

中国夏季模式降水方案的应用分析研究

徐国强,薛纪善

(中国气象科学研究院,北京 100081)

摘要:通过对我国夏季一次连续降水过程的模拟分析,研究了不同云降水方案在中国区域的应用特征。结果指出,使用不同的积云对流参数化方案,模拟产生的积云降水是有差异的,并且由于积云对流参数化方案的不同,也会引起网格尺度降水产生差异。

关键词:降水方案;积云降水;网格尺度降水

中图分类号: P458.3

文献标识码: A

引言

数值模式中的湿物理过程对数值预报的准确性具有非常重要的影响。云降水过程是数值模式中最重要非绝热加热物理过程之一,成云降雨过程发生以后通过感热、潜热和动量输送等反馈作用影响大尺度环流,并在决定大气温度、湿度场的垂直结构中起着关键的作用,也是人们最为关心的降水预报的关键所在。

云降水方案主要有次网格积云对流参数化方案和网格尺度显式降水方案两大类。对流参数化最早始于上世纪 50 年代中期,现已提出了许多各种各样的方案,主要分成两大类:浅对流参数化方案和深对流参数化方案。浅对流过程又被称为非降雨性对流过程;深对流过程又被称为可降雨性对流过程,它不仅会引起水热场垂直结构的改变,也会产生净的潜热释放和对流降雨。深对流参数化方案主要有抽吸式方案^[1]、湿对流调整方案^[2~4]、对流侵入式方案^[5~6]、对流质量通量式方案^[7~8]、对流有效位能释放式方案^[9~11]等。通常显式降水方案可根据是否包含有冰相过程分为暖云方案^[12]和混合相云方案^[13]。显式降水方案有明确的物理基础,但在中尺度模式格距还远未达到全部显式计算云过程的情况下,人们尝试用积云对流参数化方案计算次网格尺度降水,用显式降水方案计算网格尺度降水,两者的结合称之为全物理过程方案或混合方案。这两类方

案在实际应用中的一个非常重要的问题就是,它们在不同时间和不同天气过程中具有什么关系,哪一种占有主导地位,从而为实际天气预报提供更加深入细致的参考。在湿物理过程中,云降水方案的开发、选择以及应用是非常重要的科学问题,也是当前数值预报研究的热点。

本文首先简单介绍了常用的两个积云对流参数化和一个混合相云降水方案的基本原理,利用美国最新发展的中尺度数值预报模式(WRF),通过对我国江淮流域夏季降水过程的模拟,研究了在中国夏季云降水方案的选择问题,对所应用降水方案的特征进行了讨论,并初步研究了不同积云对流方案对网格尺度降水预报的影响特征。

1 模式云降水方案简介及试验方案设计

1.1 云降水方案介绍

1.1.1 Betts 和 Miller 对流参数化方案介绍

对流调整水热场参考廓线的选择是对流调整式方案的重要内容。Manabe^[2](1965)取“平均湿静态能线”作为参考廓线,而 Betts^[4](1986)取“观测的准平衡状态线”或修正的湿绝热线作为深对流调整参考廓线,“混合线”(mixingline)作为浅对流调整参考廓线。

对流调整新方案需要解决的问题是确定:对流调整特征时间 是否进行对流调整和对流调整水热

收稿日期:2003 - 12 - 05;改回日期:2003 - 12 - 28

基金项目:本文得到国家“十五”科技攻关项目(2001BA607B03)资助

作者简介:徐国强(1964 -),男,河北保定人,博士、副研究员,主要从事数值模式开发和应用研究

场参考廓线 $T_{a1} q_a$ 。

a. 深对流调整过程

深对流调整的控制条件是调整前后气柱的湿静态能守恒

$$\int_{p_r}^{p_a} (h - \bar{h}) = 0$$

式中 $h = g \cdot z + c_p \cdot T + L \cdot q$ 为静态能。

确定对流调整的初估值后,再根据湿静态能守恒的控制条件对初估值进行修正。确定对流调整水热场参考廓线后,估算降雨量。

b. 浅对流调整过程

浅对流调整的控制条件是气柱无对流降雨发生,即

$$\int_{p_r}^{p_a} \frac{q_a - \bar{q}}{g} \cdot \frac{dp}{g} = \frac{C_p}{L} \int_{p_r}^{p_a} \frac{T_a - \bar{T}}{g} \cdot \frac{dp}{g} = 0$$

在浅对流调整过程中,假设饱和气压差从云底到云顶保持不变,参考热力廓线与混合线平行。

虽然 Betts 和 Miller 对流参数化方案不能详细地描述出积云对流参数化与环境强迫场之间的相互作用,但该方案有两个特点:一是同时考虑了深、浅对流过程的影响作用;二是采用虚湿绝热线(修正的湿绝热线)作为对流调整参考廓线。

1.1.2 Kain - Fritsch^[11]对流参数化方案

Kain - Fritsch 方案(1990)是在 Fritsch - Chappell^[10]方案(1980)基础上发展起来的。Fritsch - Chappell 方案认为,大气中的对流有效位能可直接用于控制或调整积云对流发展过程,描述积云过程对环境场的反馈作用。Kain - Fritsch 方案考虑了卷入、卷出、上升支气流、下沉支气流等情况,引入了一维卷入/卷出烟雨流模式,垂直运动中考虑了凝结物的拖曳作用,对抬升凝结高度处气块浮沉判据进行了修正,由云底高度和风垂直切变共同确定降水有效率,用云底和 500hPa 即对流层中层的平均风来计算对流特征时间。此方案避免追踪单个小云块的路径,而是在假定聚集的混合空气块的质量分布下,积分产生净卷入/卷出率,新模式提高了对流参数化方案对云尺度环境的敏感性,这主要是由于引进了云量侧面卷出率的物理真实估计和在云层中允许上升气流质量通量随环境条件变化。

1.1.3 NCEP simple ice 云方案(NCEPCLOUD3)

这个方案是 Hong 等^[13](1998)提出的,并经过一些修正,增加了冰的沉降过程效应。它是一种包含冰相过程的云方案,具体包括三种水物质,即水汽、云水/云冰和雨/雪。云水/云冰被认为是一种水

物质,它们是通过温度区分的,当其温度低于或等于冰点温度,即低于零摄氏度时,认为是云冰;其它情况认为是云水。同样雨/雪也被认为是一种水物质,根据其是否高于或不高于零摄氏度划分为雨或雪。

1.2 数值试验方案设计

本文所用模式为美国最新发展的新一代中尺度数值预报模式(WRF),WRF 模式采用 Arakawa - C 跳点格点和全压缩非静力动力框架,其坐标采取质量地形追随坐标与高度地形追随坐标可选。物理过程包括云微物理显式降水、次网格积云对流参数化、长波辐射、短波辐射、陆面过程、边界层过程和次网格扩散等物理过程。程序语言采用 FORTRAN90 自由格式,程序结构为模块化、标准化分层设计。

本文重点研究中国区域云降水方案的选择和应用状况,模式格距取 20km,采用质量地形追随坐标,其他物理过程均取一致,以便研究讨论中国区域夏季不同云降水方案的应用和对预报降水的影响。

本文设计了两种数值试验方案,分别通过对 2002 年中国长江中下游区域夏季一次降水过程的模拟分析,研究了不同云降水方案在中国的应用特征,并进行了深入的讨论。模式所用资料为美国 AVN 分析资料。

试验(1):选用 Betts - Miller 次网格积云参数化方案和网格尺度显式降水方案(NCEPCLOUD3 方案),简称为 EXP1。

试验(2):选用 Kain - Fritsch 次网格积云参数化方案和网格尺度显式降水方案(NCEPCLOUD3 方案),简称为 EXP2。

2 中国夏季降水方案应用分析

2.1 实况

2002 年 6 月 19 日至 6 月 25 日我国中东部地区连续降雨,图 1 分别给出了 2002 年 6 月 22 日 08 时~25 日 08 时 24h 降水量分布。由图可见,6 月 22 日 08 时至 6 月 23 日 08 时(图 1a)我国江淮流域、华北中东部和东北南部有大片降水区,强降水区呈带状分布,其中长江北部、淮河南部降水最强,河南南部、湖北北部、安徽北部和江苏北部地区 24h 降水量均超过 50mm,达到暴雨量级,其中在河南南部安徽西部部分地区 24h 降水量均超过 100mm,达到大暴雨量级。6 月 23 日 08 时至 6 月 24 日 08 时(图 1b),降雨范围有所减小,强降雨带缓慢南压,位于长江和淮河之间,在合肥、南京至上海一线仍有暴雨,

在合肥的西部仍有大暴雨出现。6月24日08时至6月25日08时(图1c),随着来自北方的冷空气侵入,降雨区范围更加缩小,分裂成南北两片,长江以

北地区降水减弱或消失,较强降雨带减弱并南移到江南地区,只在浙江省的中部仍有暴雨出现,其他地区基本上没有强降雨。

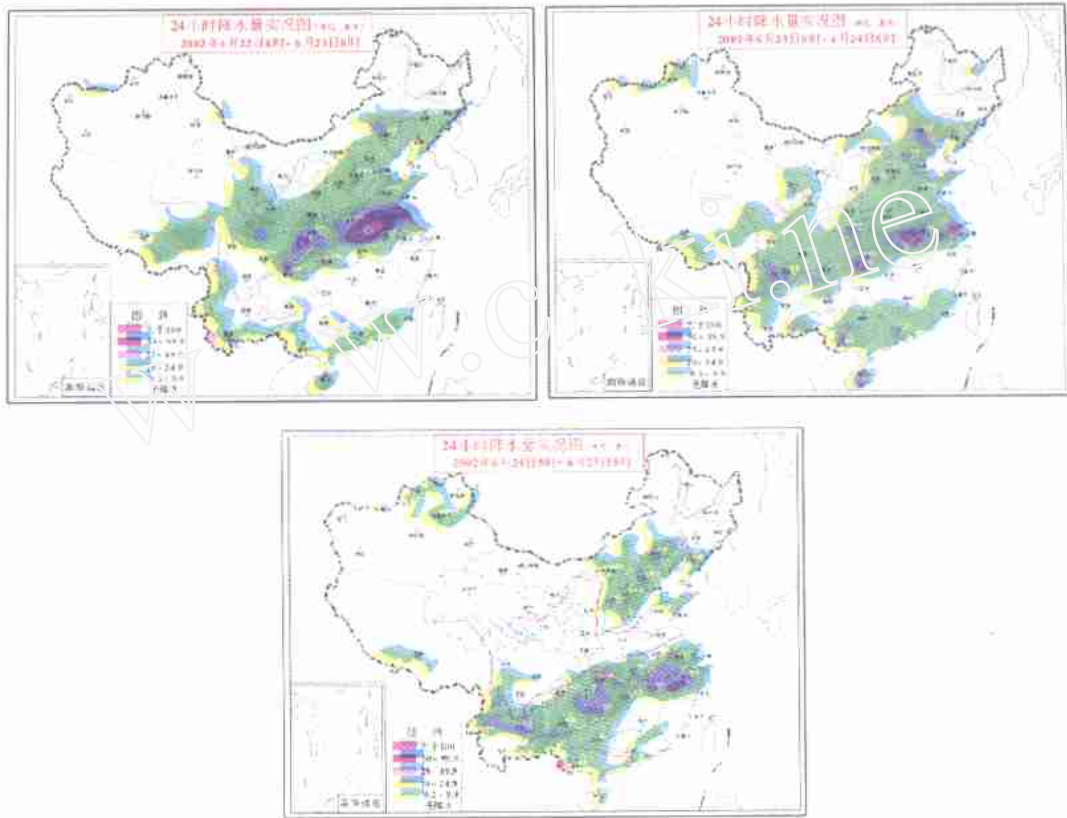


图1 2002年6月22日08时~25日08时中国区域逐日降水量分布

Fig.1 Distribution of daily precipitation from 2002 - 06 - 25 T08 to 2002 - 06 - 25 T08 in China

2.2 不同积云对流方案对次网格积云对流降水预报的影响分析

图2分别为使用 Betts - Miller (BM) 积云参数化方案时(EXP1)2002年6月22日08时~25日08时每24h对流降水预报。图3分别为使用 Kain - Fritsch (KF) 积云参数化方案时(EXP2)2002年6月22日08时~25日08时每24h对流降水预报。比较图2a和图3a可见,在6月22日08时~23日08时的降水预报中(即0~24h预报),KF方案与BM方案对流降水预报的范围基本一致,在淮河流域都有明显的降水并且呈带状分布,在长江以南和36°N以北地区,基本没有对流降水存在;两图的主要区别是KF方案的对流降水强度要高于BM方案,强降雨区的位置也存在差异,KF方案预报的强降雨区位置比BM方案预报的要偏南一些。

对比图2b和图3b,在6月23日08时~24日08时的降水预报中(即24~48h预报),KF方案与BM方案对流降水预报的雨区范围仍基本一致,在

江淮流域都有明显的降水并且呈带状分布,与前24h降水预报相比均缓慢南压;两图的主要区别是,强降雨区的位置仍存在差异,KF方案预报的强降雨区位置比BM方案预报的稍微要偏南一些,与前24h预报的两者差异一致,但KF方案的对流降水强度要弱于BM方案,这与前24小时预报两者的差异正好相反。在6月24日08时~25日08时的降水预报中(即48~72h预报),同样比较图2c和图3c可得,原在江淮流域的强降水带均明显南压到长江流域,预报的雨区范围大致相似,但从预报的强降雨区位置来看,KF方案比BM方案预报的稍微要偏南一些,KF方案预报的雨带宽度也比BM方案预报的稍微要窄一些,两个方案降水预报的强度基本相似。

将图2、图3与降水实况(图1)比较,可以看出,两个方案预报的强对流降水均呈现出带状结构,与实况一致;但两者预报的强降雨区位置均比实况偏北一些,强度也弱一些,KF方案比BM方案预报的

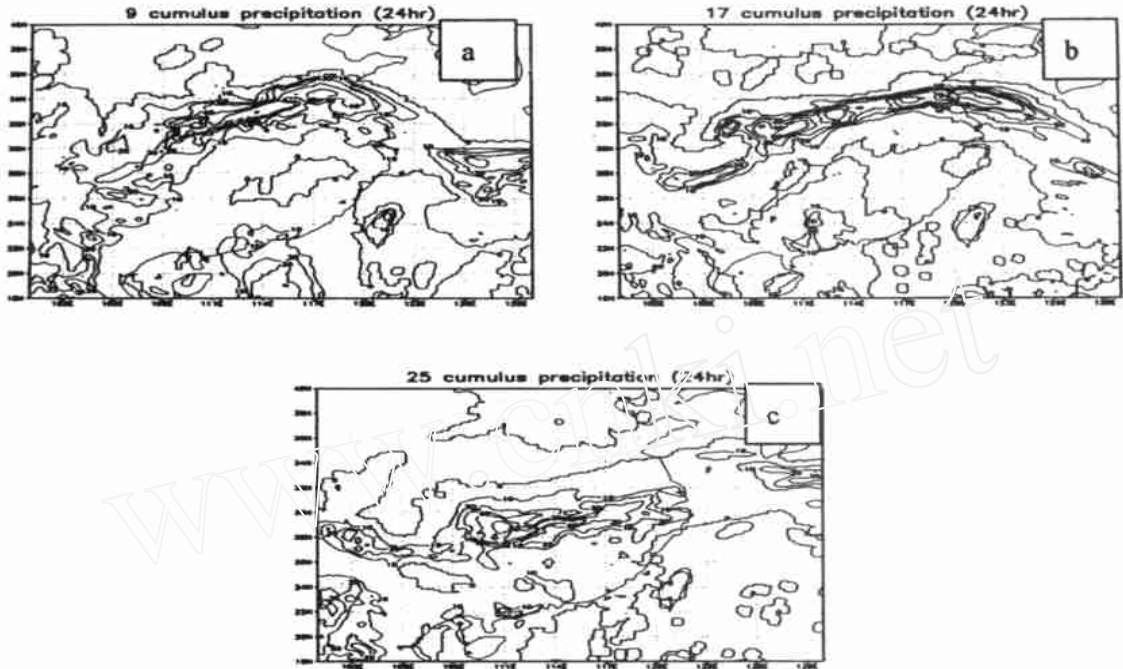


图2 EXP1时2002年6月22日08时~25日08时每24h对流降水预报

Fig.2 Daily forecasting convective precipitation from 2002 - 06 - 22 T08 to 2002 - 06 - 25 T08 in EXP1

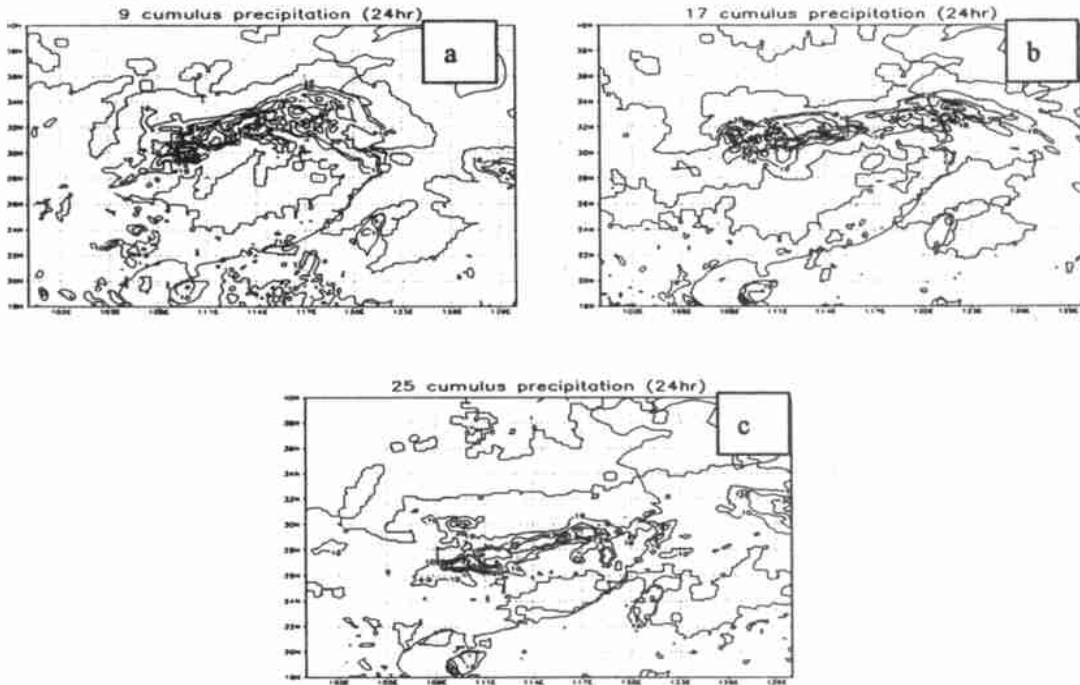


图3 EXP2时2002年6月22日08时~25日08时每24h对流降水预报

Fig.3 Daily forecasting convective precipitation from 2002 - 06 - 22 T08 to 2002 - 06 - 25 T08 in EXP2

强降水区位置更接近于实况,综合来看,KF方案对本次连续降水过程的预报要优于BM方案。

2.3 不同积云对流方案对网格尺度降水预报的影响分析

积云对流与大尺度环流和周围环境大气的相互作用是一个极其复杂的非线性过程,至今依然是气象学者面临的最具有挑战性的难题之一。对流触发和启动后,大气加热、变干效应的垂直分布状况,还

需要深入研究,对大尺度系统和周围环境大气的反馈作用还缺乏深入的了解。本文在此着重研究不同积云对流方案对网格尺度降水预报的影响。积云对流影响了周围大气环境场的分布状况,即使大气的温度和湿度分布状况发生了改变,必然也会引起网格尺度云物理过程的变化。首先给出对网格尺度降水影响的结果。图 4(a, b, c, d) 分别为 EXP1 和 EXP2 第 0~24h 和 24~48h 网格尺度降水预报场。由图可见,在 0~24h 网格尺度降水预报中,EXP1 (图 4a) 和 EXP2 (图 4b) 网格尺度降水范围比较相似,但 EXP2 中的网格尺度降水强度比 EXP1 的要大,在图 4b 中,降水中心位于河南中部、山东南部 and 湖北北部,另外在河套的西部也有一个降水中心,中心强度均达 50mm;在 EXP1 中,只在河套西部有一

个降水中心,中心强度只有 20mm。在图 4c 和图 4d 中,与前面图 4a 和图 4b 比较的异同类似,两者的雨区范围基本一致,在长江以北地区大部分都有网格尺度的显式降水产生,在这个降水范围内都各有 4 个中心,但 EXP2 中的降水中心均比 EXP1 的降水中心区域要大一些,中心强度要强一些。

以上分析说明,由于积云对流参数化方案的不同,使周围环境大气结构发生了不同的变化,引起网格尺度降水产生差异。为深入了解网格尺度降水产生这种变化的原因,本文从对降水有非常重要影响的气象要素场出发,研究了在应用不同积云对流方案时垂直速度、湿度和温度场的变化及其可能原因。

这次降水过程范围很大,某一定点气象要素的变化可能对整个降水过程不具有代表性,在此主要

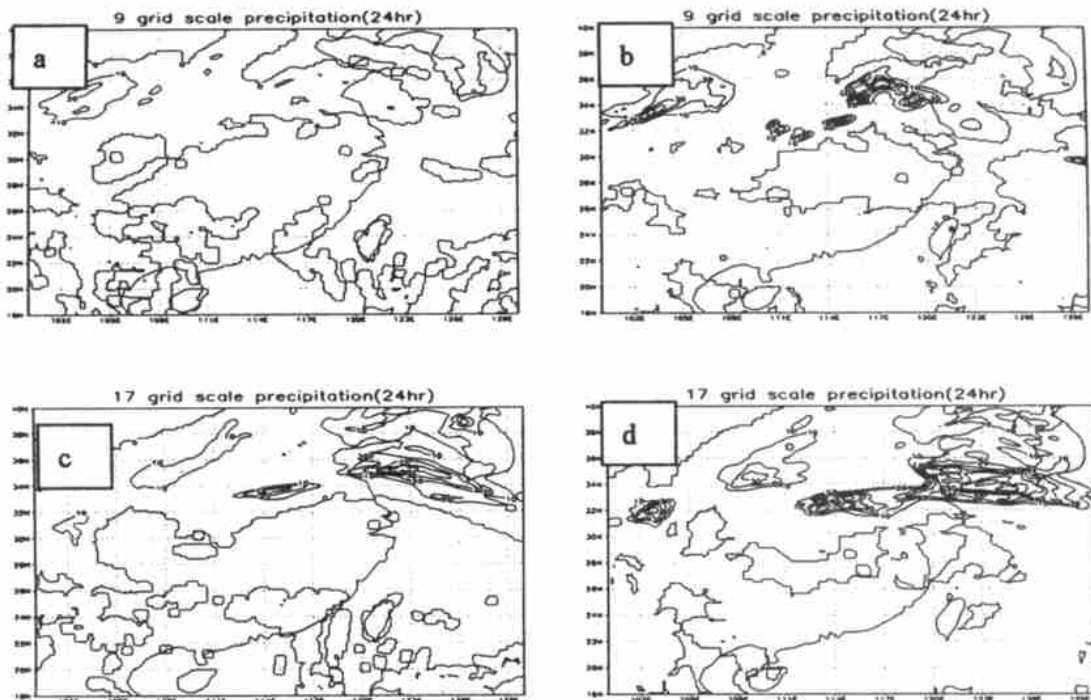


图 4 EXP1 和 EXP2 第 0~24h (图 a, b) 和 24~48h (图 c, d) 网格尺度降水预报

Fig. 4 Forecasting grid scale precipitation from 0~24h (a, b) and 24~48h (c, d) in EXP1 and EXP2

研究网格尺度降水变化的原因。为此选取在两种网格尺度降水都具有明显降水的区域,对该区域要素做面积平均,用要素的平均变化研究降水变化的原因。分析图 4,取 (33~35°N, 112~120°E) 为 EXP1 研究区域,取 (32~34°N, 112~120°E) 为 EXP2 研究区域,分别对这两个区域的垂直速度和湿度场做区域平均,然后将平均要素场对应相减 (EXP2 减去 EXP1) 得到图 5。在垂直速度的差值图上 (图 5a),在对流层低层 600hPa 以下,基本上为零

值区;600hPa 以上,基本上正值区,只是在 23 日 00Z~10Z 时段内,存在负值区。这说明在模式积分 48h 产生明显降水的区域中,EXP2 的上升气流大部分时间都比 EXP1 中的上升气流深厚,即 EXP2 中的上升气流高度可以比 EXP1 中的更高,特别是在 23 日 13Z~24 日 00Z 时段内,EXP2 的上升气流在 500hPa 以上比 EXP1 高出 0.02~0.08 $m \cdot s^{-1}$,揭示出 EXP2 中上升气流具有比 EXP1 中的明显深厚的特征。在相对湿度的差值图上 (图 5b),由图可见,

从 22 日 00Z~23 日 12Z 时段内,EXP2 中的相对湿度在整层大气都比 EXP1 中的要大 0~8 左右,只是在 23 日 14Z~24 日 00Z 时段内,650~280hPa,EXP1 中的相对湿度要大于 EXP2。通过对图 5 分析可得出,在此次暴雨过程中,EXP2 中大部分时段内,其上升气流和湿度比 EXP1 中的要强或大,即 EXP2 的周围环境场与 EXP1 相比更有利于降水的产生,说明 Kain - Fritsch 积云参数化方案和 Betts - Miller 可以使周围环境大气状况发生不同的变化,Kain - Fritsch 方案可以使周围环境大气变得更湿、上升气流更加深厚,更有利于降水的产生,这也揭示出不同积云对流方案对网格尺度降水具有重变的影响。

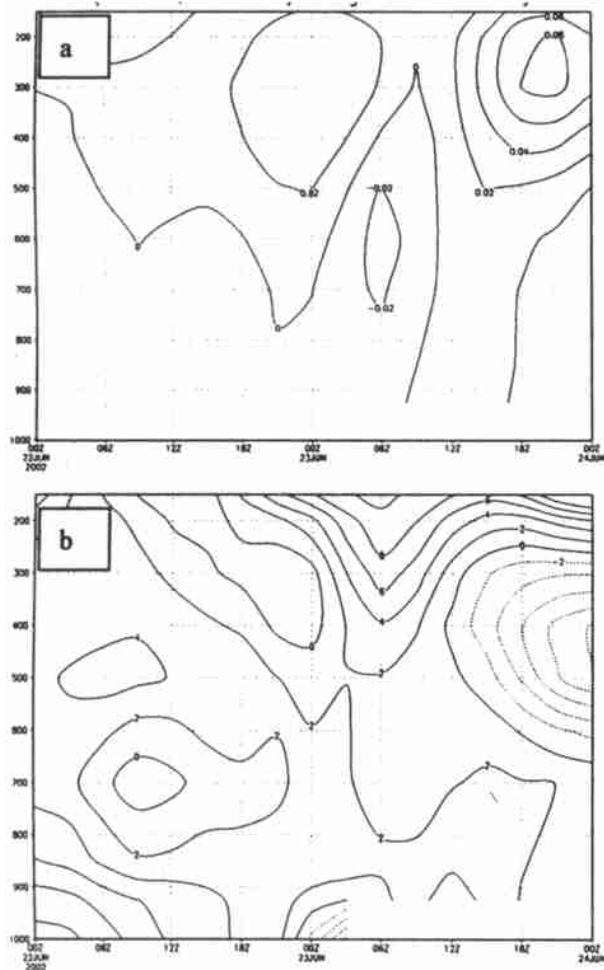


图 5 区域平均 EXP2 减去 EXP1 垂直速度 (a) 和湿度场 (b)
Fig. 5 Differences of vertical velocity (a) and relative humidity (b) in regional average between EXP2 and EXP1

3 结论与讨论

3.1 对中国长江中下游区域夏季一次降水过程的模拟分析表明,KF 方案和 BM 方案预报的强降水

区位置均比实况偏北一些,强度也弱一些,KF 方案比 BM 方案预报的强降水区位置更接近于实况,综合来看,KF 方案对本次连续降水过程的预报要优于 BM 方案。

3.2 由于积云对流参数化方案的不同,使周围环境大气结构发生了不同的变化,引起网格尺度降水的差异。

参考文献:

- [1] Charney, Eliassen A. On the growth of the hurricane depression [J]. *J Atmos Sci*, 1964, (21) : 68 - 75.
- [2] Manabe S, Smagorinsky J, Strickler R F. Simulated climatology of a general circulation model with a hydrological cycle [J]. *Mon Wea Rev*, 1965, (93) : 769 - 798.
- [3] Betts A K. A new convective adjustment scheme. Part I, Observation and theoretical basis [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1986, (112) : 677 - 691.
- [4] Betts A K, Miller M J. A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, and arctic air - mass data sets [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1986, (112) : 693 - 709.
- [5] Kuo H L. On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection [J]. *J Atmos Sci*, 1965, (22) : 40 - 63.
- [6] Kuo H L. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large scale flow [J]. *J Atmos Sci*, 1974, (31) : 1 232 - 1 240.
- [7] Arakawa A, Schubert W H. Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large scale environment, Part 1 [J]. *J Atmos Sci*, 1974, (37) : 674 - 701.
- [8] Grell G A. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterization [J]. *Mon Wea Rev*, 1993, (121) : 764 - 787.
- [9] Kreitzberg C W, Perkey D J. Release of potential instability, Part 1, A sequential plume model with hydrostatic primitive equation model [J]. *J Atmos Sci*, 1976, (33) : 456 - 475.
- [10] Fritsch J M, Chappell C F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems, Part 1, convective parameterization [J]. *J Atmos Sci*, 1980, (37) : 1 722 - 1 733.
- [11] Kain J S, Fritsch J M. A one - dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization [J]. *J Atmos Sci*, 1990, (47) : 2 784 - 2 802.
- [12] Kessler E. On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation [J]. *Meteor Monogr*, 1969, 10 (32) : 1 - 84.
- [13] Hong S Y, Juang H M H, Zhao Q. Implementation of prognostic cloud scheme for a regional spectral model [J]. *Mon Wea Rev*, 1998, (126) : 2 621 - 2 639.

Application and Study of Precipitation Schemes in Weather Simulation of Summer in China

XU Guo - qiang ,XUE Ji - shan

(Chinese Academy of Meteorological Sciences , Beijing 100081 ,China)

Abstract :With the precipitation simulation of summer in China , the cloud - precipitation schemes of model are examined. Results indicate that convective precipitation is discrepancy with the different convective parameterization schemes in summer , which induces the diversity of grid scale precipitation.

Key words :precipitation scheme , convective precipitation , grid scale precipitation