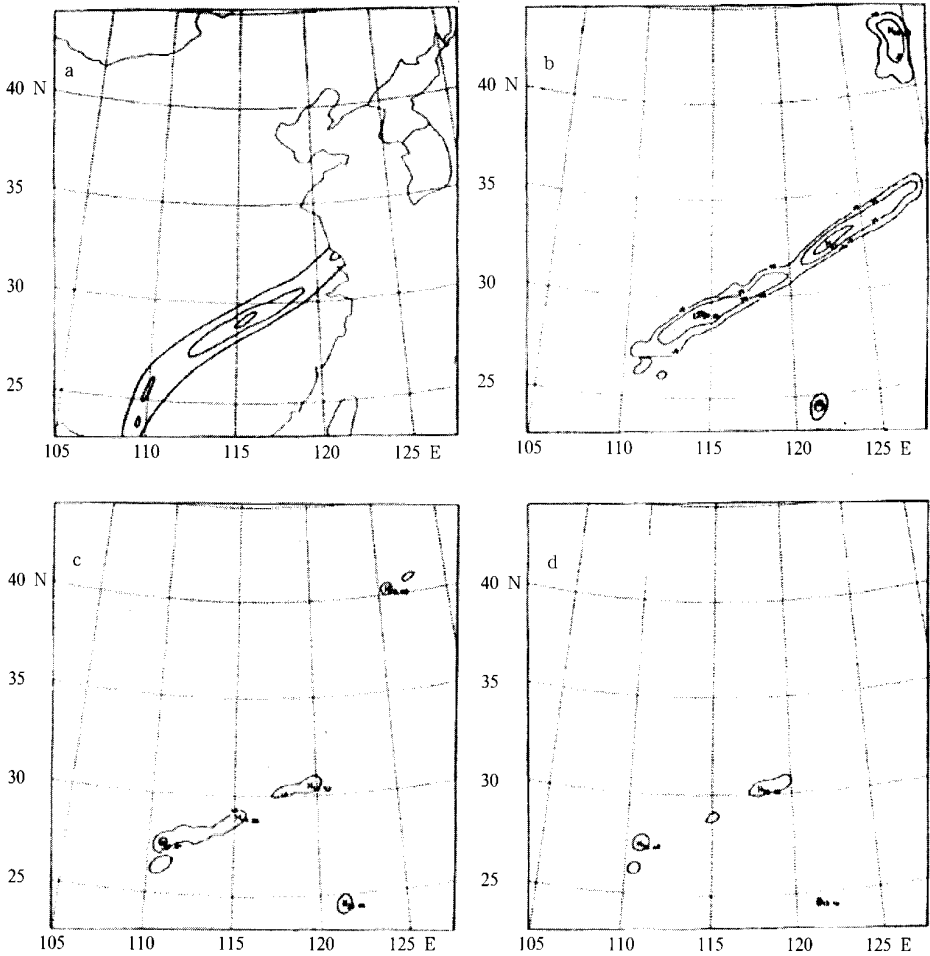


图3 1998年6月26日00:00~06:00 UTC降雨量(间隔:10,25,50 mm)

(a) 观测, (b) 方案A 6 h 预报, (c) 方案B 6 h 预报, (d) 方案C 6 h 预报

#### (4) HUBEX 加密观测在资料同化中的作用

利用 HUBEX 资料同化系统,进行了两组资料的数据同化和短期预报试验:方案 A 包括了 IOP 加密探空观测、地面观测和 NSMC 导风资料;方案 D 不包括上述加密资料。试验结果对比显示,方案 A 的 6 h 同化预报给出更多的中尺度结构特征,与实况更接近,由 25 日 00:00 UTC~26 日 00:00 UTC 4 次同化预报降水量的总和也可看出这个特点(见图 4a、b 和 c);用两种方案形成的同化初值所制作的 24~36 h 降水预报也可得到同样的结论(图略)。但是,两者总的差异并不十分显著,都给出与实况比较相近的结果。

使用中国异常台风科学试验(CATEX)观测资料进行的数值试验曾显示,在较高分辨率(水平  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  经纬度)的数值预报系统中,加密观测对中尺度雨带的预报有较明显的改进贡献<sup>[7]</sup>。

分析比较 HUBEX 和 CATEX 两次观测试验的观测资料状况发现,CATEX 试验中可

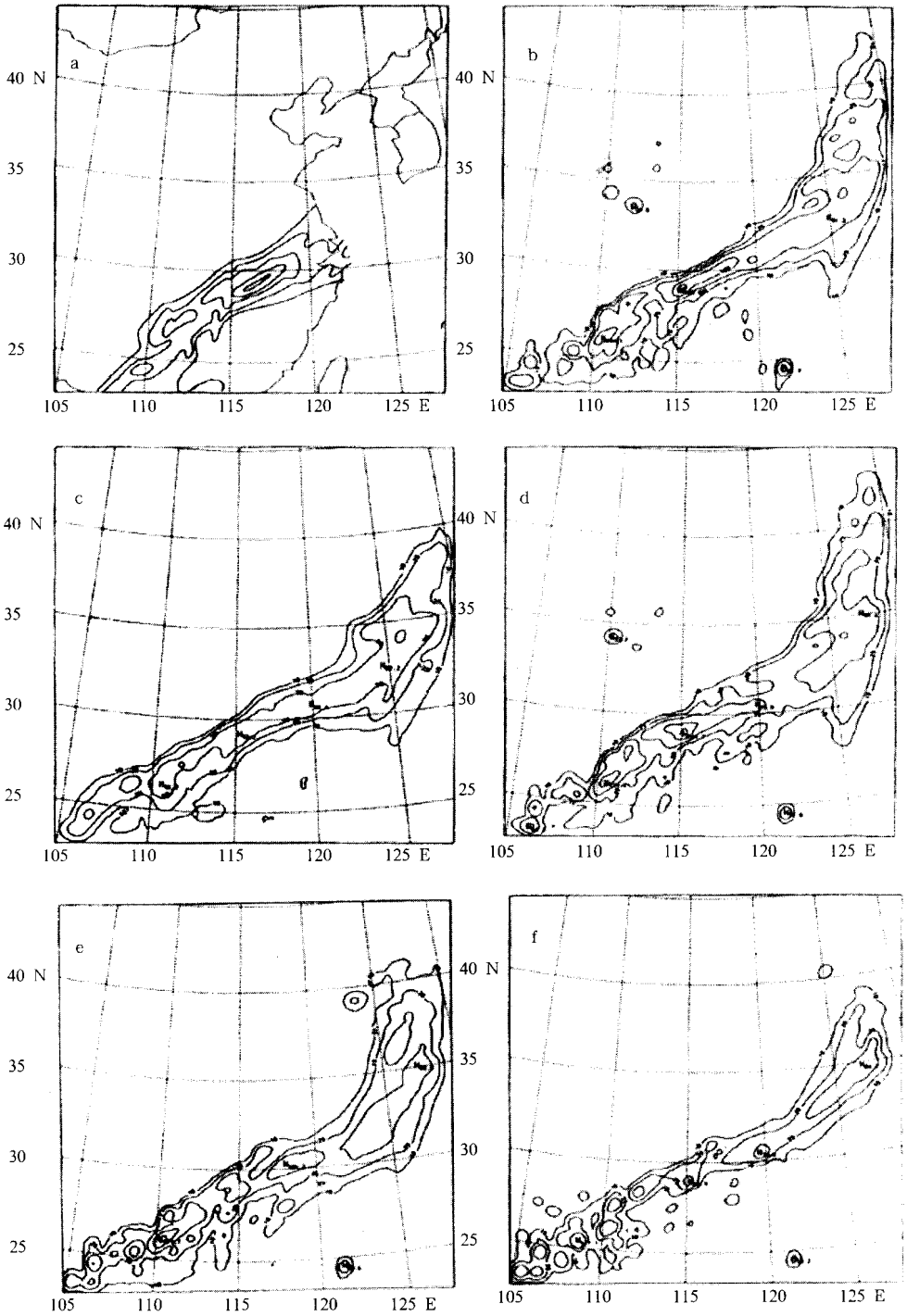


图4 1998年6月25日00:00 UTC~26日00:00 UTC降雨量(间隔:10,25,50,100,150 mm)  
(a) 观测, (b) 方案A 4次同化6 h预报累积, (c) 方案D 4次同化6 h预报累积,  
(d) 方案A 24 h预报, (e) 方案B 24 h预报, (f) 方案C 24 h预报

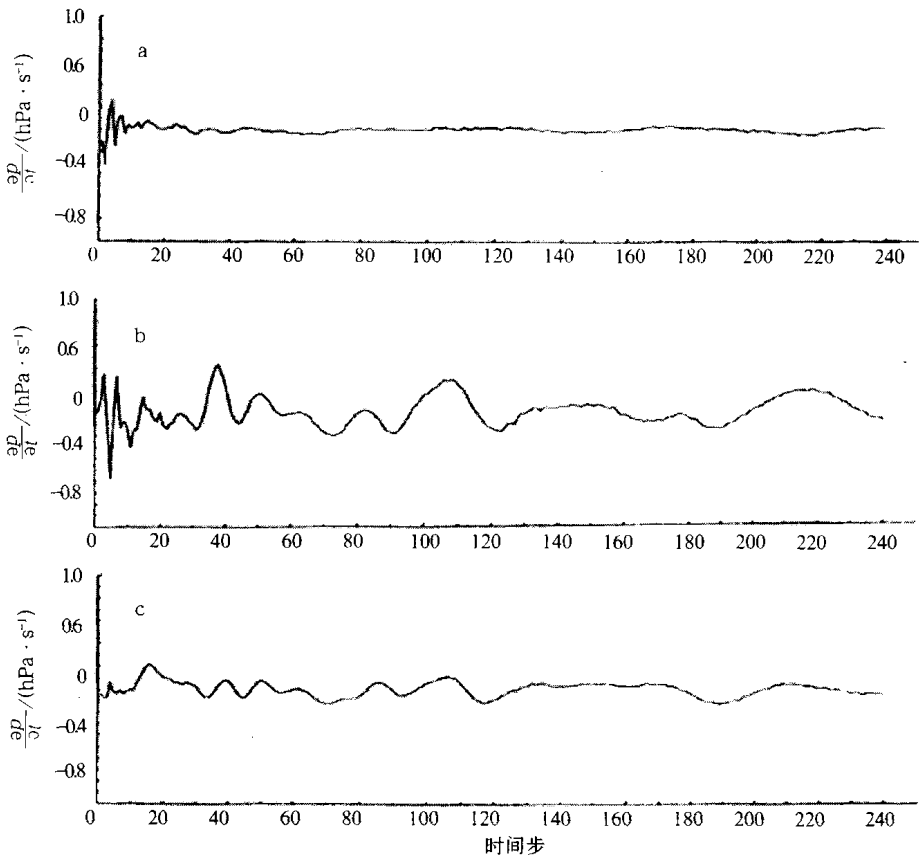


图 5 1998 年 6 月 26 日 00:00 ~ 06:00 UTC 在强暴雨地点 ( $29.2^{\circ} \text{N}, 115.5^{\circ} \text{E}$ )  $\frac{\partial P_s}{\partial t}$  的时间演变 (a) 方案 A, (b) 方案 B, (c) 方案 C (时间步长为 90 s)

增加使用的空间加密地面观测站达几百个,远远超过当时该试验地区的常规地面天气站;而对于 HUBEX 试验,正如前面已指出的,真正能够在这个资料同化系统中利用的增补加密地面观测站不足 30 个,空间加密观测站更少,这可能是 HUBEX 数值试验中使用加密观测效果改进不十分显著的一个重要原因。

#### 4 结束语

本文介绍了 HUBEX 区域资料同化系统的基本方案、结构及其组成部分。试验显示,系统具有较好的性能,可以给出改善的同化、分析气象要素场,提供的初值明显地改进短期预报水平。已利用 HUBEX 的观测资料制作资料同化产品,提供 HUBEX 数值试验和分析研究使用。



## 参考文献

- 1 Roger Daley . Atmospheric data assimilation . Second International Symposium on Assimilation of Observations in Meteorology and Oceanography . Tokyo , Japan , 13 -17 March 1995 . 21 ~ 22 .
- 2 陶士伟 . 台风暴雨数值预报的观测资料预处理和初步的质量控制方案 . 台风暴雨业务数值预报方法和技术研究 . 北京 : 气象出版社 , 1995 . 192 ~ 197 .
- 3 朱宗申 , 马清云 , 张跃堂 , 等 . 有限区域  $\sigma$  面客观分析方案 . 台风暴雨业务数值预报方法和技术研究 . 北京 : 气象出版社 , 1995 . 482 ~ 490 .
- 4 Thomas T . Warner . Assimilation of data with mesoscale meteorological models . International Symposium on Assimilation of Observations in Meteorology and Oceanography , Clermont - Ferrand France , 3 -9 July 1990 . 165 ~ 170 .
- 5 Georg A . Grell , Jimmy Dudhia and David R . Stauffer . A description of the fifth-generation penn state/ NCAR mesoscale model ( MM5 ) . NCAR/ TN - 398 + STR NCAR Technical Note . 1994 .
- 6 Davies M C . A lateral boundary formulation for multilevel prediction model . *Q. J. R. Meteorol. Soc.* , 1976 , **102** : 405 ~ 418 .
- 7 朱宗申 , 马清云 , 郝民 , 等 . 台风试验陆地加密观测在数值天气预报中的作用 . 应用气象学报 , 1999 , **10** ( 1 ) : 105 ~ 111 .

## REGIONAL DATA ASSIMILATION SYSTEM OF HUIHE BASIN EXPERIMENT (HUBEX)

Zhu Zongshen   Ma Qingyun   Hao Min   Guo Xiaorong  
Tao Shiwei   Li Zhiyuan   Wang Jianjie   Hu Ming  
( *National Meteorological Center , Beijing 100081* )

### Abstract

The Regional Data Assimilation System ( RDAS ) of Huaihe Basin Experiment ( HUBEX ) is presented . The RDAS is an intermittent assimilation system in which an assimilation cycle includes four analyses in a daily period . Both the first guess fields for the cold starting of the system and the boundary conditions for the assimilation model are supplied by products of the global model system . The RDAS consists of quality control ,  $\sigma$ -surface optimum interpolation objective analysis , nudging initialization , mesoscale assimilation model forecast and post-processing . The observational data from the Global Telecommunication System ( GTS ) , HUBEX intensive observation period ( IOP ) and National Satellite Meteorological Center are assimilated . Finally , a heavy rain process in June 24 - 28 , 1998 is tested using the RDAS .

**Key words :** HUBEX intense observation   Data assimilation system   Case test