

文章编号:1004-9045(2007)01-0021-08

初值不确定性对暴雨数值预报影响的初步研究

徐幼平,姜洪峰,李 鲲,程 锐

(北京应用气象研究所,北京 100029)

摘 要:为了研究初值不确定性对我国南方暴雨数值预报的影响,依据历史降水资料的统计分型,选取华南暴雨型、江淮暴雨型和黄淮暴雨型等三类型中具有代表性的暴雨过程,采用 AREM 模式以不同资料分析场(常规观测资料、NCEP 和 ERA40 同化分析资料)作为初值进行暴雨预报对比试验。试验结果表明,对于各类型暴雨,不同资料初值的差异都会引起暴雨数值预报结果的较大差异;在此基础上,采用经验正交函数(EOF)分析方法,分析了各类暴雨初值误差及其变化信息,从中提取出主要的误差分量,并对这类误差的数值预报影响进行了敏感性试验和预报验证,结果显示,寻找和消除主要的初值误差,对改进暴雨数值预报结果具有重要作用。

关键词:暴雨;数值预报;初值不确定性;EOF 误差分析

中图分类号:P456.7 文献标识码:A

1 引言

暴雨预报在国际上一直是公认的天气预报难题。中尺度数值模式是实现暴雨定点、定时、定量预报最有力的工具^[1-2]。尽管如此,目前暴雨数值预报准确率依然较低,这既与模式存在诸多不完善有关,也与初值不确定性关系密切。针对初值对数值预报结果的影响问题,气象工作者做了很多有益的研究。20 世纪 60 年代,Lorenz 意识到初值不确定的重要性并做了开创性研究^[3]。80 年代,Zhang D L 等在模拟 β 中尺度系统时发现,当模式初始场中缺乏重要的中尺度信息时,模拟的中尺度现象的时间、落区和幅度将会有很大偏差,认为初值的不精确、不客观往往影响预报效果,甚至导致预报的失败^[4]。如 1998 年 7 月 20 至 22 日武汉附近出现突发性特大暴雨,许多业务数值预报系统并没有给出成功预报。对此次暴雨过程,宇如聪、徐幼平等用 AREM 对其进行了成功的数值模拟试验^[5],试验结果表明,该暴雨过程的模式预报对初值很敏感。贝耐芳、赵思雄研究认为^[6],初值信息的不完全可能是这次暴雨预报未能成功的重要原因,模式初值质量的好坏对模拟结果的影响至关重要;张昕、刘月巍、王斌等针对这次突发性大暴雨,利用四维变分同化方法研究了降水初值对暴雨预报的影响,结果表明,四维变分方法有效地同化观测降水,总体上提高了模拟时段的降水预报质量^[7]。尽管初值对暴雨数值预报的重要性毋庸置疑,但初值不确定性对暴雨数值预报的可预报

性研究尚有待于深入。本文通过不同初值的预报对比试验和误差分析,研究初值不确定性对我国南方暴雨数值预报的影响,确定主要误差来源,为我国南方暴雨数值预报的可预报性初值影响研究的深入开展提供基本途径。

2 模式和资料

本文以 AREM 作为数值研究的基本工具。AREM 是基于中科院大气物理所大气科学和地球物理流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG)的 REM,是在国家“973”项目“我国重大天气灾害的机理和预测理论研究”和国防预研项目等共同支持下,由 LASG、北京应用气象研究所和中国气象局武汉暴雨所等单位联合发展的新一代 ETA 坐标暴雨数值预报模式^[1,8-9]。本文在数值试验中选用了 AREM v2.3 版本,该版本模式的水平分辨率约为 37 km,垂直分层为 32 层。这里,预报范围取 15°~55°N、85°~135°E,网格点数为 101×161;物理过程选用 BIAM 显式冷云微物理过程、CCM3 非局地边界层过程以及地表通量和地表辐射参数化过程;模式积分时间均取为 24 h。

模式预报初值采用常规观测资料、NCEP 同化分析资料和 ERA40 再分析资料等 3 种资料来源,并由 AREM 简单初值系统分析获取。NCEP 同化分析资料、ERA40 再分析资料的分辨率为 2.5°×2.5°。针对所采用的资料不同,形成如下 5 种初值方案^[8-9]:(1)用 NCEP 再分析资料作背景场并融合常规观测资料分析场

收稿日期:2007-04-02;定稿日期:2007-05-20

基金项目:国家“973”项目“我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和方法研究”第四课题(2004CB418304)

作者简介:徐幼平,男,1963 年生,研究员,主要从事气象监测预报理论与方法的应用研究.E-mail:xyp@lasg.iap.ac.cn

(STN_NCP);(2)用 ERA40 再分析资料作背景场并融合常规观测资料的分析场(STN_EC);(3)直接用常规观测资料的分析场(STN_DAT);(4)直接用 NCEP 再分析资料(NCP_DAT);(5)直接用 ERA40 再分析资料(EC_DAT)。

3 中国南方暴雨的分型

为了较为系统地研究初值对不同类型暴雨数值预报的影响,这里暴雨典型过程的选择,依据对 15 年

(1990~2004 年)历史降水资料的统计分型。暴雨分型采用的是经验正交函数(EOF)分析方法,将 15 年我国汛期(6~8 月)的降水实况分析场进行主要类型划分,找出 5 个主要的降水分布主分量,并确定出 5 种有代表性的暴雨类型。根据分布形态,分别将其命名为华南暴雨型、江淮暴雨型、黄淮暴雨型、华南低涡暴雨型和台风暴雨型(图 1)。

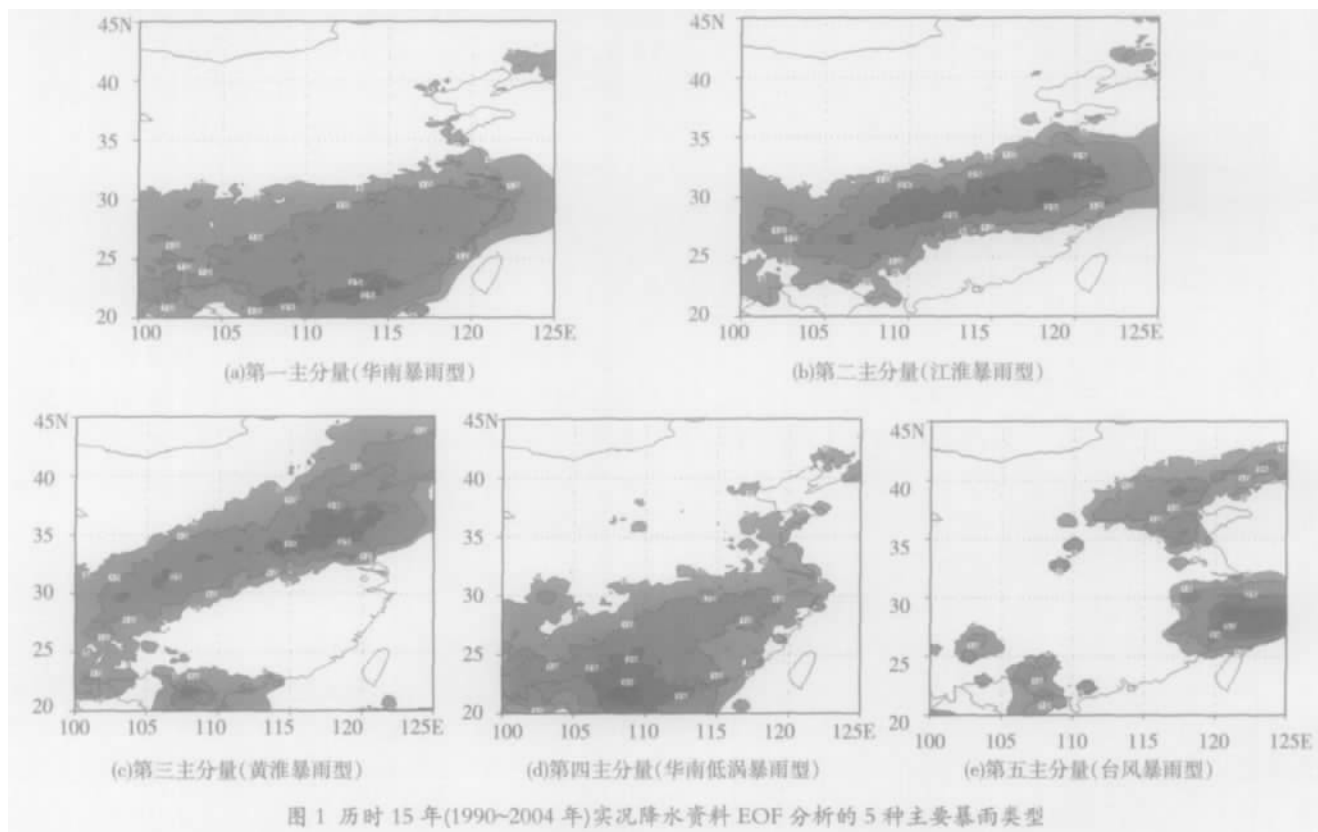


图 1 历时 15 年(1990~2004 年)实况降水资料 EOF 分析的 5 种主要暴雨类型

通过对这 5 种暴雨形态的个例样本所对应的位势高度场(基本资料取 ERA40 再分析资料)进行 EOF 分析发现,各暴雨形态的位势高度场第一主分量的解释方差均高达 99% 以上,即每种暴雨型对应的天气形势非常接近。这说明每种暴雨型降水分布与特定的天气背景有很好对应配置关系。因此,能通过对暴雨型典型个例预报的研究,来揭示这些暴雨类型数值预报的基本规律。本文从华南暴雨型、江淮暴雨型、黄淮暴雨型等 3 种类型的暴雨过程样本中挑选有代表性的实例进行研究。华南暴雨型选择的是 2002 年 6 月 6 日 00 时至 7 日 00 时(世界时,下同)暴雨过程,江淮暴雨型选择的是 1998 年 7 月 29 日 00 时至 30 日 00 时暴雨过程,黄淮暴雨型选择的是 1998 年 8 月 9 日 00 时至 10 日 00 时暴雨过程。

4 三种暴雨型不同初值的数值预报试验

为了考察模式对初值差异的敏感性,这里首先对

3 种暴雨型具有代表性的实例进行 5 种初值的模式预报试验。

4.1 华南暴雨型模式预报的初值试验

华南暴雨型的主要天气形势特点是,副热带高压脊线位于 20°N,华南地区受西南季风控制,该地区西北部盛行西北气流,引导冷空气扩散南下与西南季风暖湿气流交汇,在华南沿海地区形成大范围降水(形势图略)。这里选取 2001 年 6 月 6 日 00 时至 7 日 00 时的暴雨过程进行初值试验。该过程的降水分布是,雨带位于广东及华南沿海地区,强的降水中心位于钦州湾与十万大山和珠江口附近,其降水实况见图 2a。图 2b、c、d、e、f 分别是采用 5 种不同初值(STN_NCP、STN_EC、STN_DAT、NCP_DAT、EC_DAT)的模式预报结果。

从图 2 中可见,五种不同初值的模式预报结果差异较大。其中,EC_DAT 初值方案预报结果最好,雨带走向和强降水中心预报与实况比较一致;STN_EC 和 STN_NCP 两种初值方案预报结果次之,其雨带走向较

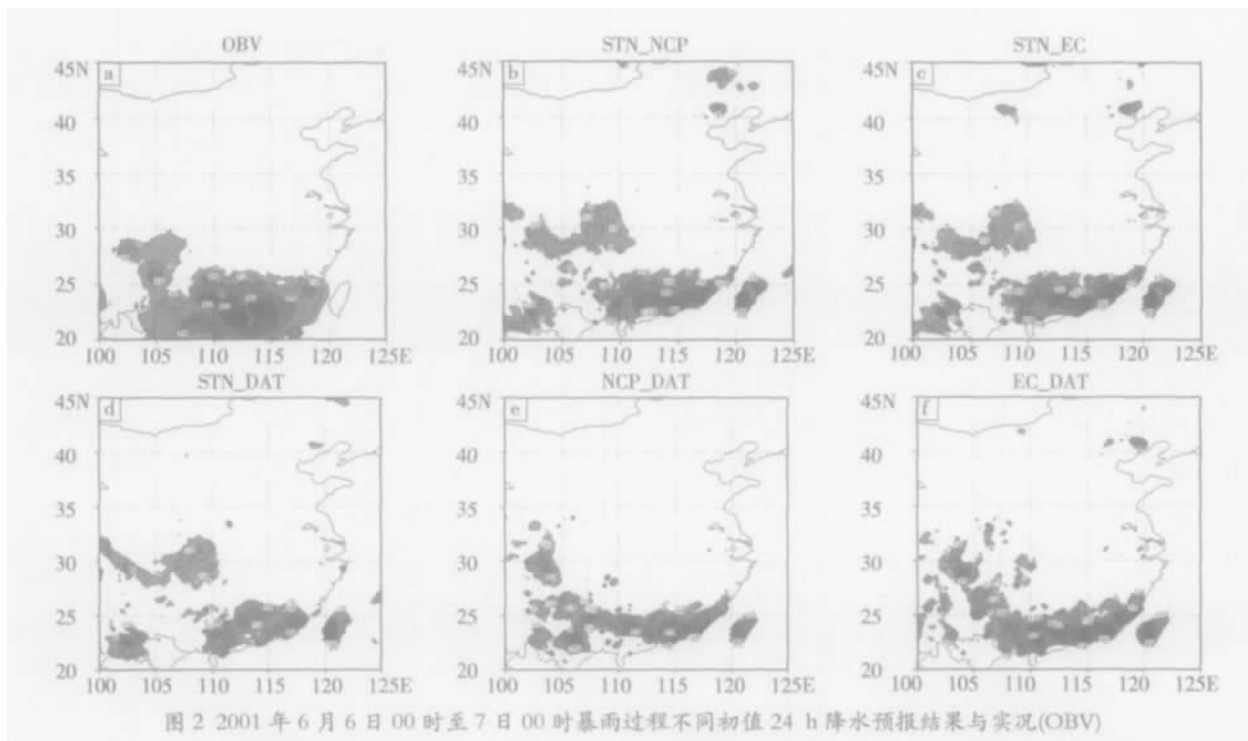


图 2 2001 年 6 月 6 日 00 时至 7 日 00 时暴雨过程不同初值 24 h 降水预报结果与实况(OBV)

合理,降水中心的强度也较合理,但中心位置偏差稍大;NCP_DAT 初值方案的雨带偏窄,只报出一个强降水中心;STN_DAT 方案不仅雨带范围小,强度也不够,强降水中心出现漏报,其结果在这几种初值中属较差。这说明对于华南暴雨型,初值不确定性对暴雨数值预报具有明显影响。

4.2 江淮暴雨型模式预报的初值试验

江淮暴雨型的主要天气形势特点是,副热带高压脊线北进到 23°N 附近,副高西伸位于华南沿海以东

地区;偏西北气流与西南气流在长江流中下游地区交汇,雨带位于长江中下游的江淮地区(形势图略)。这里选取 1998 年 7 月 29 日 00 时至 30 日 00 时的一次暴雨过程进行初值试验。该过程的降水分布是,雨带位于长江中下游地区,呈带状分布,其走向基本呈东北-西南向;强降水中心位于大别山和黄山及淮河流域,是较典型的梅雨锋暴雨形态,其降水实况见图 3a。图 3b、c、d、e、f 分别是采用五种不同初值(STN_NCP、STN_EC、STN_DAT、NCP_DAT、EC_DAT)模式预报的结果。

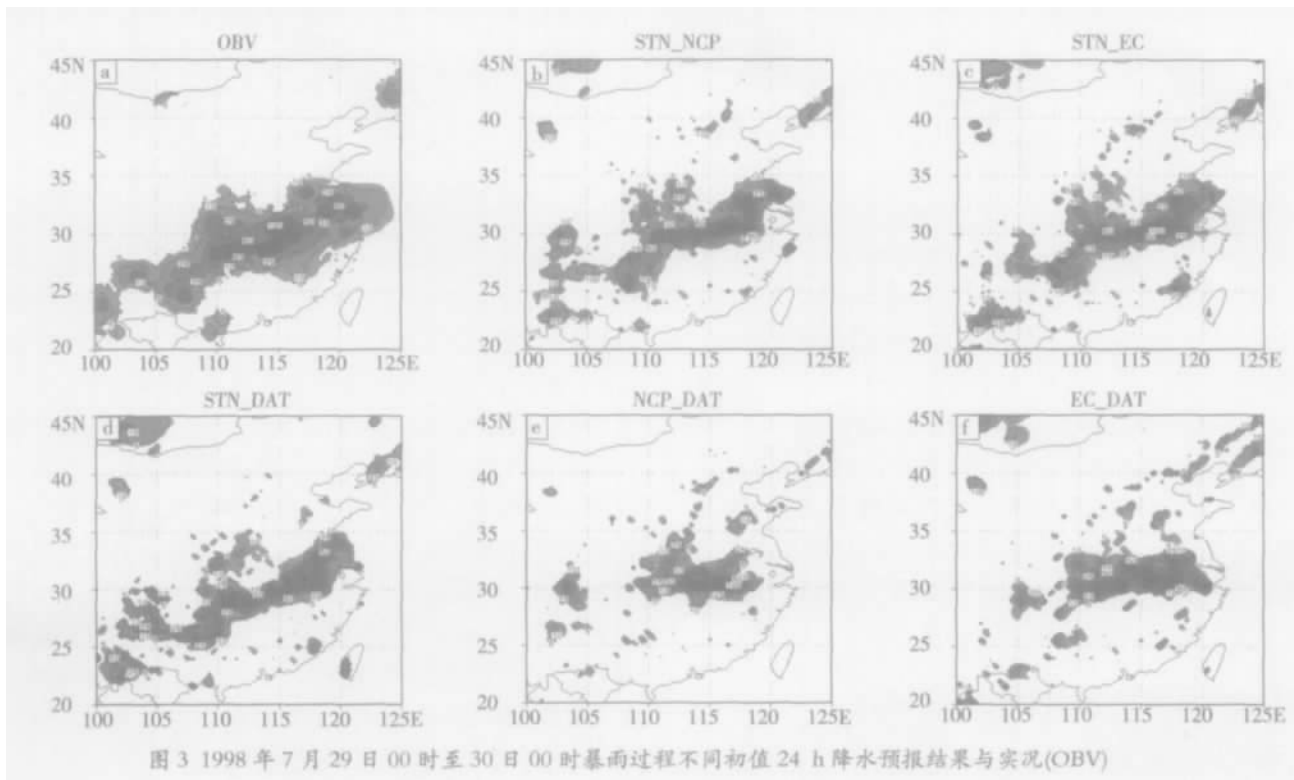


图 3 1998 年 7 月 29 日 00 时至 30 日 00 时暴雨过程不同初值 24 h 降水预报结果与实况(OBV)

从图 3 中可见, 五种不同初值模式预报结果的差异较大, 尤其是常规分析初值(STN_DAT)、NCEP 资料初值(NCP_DAT)和 EC 再分析初值(EC_DAT)的模式预报结果有明显差异。将五种初值结果与实况进行比较, STN_EC 和 STN_NCP 方案比其它方案预报效果好, 均较好地预报出雨带走向和强降水中心, 但雨带偏窄, STN_EC 方案略优于 STN_NCP 方案; STN_DAT 方案对雨带走向的预报也较好, 但强降水中心预报并不理想; NCP_DAT 方案对雨带的预报不理想, EC_DAT 方案预报的也不理想, 无论是雨带走向还是强度预报均较差。

由此说明, 对于江淮暴雨型, 初值不确定性对其暴雨数值预报也具有明显影响。

4.3 黄淮暴雨型的模式预报初值试验

黄淮暴雨型的主要天气形势特点是, 副热带高压脊线北跳到 26°N 附近, 华南及长江流域受副高控制, 500 hPa 天气形势为“一槽两脊”型, 西南季风北伸到华北地区。这里选取 1998 年 8 月 9 日 00 时至 10 日 00 时的一次暴雨过程进行初值试验。该过程的降水分布是, 整个雨带从我国西南地区一直延伸到黄淮流域, 呈东北-西南向带状分布, 强降水中心区位于山东半岛和河北及河南地区, 是比较典型的华北夏季降水形态, 其降水实况见图 4a。图 4b、c、d、e、f 分别是采用 5 种不同初值(STN_NCP、STN_EC、STN_DAT、NCP_DAT、EC_DAT)模式预报的结果。

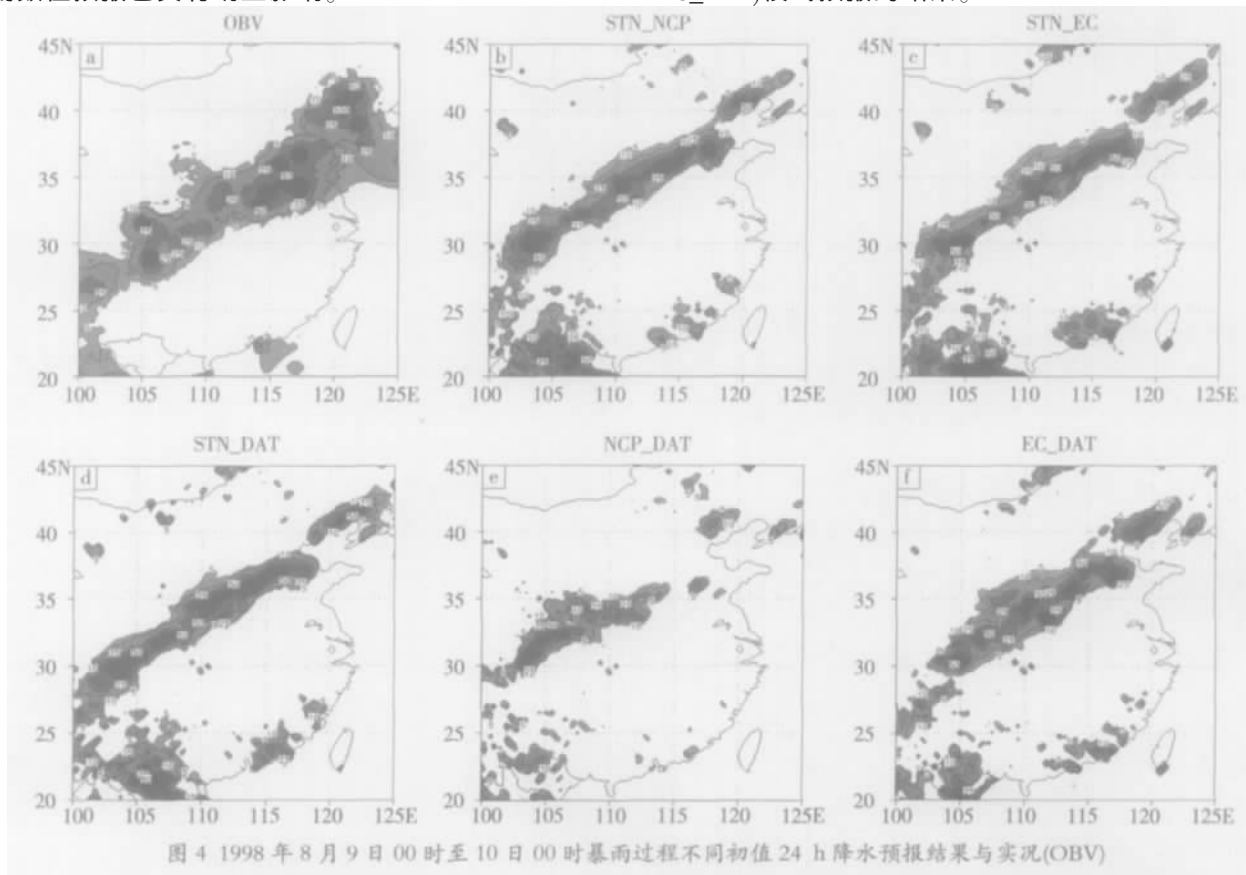


图 4 1998 年 8 月 9 日 00 时至 10 日 00 时暴雨过程不同初值 24 h 降水预报结果与实况(OBV)

从图 4 中可见, 5 种不同初值模式预报结果中, STN_EC 方案和 NCP_DAT 方案预报结果与实况相比, 差异较大; STN_EC、STN_NCP、STN_DAT、EC_DAT 方案对雨带走向和降水强度的预报均较好, 其中 STN_EC 方案预报最好; NCP_DAT 方案预报的降水分布不理想, 预报的雨带形状与实况有较大差异, 整个东北-西南向雨带只预报出西南部分, 山东半岛部分漏报, 且降水强度偏弱。由此可知, 对于黄淮暴雨型, 暴雨数值预报结果与初值存在密切关系。

5 三种暴雨型初值误差的分析研究

5.1 初值误差的 EOF 分析方法

从上述各试验情况可知, 无论对于哪种类型的暴雨过程, 初值不同均可对模式预报结果产生明显影响; 初值方案的好或坏与模式预报的暴雨过程本身也有密切联系, 具有不确定性。为此, 有必要深入分析初值误差特性, 以便从中寻找引起预报差异的主要初值误差源。这里, 将预报效果好的初值与预报效果差的初值提取出来进行比较。尽管能从两种初值场之差得到偏差场, 但偏差场包含各种类型的初值误差, 有的误差将随预报时间延长而增大, 有的误差会随预报时间延长而衰减或振荡, 只有随时间延长而增大的误差才是造成预报结果差异的主要原因。本文采用初值误差 EOF 分析方法提取主要误差源。

初值误差 EOF 分析方法的基本思路是: 首先, 从五种初值方案的预报结果中, 选取预报效果好的初值与预报效果差的初值作为试验对象; 其次, 以预报效果差的初值试验作为控制试验, 将其每隔一个时间段 (这里取 3 h) 的预报结果与预报效果好的初值试验结果进行比较, 得到一组误差场时间序列, 对这一误差场时间序列进行 EOF 分析, 确定误差场的各个主分量模态, 并对各主分量模态在各个时间段的变化规律进行分析, 确定占主导的误差主分量模态; 第三, 采用相关分析方法计算各主分量模态的相关系数, 将相关系数随时间增大或相关系数一直保持较大的主分量模态作为占主导的误差主分量模态, 即主要误差; 第四, 根据主要误差分布, 得到控制试验的初值修正量, 对原初值修正后, 再进行模式预报, 通过对结果的比较, 分析初值不确定性对暴雨数值预报的影响。将该方法分别应用于华南暴雨型、江淮暴雨型和黄淮暴雨型, 并给出这三种暴雨型初值误差分析研究结果。

5.2 华南暴雨型初值误差分析及模式验证

2001 年 6 月 6 日 00 时至 7 日 00 时的暴雨过程属华南暴雨型, 由图 2 可以看出, 对于五种初值方案结果, STN_NCP 初值方案的预报效果最好, 较好地再现了暴雨雨带走向和强降水中心, 而 STN_DAT 初值方案的模式预报最不理想, 降水中心位置和强度出现较大偏差。为此, 以 STN_DAT 初值试验作为控制试验, 进行 24 h 预报积分, 并将其每隔 3 h 的预报结果与 STN_NCP 初值试验对应结果进行比较, 获取两者风场、温度场、位势高度场和相对湿度场误差的时间序列, 用初值误差 EOF 分析方法得到这些要素场误差的各个主分量 (选择 5 个误差主分量模态) 和误差场相关系数随预报时间变化。图 5a、b 分别给出了 500 hPa 位势高度场和 700 hPa 相对湿度场的 5 个误差主分量模态的相关系数随预报时间的变化。

由图 5 可见, 500 hPa 位势高度场第一误差主分量的相关系数随预报时间增加而增大并接近于 1.0, 而其它的误差主分量相关系数基本上随预报时间增加而趋近于零或比较小 (图 5a); 700 hPa 相对湿度场第一误差主分量的相关系数随预报时间增加而维持一个比较大的值, 而其它的误差主分量相关系数基本上随预报时间增加而在零附近上下振荡 (图 5b)。因此, 将这些场的第一误差主分量模态作为主要初值误差源提取出来, 并据此得到控制试验 STN_DAT 初值的修正量, 对原初值修正后, 再进行模式预报。图 6 给出了对 STN_DAT 初值作修正后再进行 24 h 模式预报的降水量分布。

由图 6 可看到, 与 STN_DAT 初值试验相比 (见图

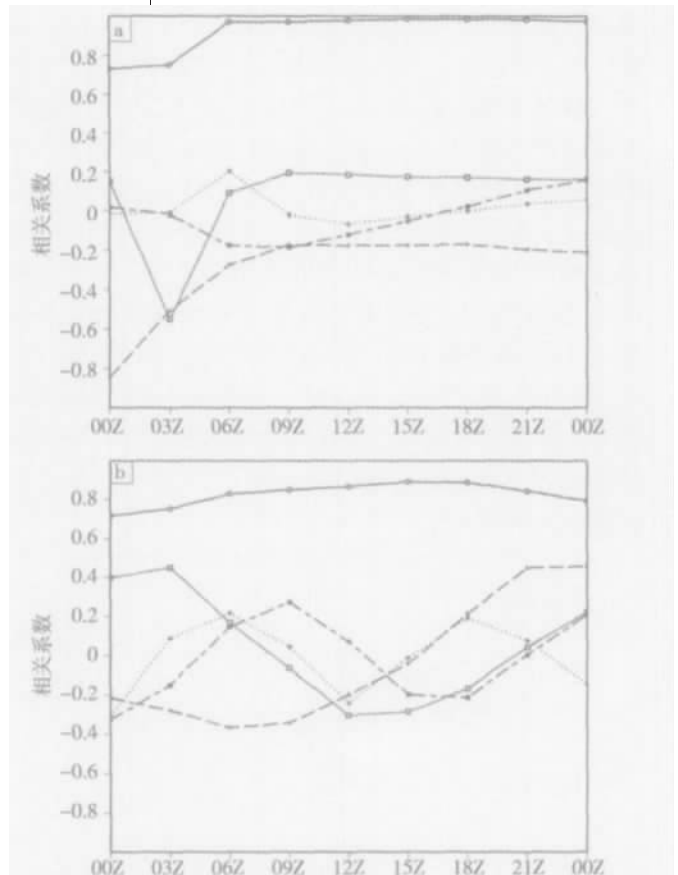


图 5 2001 年 6 月 6 日 00 时至 7 日 00 时暴雨过程 500 hPa 位势高度场(a)和 700 hPa 相对湿度场(b)的前 5 个主分量相关系数时间剖面图

—— 第一主分量 ——— 第二主分量 - - - 第三主分量
- - - 第四主分量 第五主分量

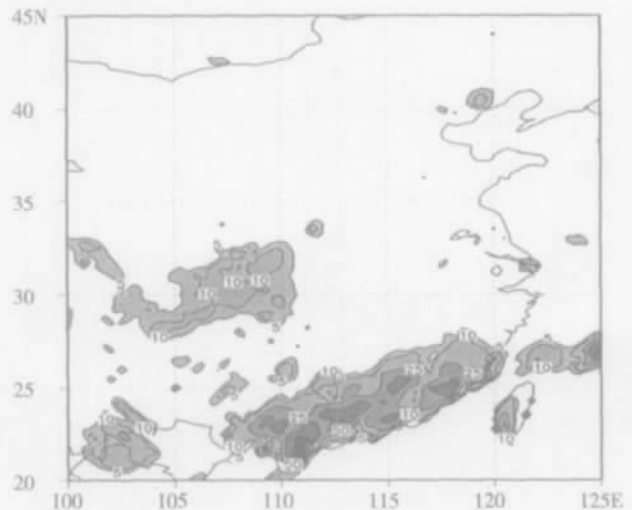


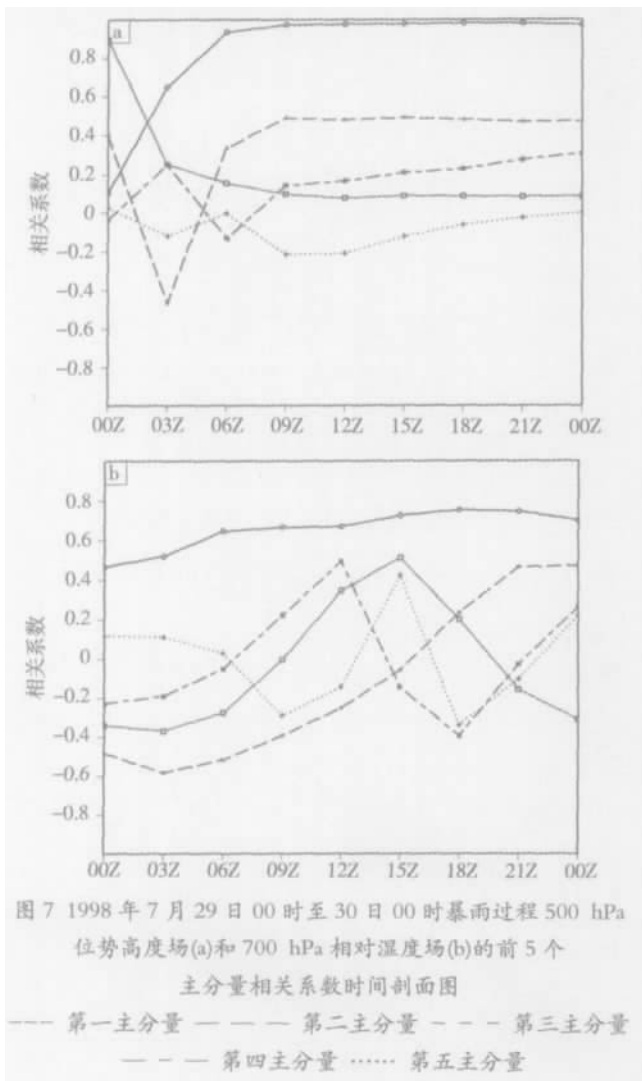
图 6 2001 年 6 月 6 日 00 时至 7 日 00 时 STN_DAT 初值叠加主要误差的 24 h 降水预报

2d), 模式预报结果得到明显改进, 雨带分布与实况更为一致, 降雨中心强度和位置与实况更为接近。

5.3 江淮暴雨型初值误差分析及模式验证

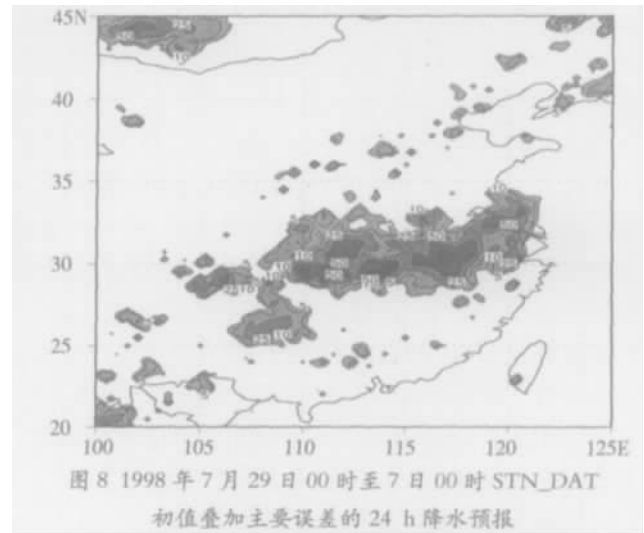
1998 年 7 月 29 日 00 时至 30 日 00 时的暴雨过

程属江淮暴雨型,由图 3 可以看出,对于 5 种初值方案结果,STN_EC 初值方案的预报效果最好,较好地再现了暴雨雨带走向和强降水中心,而 NCP_DAT 初值方案的模式预报最不理想,我国西南部的降水区和淮河降水中心均漏报。因此,以 NCP_DAT 初值试验作为控制试验进行 24 h 预报,并将其每隔 3 h 的预报结果与 STN_EC 初值试验对应结果进行比较,获取两者风场、温度场、位势高度场和相对湿度场误差的时间序列,用初值误差 EOF 分析方法得到这些要素场误差的各个主分量(选择 5 个误差主分量模态)和误差场相关系数随预报时间变化。图 7a、b 分别给出了 500 hPa 位势场和 700 hPa 相对湿度场的前 5 个误差主分量模态的相关系数变化。



由图 7 可见,500 hPa 位势高度场第一误差主分量的相关系数随预报时间增加而增大并接近于 1.0,而其它的误差主分量相关系数基本上随预报时间增加而比较小(图 7a);700hPa 相对湿度场第一误差主分量的相关系数随预报时间增加而维持一个比较大的值,而其它的误差主分量相关系数基本上随预报时间增

加而在零线附近上下振荡(图 7b)。因此,将这些场的第一误差主分量模态作为主要初值误差源提取出来,并据此得到控制试验 NCP_DAT 初值的修正量,以修正后的初值进行模式预报。图 8 给出了对 NCP_DAT 初值作修正后进行 24 h 模式预报的降水量分布。

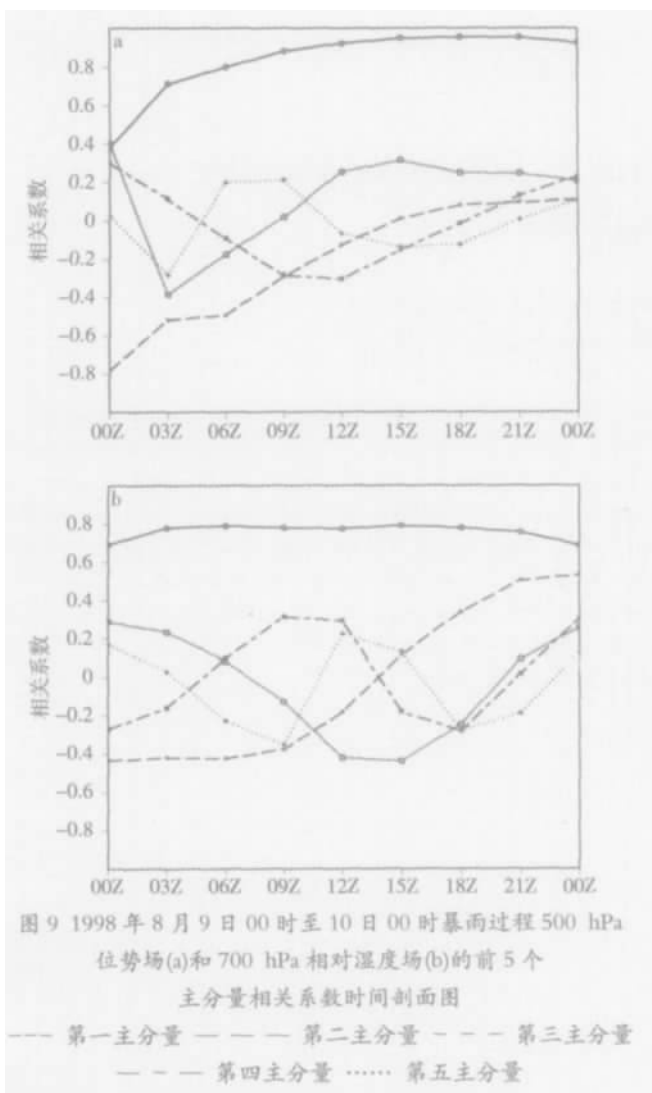


由图 8 可看到,与 NCP_DAT 初值试验结果相比(见图 3e),模式预报结果得到明显改进,漏报的我国西南部的降水中心和淮河降水中心均被再现出来,雨带分布与实况更为一致。

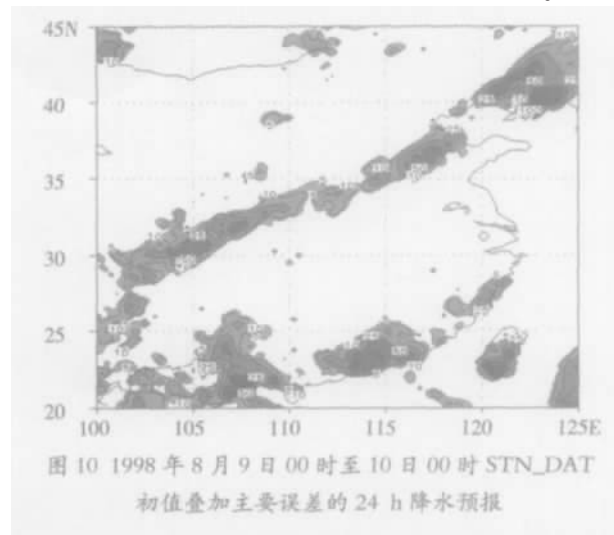
5.4 黄淮暴雨型初值误差分析及模式验证

1998 年 8 月 9 日 00 时至 10 日 00 时的暴雨过程属黄淮暴雨型,由图 4 可见,对于五种初值方案结果,STN_EC 初值方案的预报效果最好,较好地再现了暴雨雨带走向,强降水中心强度和位置与实况比较一致,而 NCP_DAT 初值方案的模式预报最不理想,我国山东半岛的降水区和降水中心基本漏报。因此,以 NCP_DAT 初值试验作为控制试验进行 24 h 预报,并将其每隔 3 h 的预报结果与 STN_EC 初值试验对应结果进行比较,获取两者风场、温度场、位势高度场和相对湿度场误差的时间序列,采取与上节同样的方法得到这些要素场误差的五个主分量相关系数随预报时间的变化。图 9a、b 分别给出了 500 hPa 位势高度场和 700 hPa 相对湿度场的前 5 个误差主分量模态的相关系数随预报时间的变化。

由图 9 可见,500 hPa 位势高度场第一误差主分量的相关系数随预报时间增加而增大并接近于 1.0,而其它的误差主分量相关系数基本上随预报时间增加而比较小(图 9a);700hPa 相对湿度场第一误差主分量的相关系数随预报时间增加而维持一个比较大的值,而其它的误差主分量相关系数基本上随预报时间增加而在零线附近上下振荡(图 9b)。因此,将这些场的第一误差主分量模态作为主要初值误差源提取出来,并



据此得到控制试验 NCP_DAT 初值的修正量,以修正后的初值进行模式预报。图 10 给出了对 NCP_DAT 初值作修正后进行 24 h 模式预报的降水量分布。



从图 10 中可以看到,与 NCP_DAT 初值试验结果相比(见图 4e),模式预报结果得到了较大的改进,我国山东半岛的暴雨中心被再现出来,雨带分布与实况

更为一致。

6 结论与讨论

依据历时 15 年降水观测资料的暴雨分型,选取华南暴雨型、江淮暴雨型和黄淮暴雨型等三类型中具有代表性的暴雨过程,采用 AREM 模式以不同资料分析场(常规观测资料、NCEP 和 ERA40 同化分析资料)作为初值进行了暴雨后报对比试验;另外,采用初值误差的 EOF 分析方法对三类暴雨型的典型暴雨过程进行了初值主要误差的提取及其对暴雨数值预报的影响试验。初步得到以下结论。

(1)无论对于哪种类型的暴雨过程,不同资料初值的差异均可对模式预报结果产生明显影响;初值方案的好坏同模式预报的具体暴雨过程有着较密切联系,具有不确定性。

(2)采用的初值误差 EOF 分析方法,能比较好地找出暴雨数值预报初值的主要误差源,这为深入分析和研究暴雨数值预报初值不确定性的主要因素以及观测敏感区提供了基础。

(3)寻找和消除初值的主要误差,将能很大程度地改进我国南方暴雨数值预报的准确性,对提高暴雨数值预报水平具有重要作用。

此文的研究重点是,针对不同的暴雨类型,探讨初值差异对暴雨数值预报的影响,通过使用初值误差 EOF 方法,找出暴雨数值预报初值的主要误差源,并初步分析了消除初值主要误差的重要作用和意义。但对于初值主要误差的结构和特点等问题,尚有待于今后展开深入研究。

参考文献:

- [1] 宇如聪,徐幼平. AREM 及其对 2003 年汛期降水的模拟[J]. 气象学报, 2004, 62(6): 715-724.
- [2] 李鲲,徐幼平,宇如聪,等. 梅雨锋上三类暴雨特征的数值模拟比较研究[J]. 大气科学, 2005, 29(2): 236-248.
- [3] Lorenz E N. Deterministic non-periodic flow [J]. J Atmos Sci, 1963, 20: 130-141.
- [4] Zhang D L, Fritsch J M. A case study of the sensitivity of numerical simulation of mesoscale convective system to varying initial conditions [J]. Mon Wea Rev, 1986, 114: 2418-2431.
- [5] 宇如聪,徐幼平. REM 对“98.7”武汉特大暴雨过程的数值模拟[J]. 中国学术期刊文摘, 2001, 7: 362-365.
- [6] 贝耐芳,赵思雄. 初值及物理过程对“98.7”暴雨预报结果的影响[J]. 气候与环境研究, 2002, 7: 386-396.
- [7] 张昕,刘月巍,王斌,等. “98.7”特大暴雨降水资料的四维变分同化研究 [J]. 自然科学进展, 2003, 13: 1129-1333.
- [8] 宇如聪,徐幼平. AREM 暴雨数值预报模式 [C]//LASG Report. 2004

(13):53-68.

//国家 973“中国暴雨”项目研究专著系列丛书(六).北京:气象出版社,2004:11-42.

[9] 宇如聪,薛纪善,徐幼平等.AREMS 中尺度暴雨数值预报模式系统[M]

Preliminary Studies on the Effect of Initial Uncertainties on Heavy Rainfall Forecast

XU You-ping,JIANG Hong-feng,LI Kun,CHENG Rui
(*Beijing Institute of Applied Meteorology,Beijing 100029*)

Abstract: This paper focused on studies on the effect of initial uncertainties on heavy rainfall forecast. Based on statistical heavy rainfall patterns from historical rainfall data for fifteen years, typical heavy rainfall processes were chosen from heavy rainfall patterns of Huanan, Jianghuai and Huanghuai, and then were simulated using AREM with different types of initial data including conventional observations, NCEP data and ERA40 Reanalyses data. The result suggested that for all cases from three kinds of the heavy rainfall patterns, difference between ingested initial data resulted in difference between heavy rainfall forecast. And then EOF analysis method was used to analyze initial errors of all types of heavy rainfall and their evolution to obtain major error components. At last, sensitivity experiments were performed to analyze and validate the effect of those major errors on numerical forecast, which suggested, finding and eliminating those major initial errors is important for improvement of heavy rainfall forecast.

Key words: Heavy rainfall; Numerical prediction; Initial uncertainty; EOF error analysis