

沈桐立, 崔丽曼, 陈海山. 2002 年 6 月 14—15 日暴雨的诊断分析和数值试验 [J]. 大气科学学报, 2009, 32 (4): 483-489.

## 2002 年 6 月 14—15 日暴雨的诊断分析和数值试验

沈桐立<sup>1</sup>, 崔丽曼<sup>1,2</sup>, 陈海山<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 江苏 南京 210044; 2. 河南省气象台, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 利用 NCEP/NCAR 再分析资料对 2002 年 6 月 14—15 日的暴雨过程进行了诊断分析, 并利用中尺度模式 MM5 对暴雨过程进行云迹风资料的同化模拟。诊断分析表明: 高空急流的动量下传、高低空急流的适宜配置所产生的动力场的耦合作用, 为此次大范围暴雨的发生、发展提供了动力条件; 此次暴雨过程充足稳定的水汽主要源自印度洋。对同化效果进行检验说明: 两个时次的云迹风资料同化模拟与一个时次的云迹风资料同化模拟相比, 前者更进一步地改善风场、温度场和高度场, 使得物理量场和降水场的预报更加接近实况。

**关键词:** 强降水; 诊断分析; 云迹风; 同化

**中图分类号:** P458.121.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-7097(2009)04-0483-07

## D i a g n o s t i c A n a l y s i s a n d N u m e r i c a l S i m u l a t i o n o f a R a i n s t o r m i n J u n e 1 4 — 1 5 , 2 0 0 2

SHEN Tong-li<sup>1</sup>, CU IL i-man<sup>1,2</sup>, CHEN Hai-shan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, NU IST, Nanjing 210044, China;

2. Meteorological Observatory of Henan Province, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** A diagnostic analysis of a rainstorm process during June 14—15, 2005 is performed based on the NCEP/NCAR reanalysis data, and the simulation of the process is conducted using the meso-scale MM5 model with the assimilation of cloud-derived wind data. The results show that the strengthening of a high-level jet stream and its momentum downward-spreading impelled the maintenance of the low-level jet, and the coupling of the high- and low-level jets provided a proper dynamical condition for the occurrence and development of the torrential rain process. The abundant and stable vapor supply to the rainstorm process mainly originated from the Indian Ocean. The effects of cloud-derived wind assimilation were examined in sensitive experiments; the wind, temperature, geopotential height fields are more significantly improved in the experiment with the cloud-derived wind assimilation of two time levels than those in that with one time level assimilation, thus the predicted physical variable and rainfall fields in the former are closer to the observed fields than in the latter.

**Key words:** heavy rainfall; diagnostic analysis; cloud-derived wind; assimilation

### 0 引言

暴雨 (尤其是大范围暴雨) 的发生发展有其特殊的环流条件, 当天气尺度的系统移动缓慢或停滞时, 就容易形成特大暴雨。陶诗言<sup>[1]</sup>首先提出了与暴雨有关的中尺度 (其长度一般为几百公里) 低空

急流的天气概念, 并研究了低空急流与暴雨的关系。在前人工作的基础上, 另一个重要进步是加大了对高低空急流相互作用方面的研究, 如张维桓等<sup>[2]</sup>利用对一次大暴雨过程模拟得到的高时空分辨率资料, 对伴随高、低空急流的次级环流进行了诊断, 结果表明急流和暴雨之间通过次级环流存在着正反馈

收稿日期: 2008-03-28; 改回日期: 2009-07-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40775033; 40975037); 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室基金项目 (2006LASW01); 江苏省“六大人才高峰”计划资助项目

作者简介: 沈桐立 (1939—), 男, 安徽当涂人, 教授, 主要研究方向为数值模拟和资料同化, shentong22@126.com.

相互作用,朱乾根等<sup>[3]</sup>通过对 1998 年发生于武汉附近的一次强降雨过程的分析发现,边界层南风急流、低空西风急流和高空西风急流上下的耦合作用是强降雨发生的重要原因。王黎娟等<sup>[4]</sup>通过对淮河流域的一次暴雨过程的分析,揭示了淮河流域位于高压北侧高空西风急流入口区南侧的上升运动区,有利于淮河流域强降水发生和维持。王欢等<sup>[5]</sup>对华北的一次暴雨过程的成因做了诊断分析,结果表明高层干冷空气的侵入有利于低层中尺度气旋的发展,使暴雨过程得以维持和加强。王婷等<sup>[6]</sup>揭示了中尺度对流系统在暴雨过程中的演变特征。曹文博等<sup>[7]</sup>利用 MM5 伴随模式同化系统,同化常规观测资料以及卫星云导风资料,对比结果表明将卫星云导风资料同化到伴随同化系统中能有效改善模式初始场。朱男男等<sup>[8]</sup>利用 MM5 模式和 GPS 可降水量资料进行数值模拟试验和伴随同化试验,结果证明加入 GPS 可降水量资料可以提高降水预报水平。周慧等<sup>[9]</sup>利用 AREM 3.0 模式对一次暴雨进行分析,表明螺旋度对特大暴雨的预报有指示意义。李华宏等<sup>[10]</sup>将云迹风资料应用于 GRAPES 模式,表明同化云迹风资料后对暴雨落区和强度预报都有改善。Hall 等<sup>[11]</sup>提出用伴随方法来修正模式误差。杜钦等<sup>[12]</sup>将 GMS-5 卫星风场与非常规温度资料用于 MM5 伴随同化系统修正模式地形误差,试验性研究表明,该方法能够反演出一个既与初始气象要素场相匹配,又与模式更协调的地形场,得到比一般包络地形更好的效果,改善了模式对强降水中心及降水区域的预报。林毅等<sup>[13]</sup>对发生在福建北部的暴雨过程进行了诊断和模拟分析,指出高低空急流的耦合作用,为闽北大暴雨的发生、发展提供了动力条件。本文分析了此次大范围暴雨的动力条件和水汽来源,使用 MM5 同化系统就同化云导风资料对物理量场的改善和暴雨预报能力的提高进行了探讨。

## 1 暴雨实况和环流形势

2002 年 6 月 14 日 00 时—15 日 00 时(世界时,下同),广西、湖南、江西、福建出现强降水天气过程,共有 17 个站出现暴雨以上的降水,7 个站出现大暴雨以上降水。华南一带为西南—东北走向的低空急流,在 27°N 附近有一条东北—西南走向的风速切变线,同时在 108°~120°E, 25°~28°N 之间为一强水汽辐合地带。整体雨带近东西走向(图 1),一个大暴雨中心出现在 110°E, 26°N 附近;另一个强

降水中心在 118°E, 27°N 附近,降水量都在 75 mm 以上。

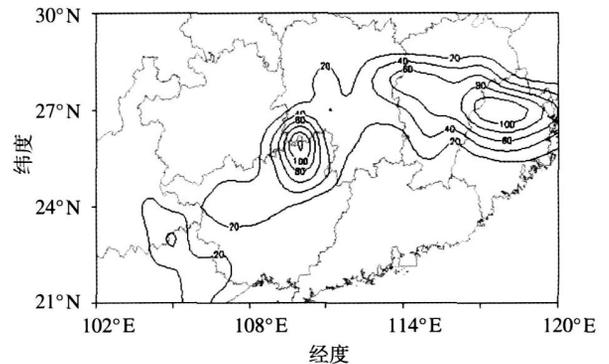


图 1 6 月 14 日 00 时—15 日 00 时 24 h 实况累积降水量(单位: mm, 间隔 20 mm)

Fig 1 Observed 24 h accumulative precipitation from 0000 UTC June 14 to 0000 UTC June 15 (units: mm; contour interval: 20mm)

这次连续性暴雨过程的产生和维持与 500 hPa 低涡的稳定分不开。暴雨期间, 500 hPa 高度场上(图 2), 14—16 日低涡在我东北和日本海地区, 低涡南伸的低槽槽底达 25°~30°N, 从该低涡内不断分裂冷空气沿着低槽南下; 而副热带高压脊线稳定在 18°~20°N 之间。这样从低槽槽后南下的冷空气长时间地与副高北侧的西南暖湿气流在广西北部、湖南和江西、福建地区交汇对峙, 形成了产生连续性暴雨的稳定环流背景。

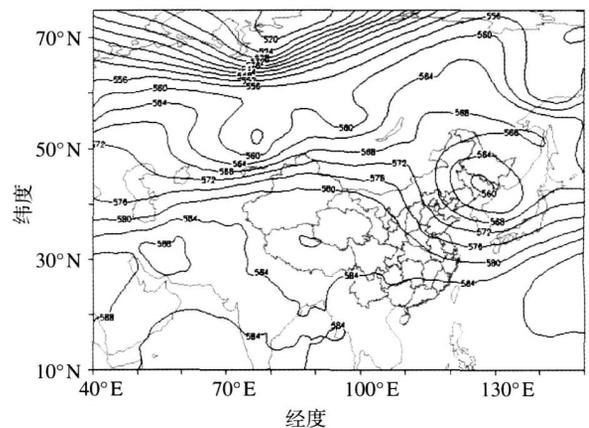


图 2 6 月 14 日 12 时 500 hPa 高度场(单位: dagpm)

Fig 2 Observed 500 hPa geopotential heights (dagpm) at 1200 UTC June 14

## 2 暴雨成因诊断分析

### 2.1 高低空急流与雨区位置

分析暴雨过程各层的流场发现, 在暴雨的发生

过程中,有高空强风速的向下传送过程。如 14 日 00 时高空 200 hPa 高度场上高空急流的风速达 42 m/s,而 500 hPa 高度场上的风速仅为 14 m/s。14 日 12 时 200 hPa 的风速减弱到 32 m/s,而 500 hPa 的风速增加到 20 m/s,15 日 00 时 850 hPa 强风速中心达 20 m/s,中心移到海上(图 3b)。

就 850 hPa 流场的演变情况可以看出,14 日 00 时贵州北部、福建、江西和湖南的上空流场已经出现气旋性曲率。14 日 12 时贵州北部上空气旋性曲率开始减弱(图 3a),福建北部与湖南北部上空气旋性曲率加强;15 日 00 时,贵州北部上空生成涡旋中心,湖南—江西—福建一线存在一条明显的切变线(图 3b)。700 hPa 与 850 hPa 流场的演变情况类似(图略),这是因为高空风的动量下传,使低空急流的风速加大,不但起到对低空急流维持的作用,而且还加大了低空急流上的风速脉动。已有研究表明,低空急流的强风中心的波动和急流轴上风的脉动是

常见的中尺度波动,是导致暴雨发生的触发机制。

高低空急流的不同配置对强降雨有不同的影响。徐海明等<sup>[14]</sup>在对西北风高空急流的研究中发现,高空急流轴呈西北—东南方向的倾斜可以形成其出口处右侧的强辐散形势,从而诱使低层低值系统、低空急流以及暴雨的发生发展,即倾斜的急流轴更有利于暴雨的发生。而朱乾根<sup>[15]</sup>指出,我国暴雨往往发生于高空西南急流右后方;王小曼等<sup>[16]</sup>也指出,梅雨暴雨与高空急流关系密切,暴雨多出现在西北风高空急流的右前方或西南风高空急流的右后方。在模拟时段内,高空急流轴位于低空急流轴北侧,二者相对位置基本稳定、强度加强,构成了有利暴雨发生的适宜配置。

从 14 日 06 时—18 时每 6 h 实况降水分布(图 4)可以看出,暴雨区位置总体位于高空急流右侧、低空急流左侧,但是暴雨区的位置有一个变化过程,那就是在 14 日 06 时以后,暴雨区东移、降水加强,

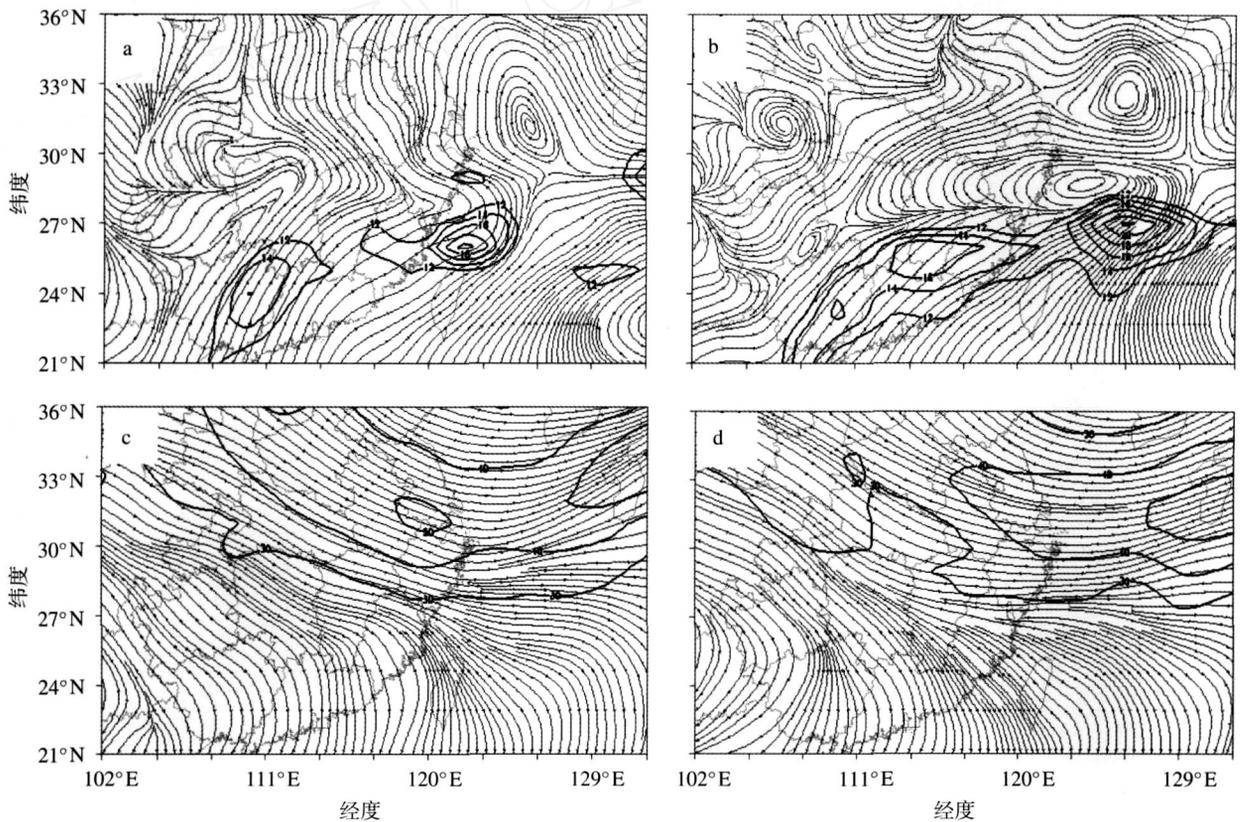


图 3 850 hPa(a, b,单位: m/s,间隔: 2)以及 200 hPa(c, d,单位: m/s,间隔: 10)风速场和  $u-v$  流场 (a, c: 6月 14日 12时; b, d: 6月 15日 00时)

Fig 3 Observed (a, b) 850 hPa and (c, d) 200 hPa wind fields(units: m/s; contour interval: 2 m/s in a, b, and 10 m/s in c, d) and  $u-v$  streamline fields at (a, c) 1200 UTC June 14 and (b, d) 0000 UTC June 15

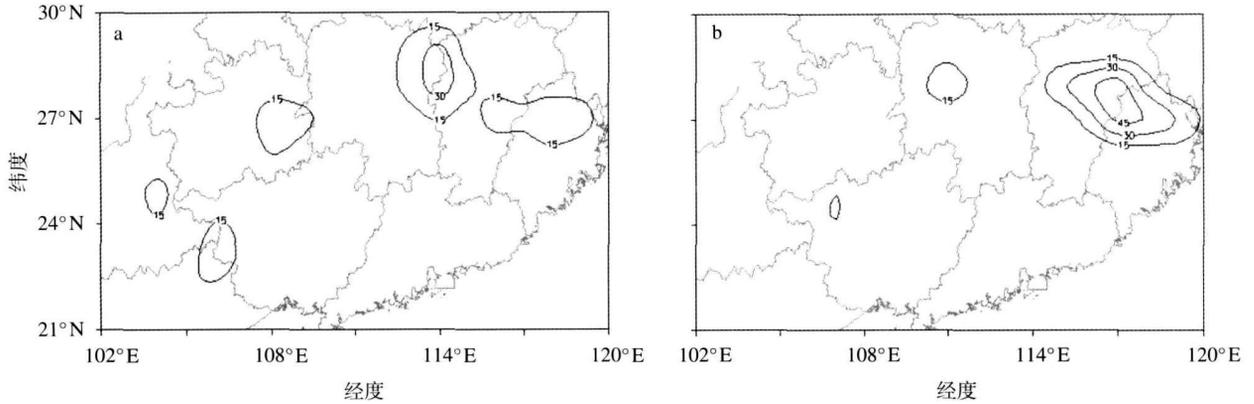


图 4 14日 06—18时每 6 h 的实况降水量 (单位: mm, 间隔 15 mm) a. 06—12时; b. 12—18时

Fig 4 Observed 6 h precipitation (units: mm; contour interval: 15 mm) for (a) 0600—1200 UTC June 14, and (b) 1200—1800 UTC June 14

强降水主要发生在赣中和闽北地区。在 06 时前, 强降雨落区主要位于低空西南风急流出口区的左侧和 200 hPa 西北风急流的出口区西南侧, 即低空急流的左侧与切变线的前沿 (图 3a-b), 之后暴雨区主要位于高空西南风急流入口区南侧 (117°E, 27°N), 低空仍处于低空急流的左侧, 高低空急流轴近于平行, 暴雨区位于切变线与低空急流之间 (图 3c-d)。

从经过大暴雨区的全风速经向剖面图 (图略) 可以看到, 大暴雨区位于高空和低空风速切变最大区的叠加之处。这正是高空急流和低空急流耦合形成最有利暴雨发生的动力场的区域。高空急流右侧的上升区与低空急流左侧的上升区相重叠, 这在散

度场上表现为高空辐散区和低层辐合区的垂直配置, 形成深厚的、强烈的上升运动。有利的动力场决定了大暴雨的落区。大暴雨的发生区与动力场的强中心相一致。这种由于高低空急流适宜配置而形成的高低层动力场的耦合是这次暴雨发生的主要动力条件。

2.2 热力、水汽条件

温度场 (图略)、湿度场表明, 暴雨区正处于湿度大值区和温度线密集区的下风方向上; 对流层下层深厚暖湿气流为暴雨区提供了足够的水汽条件。从 14—15 日 700 hPa 的比湿和风场 (图 5a) 可以看出, 14 日 00 时南海南部、中南半岛北部、孟加拉湾

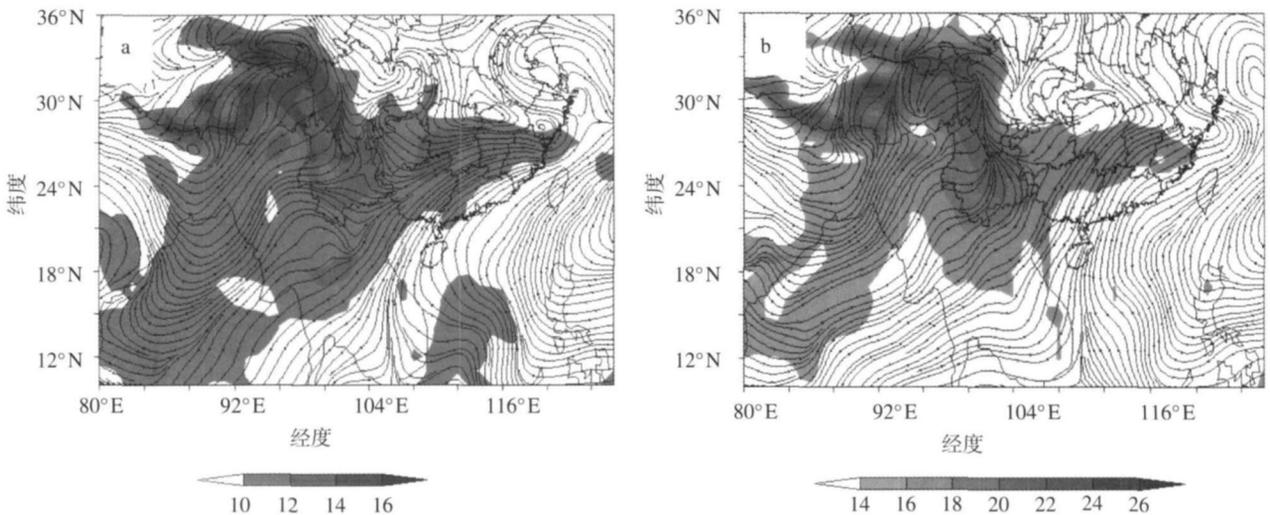


图 5 14 日 06 时 700 hPa (a) 和 850 hPa (b) 比湿场 (阴影; 单位: g/kg) 以及 u-v 流场

Fig 5 Observed (a) 700 hPa and (b) 850 hPa relative humidity (shadings; units: g/kg) and u-v streamline fields at 0600 UTC June 14

以及长江以南均处于 8 g/kg 以上的高值区内,其中 10 g/kg 以上高值区西南部为伸入孟加拉湾的湿舌,主体在高原东部 (90 ~ 105 E, 24 ~ 36 N), 这条宽广的高湿度区向东北延伸至东部沿海。到 14 日 12 时,高原东部湿度明显减弱。14 日 12 时到 15 日 00 时,高原东部湿度增强。14—15 日,850 hPa 上高原南侧的湿度中心值维持在 20 g/kg (图 5b),华南地区处于湿度值大于 14 g/kg 的湿区,该湿区伸展到福建东部,呈东西走向,暴雨区处于该区中,高湿带为强降雨提供了非常充沛的水汽条件。

### 3 同化云迹风资料试验

#### 3.1 资料与试验方案

背景场资料选取 2002 年 6 月 14—15 日 NCEP 1° × 1 全球再分析资料和常规地面、探空观测资料。试验用 PSU/NCAR 联合研制的非静力中尺度模式 MM5。模拟区域中心取为 112 E, 32 N, 采用单向嵌套网格,水平方向格点数为 61 × 61, 格距为 45 km, 垂直方向有 11 层,模式顶气压为 100 hPa。预报时间步长都取为 90 s。动力学过程采取非流体静力平衡方案,侧边界条件采用时变松弛边界条件,行星边界层物理过程采用总体空气动力学参数化方案,大气辐射方案采用简单大气辐射冷却方案,积云对流参数化方案采用 Grell 方案。同化时间步长和预报时间步长都取为 90 s。云迹风资料采用 CMS-5 卫星资料。选取 100 hPa 以下的风场资料和非常规温度场资料,作为同化窗口的非常规资料代入同化系统中,分别进行两次不同时段云迹风资料的同化试验。

方案 1:采用 grib 格式的 NCEP 再分析资料,地面、探空观测资料,同化 14 日 00 时一个时段红外通道云迹风资料和水汽通道云迹风资料,同化变量为  $u, v, \theta$ 。

方案 2:采用 grib 格式的 NCEP 再分析资料,地面、探空观测资料,同化 14 日 00 时和 18 时两个时段红外通道云迹风资料和水汽通道云迹风资料,同化变量为  $u, v, \theta$ 。

#### 3.2 降水模拟结果

对比降水实况和 24 h 模拟结果 (图 6) 可以看出,同化了云迹风资料,两组试验都比较成功地模拟了降水落区,模式给出了与实况相近的在 108 ~ 120 E, 24 ~ 28 N 区域的降水带分布及走向。方案 2 的模拟结果与实况更为接近,尤其是福建中北部和闽赣交界处一个大暴雨中心,方案 2 比方案 1 降水量级大了 20 mm,对于广西北部与湖南、贵州交界处的另一个大暴雨中心,方案 2 比方案 1 要大 10 ~ 20 mm,降水落区更接近实况。这表明,同化试验 2 对降水预报有明显的改进。

为检验降水模拟试验的效果,比较各方案模拟的降水强度及分布与实况的接近程度,引用  $T_s$  降水评分方法作进一步检验。下面给出评分的定义:  $T_s = \frac{G}{G + K + L}$ 。其中:  $G$  为降水预报正确格点数;  $K$  为降水空报格点数;  $L$  为降水漏报格点数。由定义可知,  $T_s$  标准用来衡量降水量级预报的准确度,越接近于 1 说明降水的量级预报越准确。各个方案的评分结果按不同的降水量级进行统计 (表 1)。

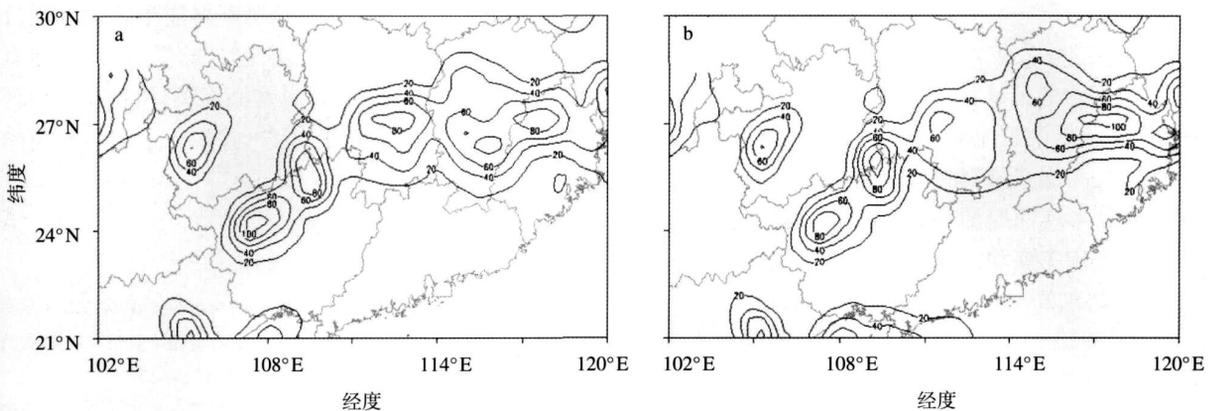


图 6 14 日 00 时—15 日 00 时 24 h 的模拟降水量 (单位: mm, 间隔 20 mm) a. 方案 1; b. 方案 2  
 Fig 6 Simulated 24 h accumulative precipitation from 0000 UTC June 14 to 0000 UTC June 15 (units: mm; contour interval: 20 mm) a experiment scheme 1; b experiment scheme 2

表 1 各个试验方案的  $T_S$  评分Table 1 Threat scores ( $T_S$ ) of different experiment schemes

	10 mm	25 mm	50 mm	75 mm	100 mm
方案 1	0.250 0	0.396 8	0.205 1	0.080 0	0.071 4
方案 2	0.255 4	0.393 9	0.250 0	0.157 9	0.083 3

试验结果共有 5 个评分级别 (表 1), 即 10 mm、25 mm、50 mm、75 mm、100 mm, 它们的  $T_S$  评分随着降水等级的增加而减小。在 10 mm 降水的评分中, 方案 2 比方案 1 略高; 25 mm 时, 方案 1 的评分高; 50 mm 以上的降水等级试验中, 方案 2 比方案 1 的结果要好; 75 mm 降水等级试验中, 方案 2 的结果较好。在预报中, 两个时次云迹风资料包含的信息体现在模式降水模拟中, 所以同化试验在 75 mm 降水等级中有较好效果。

### 3.3 同化云迹风资料对风场的调整

为了进一步了解常规资料及非常规资料云导风同化所得初始场对于未来预报的影响, 下面计算出了各方案的数值实验结果与实况之间的均方差。由于云导风资料选取了风场和温度场作为同化的非常规

资料代入模式, 下面给出了同化 24 h 的温度场、风场、高度场与实况之间的均方差 (表 2)。计算公式为

$$Q_x = \left[ \frac{\sum_{i,j}^{m,n} (x_{i,j} - x_{0,i,j})^2}{m n} \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$Q_y = \left[ \frac{\sum_{i,j}^{m,n} (u_{i,j} - u_{0,i,j})^2 + (v_{i,j} - v_{0,i,j})^2}{m n} \right]^{\frac{1}{2}}.$$

其中:  $Q_x$  指除风场外的某一要素值与实况之间的均方差;  $m, n$  指各个层次上的水平网格点数;  $x_{i,j}$  指某格点上该要素值的模拟值;  $x_{0,i,j}$  指将实况观测的该要素值插值到该格点上的值。计算风场时,  $Q_y$  用来计算分量的平方和。

除方案 2 中 850 hPa 温度场的均方差略大于方案 1 之外 (表 2), 方案 2 各物理量的均方差都小于方案 1。这说明使用云迹风资料同化模拟可以略微改善温度场和风场及高度场的预报效果。由此可见, 作为非常规温度场和风场代入同化系统中进行迭代的云导风资料对于物理量场的预报有很好的改善作用, 可以使模式预报的初始场与模式更加协调, 得到的预报结果误差更小。

表 2 不同试验方案模拟的温度场、风场、高度场与相应实况场的均方差

Table 2 The RMSE of simulated temperature, wind, and geopotential height deviated from the observations in different experiments

	温度 /			风场 / ( $m \cdot s^{-1}$ )			高度场 / gpm		
	850 hPa	500 hPa	200 hPa	850 hPa	500 hPa	200 hPa	850 hPa	500 hPa	200 hPa
方案 1	0.857	1.465	2.910	1.033	1.848	2.702	0.857	1.465	2.910
方案 2	0.862	1.463	2.896	1.032	1.844	1.850	0.852	1.463	2.896

## 4 结论

(1) 高空风的动量下传, 使低空急流得以维持, 并且加大了低空急流的风速脉动, 对暴雨的发生起触发作用; 高低空急流的适宜配置, 产生了动力场的耦合作用, 形成深厚的、强烈的上升运动, 是大暴雨发生、发展的主要动力条件。

(2) 此次暴雨的充足水汽主要来源于印度洋, 西南低空急流的东移对此次华南连续性暴雨有着非常重要的作用。

(3) 模拟结果及其  $T_S$  评分结果表明, 同化两个时次云迹风资料可以有效地改善数值预报的初始场, 从而在一定程度上提高物理量场的预报, 使得同化实验结果优于同化一个时次云迹风资料的同化结果。

(4) 同化两个时次云导风资料能更好地反映云迹风资料在暴雨模拟过程中包含的信息, 可以更有效地改善初始温度场、风场和高度场, 所预报的物理量场和降水场都要好于同化一个时次云迹风资料的模拟结果。

## 参考文献:

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨. [M] 北京: 科学出版社, 1980: 225.
- [2] 张维桓, 董佩明, 沈桐立. 一次大暴雨过程中急流次级环流的激发及作用 [J]. 大气科学, 2000, 24 (1): 47-57.
- [3] 朱乾根, 周伟灿, 张海霞. 高低空急流耦合对长江中游强暴雨形成的机理研究 [J]. 南京气象学院学报, 2001, 24 (3): 308-314.
- [4] 王黎娟, 管兆勇, 何金海. 2003 年淮河流域致洪暴雨的环流背景及其与大气热源的关系 [J]. 气象科学, 2008, 28 (1): 1-7.
- [5] 王欢, 寿绍文, 解以扬, 等. 干侵入对 2005 年 8 月 16 日华北暴

- 雨的作用 [J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(1): 97-103.
- [6] 王婷, 吴池胜, 冯瑞权. 2005年 6月广东一次暴雨过程的中尺度对流系统的数值研究 [J]. 大气科学, 2008, 32(1): 184-196.
- [7] 曹文博, 沈桐立. 卫星云导风资料应用于伴随同化系统的数值试验研究 [J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(4): 495-502.
- [8] 朱男男, 沈桐立, 朱伟军. 一次降水过程的 GPS 可降水量资料同化试验 [J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(1): 26-32.
- [9] 周慧, 李象玉, 黎祖贤, 等. AREM3.0 模式对“5.31”天气过程的模拟分析 [J]. 热带气象学报, 2008, 24(1): 88-93.
- [10] 李华宏, 王曼, 薛纪善, 等. FY-2C 云迹风资料在中尺度数值模式中的应用研究 [J]. 气象学报, 2008, 66(1): 50-58.
- [11] Hall M C G, Caucel D G, Schlesinger M E. Sensitivity analysis of a radiative convective model by the adjoint method [J]. J Atmos Sci, 1982, 39(9): 2038-2050.
- [12] 杜钦, 沈桐立. 伴随模式同化系统在修正模式误差中的应用研究 [J]. 热带气象学报, 2007, 23(2): 182-188.
- [13] 林毅, 刘铭, 刘爱鸣. 高低空急流在闽西北大暴雨过程中的作用及数值模拟 [J]. 气象科技, 2006, 26(4): 449-455.
- [14] 徐海明, 何金海, 周兵. “倾斜”高空急流轴在大暴雨过程中的作用 [J]. 南京气象学院学报, 2001, 24(2): 155-161.
- [15] 朱乾根. 暴雨维持和传播的机制分析 [J]. 南京气象学院学报, 1979, 2(1): 1-7.
- [16] 王小曼, 丁治英, 张兴强. 梅雨暴雨与高空急流的统计与动力分析 [J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(1): 111-117.

(责任编辑:倪东鸿)

www.cnki.net