

冉令坤, 周玉淑. 2011. TRMM 卫星的闪电观测资料在中尺度数值模式中的 Nudging 同化应用研究 [J]. 大气科学, 35 (6): 1145–1158.
Ran Lingkun, Zhou Yushu. 2011. Application of lightning observations of TRMM satellite to the mesoscale numerical model by a new Nudging assimilation adjustment technique [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (6): 1145–1158.

TRMM 卫星的闪电观测资料在中尺度数值模式中的 Nudging 同化应用研究

冉令坤 周玉淑

中国科学院大气物理研究所

摘 要 在以往研究的基础上, 本文提出一种利用 TRMM 卫星闪电观测资料改善中尺度数值模式水物质初始场的 Nudging 同化技术, 这是把物理初始化方法与 Nudging 同化方法相结合的一种技术。根据 TRMM 卫星闪电观测水平分布, 对水汽和云凝结物进行 Nudging 同化, 对积云对流参数化方案进行调整, 改变模式初始水汽和云凝结物场的含量, 以达到提高中尺度数值模式初始场质量的目的。本文把这种 Nudging 同化技术应用于一次短时降水过程的中尺度数值模拟, 结果分析表明, 这种 Nudging 同化技术有利于增加模式初始场中水汽和云凝结物含量, 特别是水汽和云水的含量, 实现水汽和云凝结物的合理空间分布, 改善中尺度数值模式短时降水和云凝结物的预报效果, 这在一定程度上验证了该 Nudging 同化技术的可行性。

关键词 Nudging 同化 TRMM 卫星 闪电观测 云凝结物

文章编号 1006–9895 (2011) 06–1145–14

中图分类号 P405

文献标识码 A

Application of Lightning Observations of TRMM Satellite to the Mesoscale Numerical Model by a New Nudging Assimilation Adjustment Technique

RAN Lingkun and ZHOU Yushu

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract A new nudging assimilation adjustment technique is proposed, which may be used to assimilate the lightning observations of TRMM satellite into the initial fields of the mesoscale numerical model. The technique combines the physical initialization technology with the nudging technology. According to the observed lightning intensity and spatial location, the assimilation technique adjusts the content and spatial distribution of water vapor and five cloud hydrometeors in the initial fields of the numerical model, and thereby improves the initial condition of model and increases the accuracy of 0–6-hour short-term rainfall forecast of the mesoscale numerical model. The nudging assimilation adjustment technique is further used to assimilate the lightning observations of TRMM satellite into the initial conditions of three short-term precipitation events simulated by the ARPS model. The results show that, the assimilation of observational lightning data may increase water vapor and cloud hydrometeors in the initial condition and reasonably rearrange the spatial distribution of water substances. The short-term forecast of precipitation and cloud

收稿日期 2010–12–27, 2011–05–19 收修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-206, 国家自然科学基金资助项目 40875032、40875002、41075098, 中国科学院大气物理研究所领域前沿项目 IAP07201

作者简介 冉令坤, 男, 1974 年出生, 副研究员, 主要从事中尺度动力学和数值模拟研究。E-mail: rlk@mail.iap.ac.cn

hydrometeors by the mesoscale numerical model is effectively enhanced.

Key words Nudging assimilation, TRMM satellite, lightning observation, cloud hydrometeors

1 引言

中尺度数值模式初始场对降水预报的准确率有重要影响,由大尺度模式资料和常规地面探空观测资料经过客观分析产生的模式初始场所包含的中小尺度信息比较有限,以至于模式降水预报存在一定不确定性。为了提高数值模式降水预报的准确率,人们把多种非常规观测资料同化到数值模式中以改善模式初始场的质量。目前,卫星、雷达、GPS、微波辐射计等观测资料已经比较成功地应用于模式初始场的同化调整之中。近些年来,随着闪电探测技术的飞速发展,闪电观测资料凭借其观测范围广、质量可靠、空间分辨率高、不受高山和海洋限制等优点越来越多地受到人们的重视。由于闪电观测资料能够比较准确地探测深对流系统(张廷龙等,2008;冯桂力等,2008;刘冬霞等,2010),并且与降水存在较好的统计对应关系(袁铁和郅秀书,2010),因此把闪电观测资料同化到数值模式中已经成为一个重要的研究课题(郅秀书等,1998,2001;冯桂力等,2007)。Jones and Macpherson (1997) 利用闪电观测资料对中尺度模式的潜热进行 Nudging 连续调整,改善了对副热带气旋的数值预报。Alexander et al. (1999) 和 Chang et al. (2001) 对 1993 年以来的超级风暴和 1998 年 2 月 2 日(土拨鼠日, Groundhog Day) 暴雨进行数值模拟,把闪电资料同化到模式初始场中,取得较好的模拟结果。Mansell et al. (2007) 利用闪电资料同化技术和 COAMPS 模式成功地模拟了深对流系统的发展演变过程。李万彪等(2008)把闪电数据反演的对流降水量等资料同化到数值模式的初始场中,暴雨位置和强度的预报都得到明显的改善。

Brenner (2004) 研究指出大气湿度廓线与夏季强对流降水的分布形态具有显著的相关性。Gallus and Segal (2001) 研究表明在比较干并且存在雷达回波观测的模式区域,增加模式的水汽含量对模式预报有一定程度的改进。Rogers et al. (2000) 根据雷达观测资料主动触发积云对流参数化方案进而提高了数值模式的定量降水预报,其方法基于假设:当次网格尺度扰动比较弱,不能使空气微团达到自

由对流的高度时,或者模式模拟的水汽比较弱,没有实际水汽那么强时,数值模式的积云对流参数化方案不会激发对流。Papadopoulos et al. (2005) 发展一种把闪电实时观测资料同化到气象数值模式的技术,其基本思想是根据闪电发生的时间、出现的位置和频数等信息确定模式区域内湿对流的位置,在湿对流区域内,根据闪电资料,采用如下经验公式 Nudging 同化调整模式的水汽廓线,

$$\begin{aligned} q_1^{\text{ass}} &= q_1^{\text{mod}} + F(q_1^{\text{emp}} - q_1^{\text{mod}}), & q_1^{\text{emp}} > q_1^{\text{mod}} \\ q_1^{\text{ass}} &= q_1^{\text{mod}} & q_1^{\text{emp}} \leq q_1^{\text{mod}} \end{aligned}$$

其中, q_1^{ass} 为调整后的水汽比湿, q_1^{mod} 为模式计算的水汽比湿, q_1^{emp} 为水汽比湿的经验廓线, F 为闪电频数;然后再利用调整后的水汽廓线根据积云对流参数化方案计算模式潜热加热率的垂直廓线,进而使得模式初始场中湿对流与环境背景场趋于协调。Papadopoulos et al. (2005) 的研究表明这种闪电资料 Nudging 同化技术有利于改进和提高数值模式的短期预报,该技术具有一定适用性,修改后可以用于各种数值模式。Papadopoulos et al. (2005) 的闪电同化技术方案在概念上与 Rogers et al. (2000) 的方案类似,在闪电观测的基础上调整数值模式变量,例如湿度和温度廓线等,使得数值模式参数化方案对大气状态的描述更加准确。Papadopoulos et al. (2009) 的研究进一步表明,闪电观测资料能够提供充分的对流尺度信息,因此这种闪电资料 Nudging 同化技术有利于提高数值模式的预报技巧,在局地暴雨预报方面具有一定的潜力。

本文在 Papadopoulos et al. (2005) 研究基础上,针对 ARPS (Advanced Regional Prediction System) 模式(Xue et al., 2001)提出一种新的 Nudging 同化技术,并应用于一次短时降水过程的数值模拟,以此来验证该技术的有效性。这种 Nudging 同化调整技术主要是根据 TRMM 卫星的闪电观测资料,对 ARPS 模式初始场中水汽和五种云凝结物进行 Nudging 同化,同时对积云对流参数化方案进行调整,通过 Nudging 同化调整,促进动力场、热力场和水汽场的协调,以实现提高模式初始场质量,改善 ARPS 模式的旋转加强 (spinup) 问题,增进中尺度数值模式 0~6 小时降水预报效

果的目的。

2 Nudging 同化技术方案

本文利用 TRMM 卫星闪电观测资料对 ARPS 模式水物质初始场进行 Nudging 同化, 该技术方案主要包括三个方面, 即对云凝结物(云水、雨水、云晶、雪和霰)混合比含量的 Nudging 同化、对水汽比湿的 Nudging 同化和对次网格尺度积云对流参数化方案的调整。ARPS 模式是美国 Oklahoma 大学风暴分析与预报中心开发的有限区域非静力平衡数值模式, 既可用于中尺度强对流天气系统的数值模拟, 又可用于超级单体等强风暴的研究。

TRMM 卫星于 1997 年 12 月升空, 载有降水雷达、微波成像仪、闪电成像仪、光与红外扫描仪、云和地球辐射平衡系统等五个探测器。搭载在 TRMM 卫星上的闪电成像探测器(Lightning Imaging Sensor, 简称 LIS) 获取的闪电数据主要包括四类: 事件(event)、组(groups)、闪电(flashes)和区域(areas)。本文采用的闪电观测资料主要是由上述 LIS 闪电数据计算的闪电频数(flashes/min)。

2.1 云凝结物的 Nudging 同化

积云对流与闪电密切相关, 有闪电观测的区域往往也是积云对流比较活跃的区域, 因此由闪电观测资料基本上可以确定积云对流的水平位置和云凝结物的水平范围。利用大尺度模式分析场(例如 NCEP/NCAR 全球最终分析资料)和常规地面探空观测资料产生的模式初始场通常含有少量的云水, 而其它云凝结物的含量非常少, 这也是造成数值模式在 0~6 小时内降水预报结果比较差的一个原因。基于此种认识, 本文采用以下经验公式(1), 根据 TRMM 卫星闪电观测资料对 ARPS 模式初始场中云凝结物进行 Nudging 同化,

$$q_{\varphi,n} = q_{\varphi} \left(1 + \Delta t \frac{L_f}{L_{f,max}} \alpha \beta\right), \tag{1}$$

其中, q_{φ} 代表五种云凝结物(q_c 云水、 q_r 雨水、 q_i 冰晶、 q_s 雪和 q_g 霰)的混合比含量, $q_{\varphi,n}$ 代表 Nudging 同化后的云凝结物混合比含量, $\Delta t = T_s/T_1$ 为 Nudging 的时间权重, 它是积分时间步长 T_s 与 Nudging 同化周期 T_1 的比率, L_f 为观测的闪电频数, $L_{f,max}$ 为模式区域内最大的观测闪电频数, $L_f/L_{f,max}$ 代表对模式格点上的观测闪电频数进行归一

化处理, 给出观测闪电频数的水平分布, α 为与闪电频数等级有关的分段常系数(其值如表 1 所示), 一般情况下闪电频数越高, α 数值也越大, 代表那里的积云对流越活跃, 因此, $(L_f/L_{f,max})\alpha$ 本质上体现的是对不同的闪电频数等级进行不同权重的 Nudging 同化。 β 为与湿热力平流参数(Moist Thermodynamic Advection Parameter, 记为 M_{TP}) 等级有关的分段常系数(其值如表 1 所示)。有研究表明, 湿热力平流参数能够综合表征降水系统典型的动力和热力垂直结构, 进而与降水系统的发展演变有一定的联系(Wu et al., 2011), 其表达式为

$$M_{TP} = \nabla_h(-\mathbf{v} \cdot \nabla \theta) \cdot \nabla_h \theta^*, \tag{2}$$

其中, $\nabla_h = \partial/\partial x \mathbf{i} + \partial/\partial y \mathbf{j}$ 为水平梯度算子, $\nabla = \partial/\partial x \mathbf{i} + \partial/\partial y \mathbf{j} + \partial/\partial z \mathbf{k}$ 为三维空间梯度算子, $\mathbf{v} = (u, v, w)$ 为三维速度矢量, $\theta = T(p_s/p)^{R/c_p}$ 为位温, $\theta^* = \theta \exp[L_v q_{vs}/(c_p T)(q_v/q_{vs})^k]$ 为广义位温。 β 主要被用来限定 Nudging 同化的区域。

表 1 α 、 δ 和 β 的取值
Table 1 The choices of α , δ , and β

闪电频数	α	δ	$M_{TP}/10^{-13} \text{ K}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	β
$L_f \in [0, 5]$	5.1	1.0	$M_{TP} \in [0, 5]$	1.0
$L_f \in [5, 10]$	5.2	6.0	$M_{TP} \in [5, 10]$	1.2
$L_f \in [10, 15]$	5.3	7.0	$M_{TP} \in [10, 15]$	1.3
$L_f \in [15, 20]$	5.4	8.0	$M_{TP} \in [15, 20]$	1.4
$L_f \in [20, 25]$	5.5	9.0	$M_{TP} \in [20, 25]$	1.5
$L_f \in [25, 30]$	5.6	0.5	$M_{TP} \in [25, 30]$	1.6
$L_f \in [30, 35]$	5.7	0.5	$M_{TP} \in [30, 35]$	1.7
$L_f \in [35, 100]$	5.8	0.5	$M_{TP} \in [35, 100]$	1.8

由(1)式可见, 在没有闪电观测的区域(即 $L_f=0$), $q_{\varphi,n}=q_{\varphi}$, 对云凝结物不进行 Nudging 同化。在有闪电观测的区域(即 $L_f>0$), 如果 $\beta=0$ (代表该区域不存在明显的降水系统动力和热力垂直结构或者降水潜力比较小), 那么, $q_{\varphi,n}=q_{\varphi}$, 对该区域的云凝结物不进行 Nudging 同化, 因此, 只有当降水潜力显著(即 $L_f>0, \beta>0$)时才对云凝结物进行 Nudging 同化。

另外, 为了避免 $q_{\varphi,n}$ 在 Nudging 同化周期内无限制的增长, 本文对冰相粒子总量增加一个约束条件, 即

$$\langle q_{s,n} \rangle < M_i, \tag{3}$$

其中,

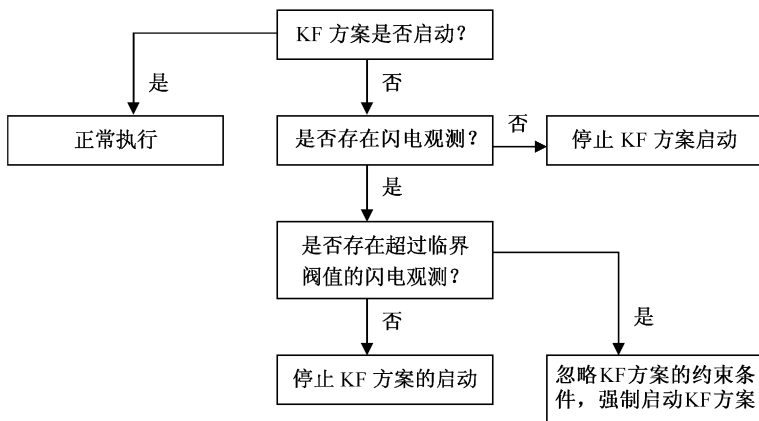


图 1 KF 方案 Nudging 同化调整流程

Fig. 1 Flowchart of modified KF cumulus parameterization

$$\langle q_{s,n} \rangle = \int_{z_s}^{z_t} \rho(q_{i,n} + q_{s,n} + q_{g,n}) dz \quad (4)$$

为垂直积分的 Nudging 同化冰相粒子 (即冰晶、雪和霰) 总量,

$$M_i = 10^{7.59} \cdot L_f^{1.12} \quad (5)$$

为冰相粒子总含量 (M_i) 与 TRMM 卫星观测的闪电频数 (L_f) 之间的经验统计关系 (袁铁和郅秀书, 2010)。(3) 式表明 Nudging 同化冰相粒子总量的上限是 M_i , 在 Nudging 同化周期内, 如果 $\langle q_{s,n} \rangle$ 满足 (3) 式, 那么 Nudging 同化正常进行; 如果 $\langle q_{s,n} \rangle$ 大于 M_i , 那么停止对云凝结物进行 Nudging 同化, 这样使得 Nudging 同化后的云凝结物总量保持在合理范围内。

2.2 水汽的 Nudging 同化

有研究表明, 中尺度模式数值模式的降水预报对水汽初始场很敏感, 虽然影响中尺度模式降水预报的因素有很多, 但水汽初始场结构的合理分布显得尤为重要。因此, 在 Papadopoulos et al. (2005) 研究基础上本文采用经验公式 (6) 对模式水汽初始场进行 Nudging 同化,

$$q_{v,n} = \text{Max} \left[0, q_v + \gamma \Delta t (q_{vs} - q_v) \left(0.1 + \frac{L_f}{L_{f,\max}} \delta \right) \right],$$

$$\gamma = \begin{cases} 1, & \text{当 } q_{vs} - q_v > 0 \text{ 且 } L_f > 0 \text{ 时,} \\ 0, & \text{其它,} \end{cases} \quad (6)$$

其中, q_v 为水汽比湿, q_{vs} 为饱和水汽比湿, $q_{v,n}$ 为 Nudging 同化后的水汽比湿, δ 为与闪电频数等级有关的分段常数 (其取值如表 1 所示), γ 为是否启动 Nudging 同化的开关系数, 其它符号与 (1) 式相同。由 (6) 式可见, 当 $\gamma=1$, 但 $\beta=0$ 时, 仅对闪电观测区的水汽比湿进行微调; 当 $\gamma=1$, 但 $\beta>0$

时, (6) 式根据观测闪电的强度和湿热力平流参数的强度把闪电观测区内的水汽比湿向饱和水汽比湿方向进行 Nudging 同化调整。另外, 在 Nudging 同化周期内如果 q_v 大于 q_{vs} , 那么水汽比湿的 Nudging 同化将中止。

2.3 次网格尺度积云对流参数化方案的调整

在中尺度模式数值预报的初始阶段适当地增加深对流效应, 可以有效地提高模式预报的准确率。为此, 本文在 Nudging 同化周期内根据 TRMM 卫星闪电观测资料, 对 ARPS 模式次网格尺度积云对流参数化方案进行适当的调整, 使模式初始场中包含一定的深对流信息。本文主要对 ARPS 模式的次网格尺度 Kain-Fritsch 积云对流参数化方案 (简称 KF 方案) 进行调整 (流程如图 1 所示), 在每个模式积分时间步长内, 首先检查模式格点上 KF 方案是否已经启动, 如果 KF 参数化方案已经启动, 那么模式时间积分正常执行, 对 KF 参数化方案不做任何强制性调整。如果 KF 参数化方案没有启动, 那么首先判断格点上是否存在观测闪电, 如果格点上存在观测闪电, 那么继续判断格点上的观测闪电频数是否超过临界值, 如果观测的闪电频数大于临界值, 那么可以判定该格点上有深对流发生, 这时忽略 KF 参数化方案触发函数的其它约束条件, 强制启动 KF 参数化方案; 如果观测的闪电频数低于临界值, 那么可以判定格点上对流系统不活跃, 此时不强制启动 KF 参数化方案。

3 Nudging 同化结果分析

把上述 Nudging 同化技术应用到 ARPS 模式

系统中,对 2003 年 4 月 17 日 18 时~18 日 00 时(协调世界时,下同)发生在我国华东地区的短时降水过程进行数值模拟,并分析这种 Nudging 同化技术对模式降水预报的影响。

3.1 Nudging 同化试验设计

针对 2003 年 4 月 17 日 18 时我国华东地区的降水过程,ARPS 模式单层区域的中心点选为(36°N, 117°E),水平格距为 27 km,水平格点数为 77×77,垂直坐标为广义地形高度追随坐标,从地面到模式顶非均匀地分为 43 层,垂直平均格距为 500 m;采用的物理过程方案主要包括, KF 方案, Lin et al. (1983) 简单冰相微物理参数化方案, 大气辐射传输方案和两层土壤模式。

对于这次降水过程,本文利用 ARPS 模式开展三个试验,其中控制试验(简称 Cnl)不考虑水汽和云凝结物的 Nudging 同化以及 KF 参数化方案的调整,以 NCEP/NCAR 全球最终分析资料和常规地面探空观测资料的客观分析场为初始场进行 6 小时的时间积分计算。敏感性试验(简称 Sen)首先读入插值到模式格点上的闪电观测资料,对水汽和云凝结物进行 Nudging 同化,对 KF 参数化方案进行调整,积分时间步长为 30 秒, Nudging 同化周期为 10 分钟,即 Nudging 迭代 20 次,然后以 Nudging 同化 10 分钟的输出结果作为初始场进行 5 小时 50 分钟的常规数值模拟, Sen 的其它配置与 Cnl 相同。为了检验云凝结物和积云对流参数化方案调整与水汽 Nudging 同化调整对模式降水预报影响的相对重要性,本文设计了敏感性试验 Sen_cv, 该试验不包含云凝结物和积云对流参数化方案的调整,但仅保留水汽的 Nudging 同化调整,其它配置与 Sen 相同。

由于本次降水过程中 TRMM 卫星闪电观测主要集中在 2003 年 4 月 17 日 18:10~18:20 时段内,所以本文 Cnl、Sen 和 Sen_cv 模拟初始时间选为 2003 年 4 月 17 日 18:10,模式资料每 10 分钟输出一次。

3.2 预报结果对比分析

2003 年 4 月 17 日 12 时~18 日 00 时在我国华东地区发生一次强降水过程,17 日 18 时观测的 6 小时累积降水区(具体是指时段 17 日 12~18 时观测的累积降水)主要位于我国安徽省北部、河南省东部和山东省西北部,呈东北—西南走向的带状

分布,并逐渐向东南方向移动(图略),18 日 00 时观测的 6 小时累积降水区(具体是指时段 17 日 18 时~18 日 00 时内观测的累积降水)包括南北两块(如图 2 所示),南降水区的主体主要位于我国湖北省和河南省的南部、安徽省中北部以及江苏省中北部大部分地区,强降水中心位于(31.5°N, 115°E);北降水区主要位于辽东半岛周围,大于 40 mm 的强降水中心出现在辽东半岛西端(39°N, 122°E)。途经山东省东部的弱降水区把南、北两块降水区连接成一条狭长东北—西南走向的雨带。17 日 18:10~18:20 观测的闪电频数高值区出现在河南省南部和安徽省北部地区,位于南降水区的中北部。闪电频数高值中心位于(32.5°N, 116°E)附近,并不对应强降水中心。

在卫星云图上(如图 3a 所示),17 日 18 时两块云带分别覆盖我国西南和中东部地区,其中,中东部地区云带的南端位于河南省中南部、安徽省和江苏省的北部,云层较厚,那里也是闪电观测区,存在明显的对流活动。随后,两条云带向东移动,逐渐演变成两条平行分布的东北—西南走向的云带,如图 3b 所示,18 日 00 时东部云带从河南省的西南部,途经安徽和江苏省的北部以及山东省的大部分地区,向东北方向延伸至吉林省的东南部;山东省境内的云层较薄,辽东半岛和河南省的西南部、安徽和江苏省的北部的云层较厚,分别对应地

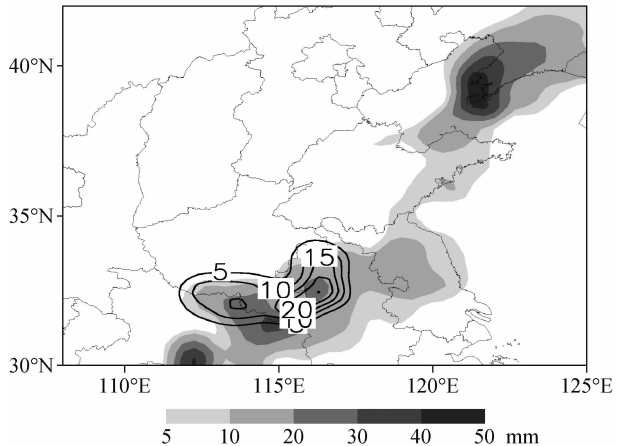


图 2 2003 年 4 月 17 日 18:10~18:20 观测的闪电频数(等值线,单位: min⁻¹)和 18 日 00 时观测的 6 小时累积降水(阴影)
Fig. 2 Observed lightning flash frequency during 1810 UTC - 1820 UTC 17 Apr 2003 (contour, units: min⁻¹) and observed 6-h accumulative rainfall at 0000 UTC 18 Apr 2003 (shading)

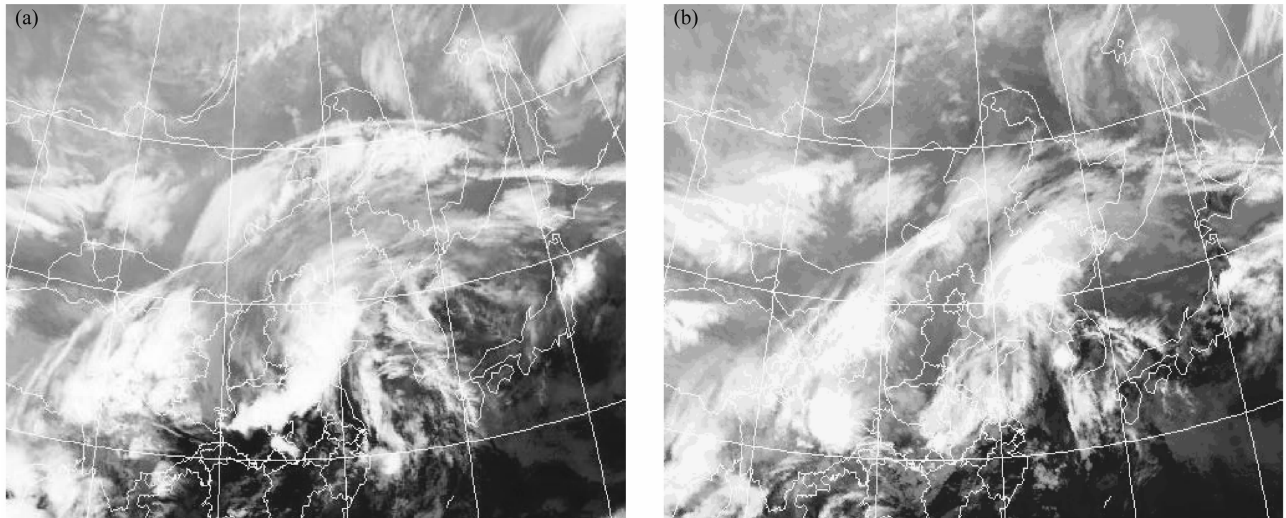


图3 2003年4月(a)17日18时和(b)18日00时Goes9可见光云图

Fig. 3 Goes 9 visible cloud images at (a) 1800 UTC 17 Apr and (b) 0000 UTC 18 Apr, 2003

面南北两块降水区。

对比18日00时观测的6小时累积地面降水(图4a)可以看出,虽然18日00时Cnl模拟的6小时累积降水区(具体是指时段17日18:10~18日00:10模拟的累积降水)也落在观测雨带内,但模拟的南降水区的宽度比观测雨带窄很多,其强度也比实况偏弱。虽然模拟的北降水区在落区上与辽东半岛的观测雨带基本一致,但模拟的中心降水量为20 mm,小于观测的中心降水量(40 mm),因此,从总体上看Cnl模拟的降水区特别是南降水区明显地比实况偏弱。如图4b所示,由于南雨区存在闪电观测,对敏感性试验Sen初始场进行Nudging同化后,Sen模拟的南降水区在落区上与观测基本一致,模拟与观测的降水强度也基本相当,虽然模拟的强降水中心(32°N, 116°E)略偏北于观测的强降水中心(31.5°N, 115°E),但从总体上看,Nudging同化对模式降水预报有一定的改善。北降水区没有闪电观测,没有进行Nudging同化调整,以至于Sen模拟的北降水区与Cnl完全一致,虽然在空间位置上与实况接近,但模拟的降水强度明显地小于实况,这也从侧面说明闪电观测区域内的Nudging同化对模式的短时降水预报有一定的改进作用。另外,Cnl和Sen模拟的北部降水区主要是由可分辨尺度降水(即显示云微物理参数化方案降水)造成的,次网格尺度降水(积云对流参数化方案降水)基本上可以忽略。Cnl模拟的南降水区主要是由次

网格尺度降水引起的,可分辨尺度降水的贡献比较小;Sen模拟的可分辨尺度降水和次网格尺度降水对南降水区都有贡献,其中可分辨尺度降水在强度上和落区上与观测更接近,说明Sen模拟的可分辨尺度降水在南降水区中是主要的。Sen模拟的次网格尺度降水的范围比Cnl略宽,强度相当,表明Nudging同化主要影响显示云微物理过程,对次网格尺度积云对流的影响比较有限。

Cnl和Sen模拟的云凝结物总量(即,云水,雨水,冰,雪与霰混合比含量的和)水平分布如图5所示,二者水平分布形态类似,但在南降水区Sen模拟的云凝结物含量高于Cnl,与观测雨带在空间位置和走向上比较一致,并与观测的东部云带相对应,说明模式初始场经过Nudging同化后,模式能够较好地再现降水云系。

上述分析表明,利用闪电观测资料对模式初始场进行Nudging同化,可以促进初始水物质场的合理分布,对模式短时降水和云凝结物的预报效果有一定的改进和提高。同时也说明,本文提出的水汽和云凝结物Nudging同化以及KF参数化方案调整技术在实际数值模拟应用中是可行。

本文进一步诊断分析了云凝结物和积云对流参数化方案调整与水汽Nudging同化整调对模式降水预报影响的相对重要性(如图6a所示),18日00时Sen与Sen_cv模拟的6小时累积降水量的差异主要出现安徽省北部,并且前者的降水量大于后

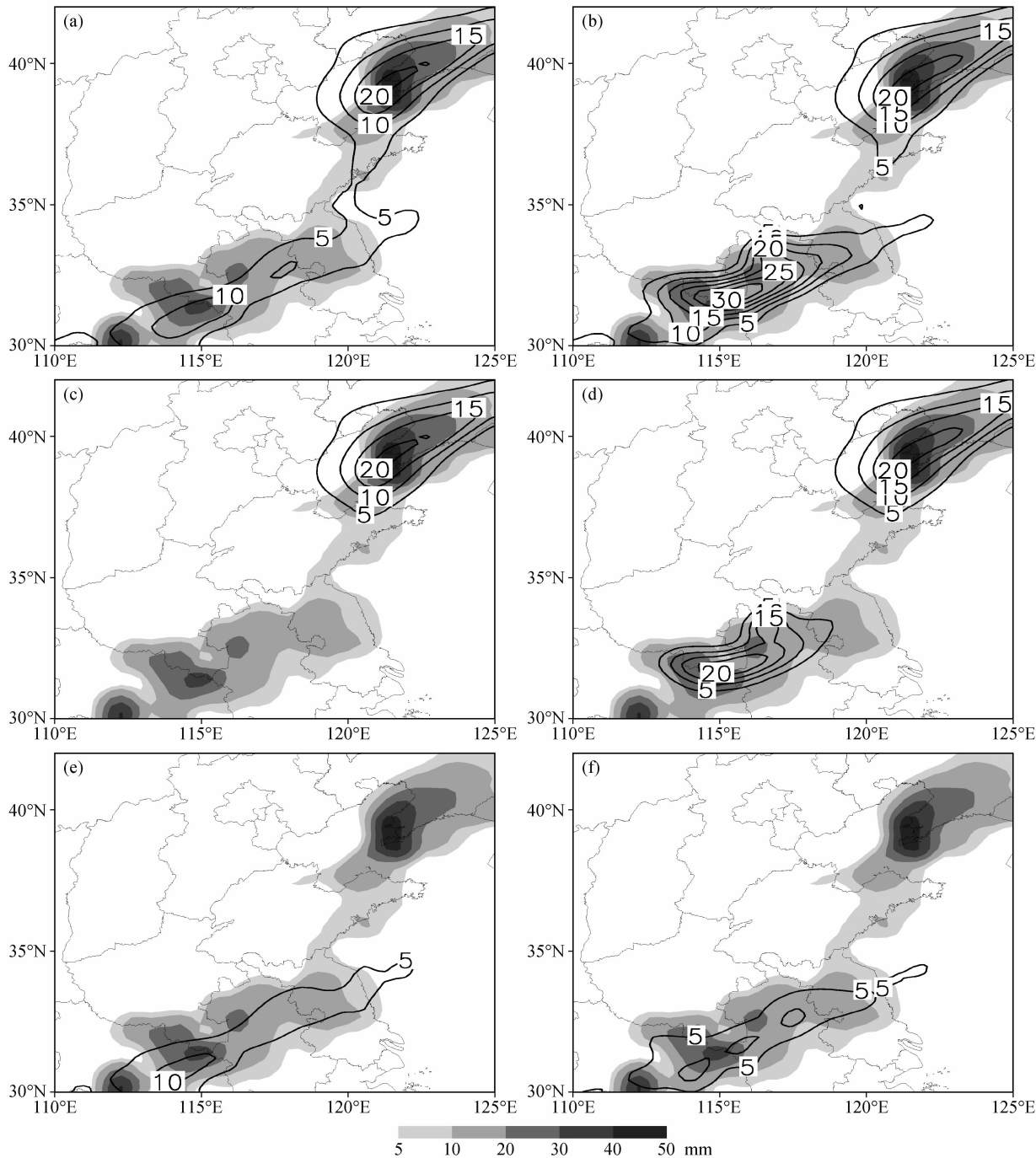


图 4 2003 年 4 月 18 日 00:10 (a、c、e) Cnl 和 (b、d、f) Sen 模拟的 6 小时累积 (a、b) 总降水量、(c、d) 可分辨尺度降水量和 (e、f) 次网格尺度降水量 (单位: mm)。阴影: 观测的 6 小时累积降水

Fig. 4 Simulations of 6-h accumulative (a, b) total rainfall, (c, d) grid-scale rainfall, and (e, f) subgrid-scale rainfall in (a, c, e) Cnl expt and (b, d, f) Sen expt at 0010 UTC 18 Apr 2003. Shading denotes the observation of 6-h accumulative rainfall

者,二者差的正高值中心位于 (33.5°N, 116.5°E) 附近,中心强度约为 15 mm,说明云凝结物和积云对流参数化方案调整有利于促进那里局地降水量的增长。进一步分析表明,该中心主要是由 Sen 与

Sen_cv 模拟的可分辨尺度网格降水量的差异造成的,而二者模拟的次网格尺度积云对流降水的差异相对来说不明显(图略)。另一方面,Sen 与 Sen_cv 模拟的 6 小时累积降水量之差在空间分布范围和强

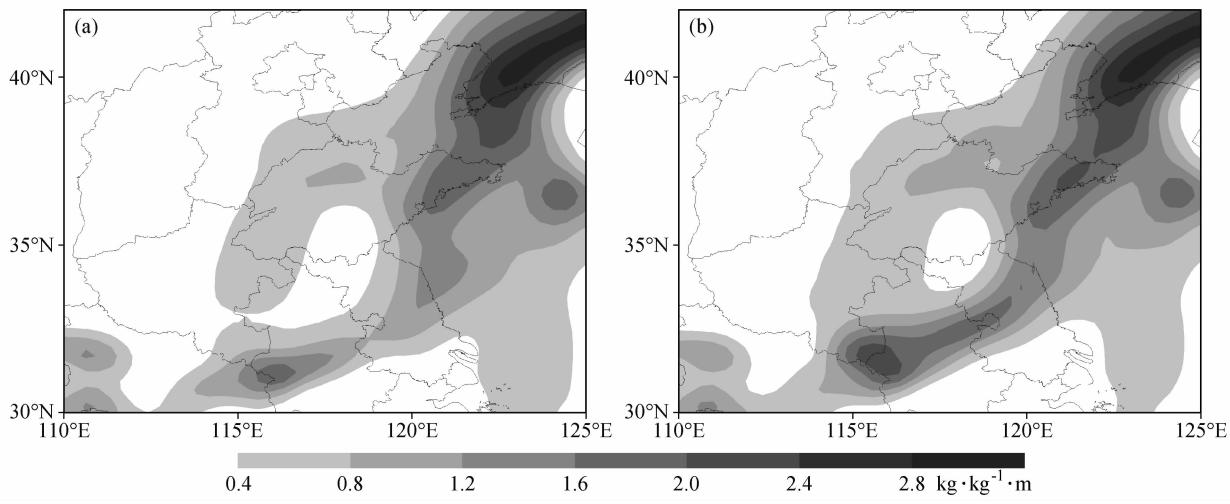


图 5 2003 年 4 月 18 日 00 时 (a) Cnl 和 (b) Sen 模拟的垂直积分云凝结物总量 (即, 云水, 雨水, 冰, 雪与霰混合比含量的和)
Fig. 5 Vertically integrated mixing ratio sum of cloud water, rain water, ice, snow, and graupel simulated in (a) Cnl expt and (b) Sen expt at 0000 UTC 18 Apr 2003

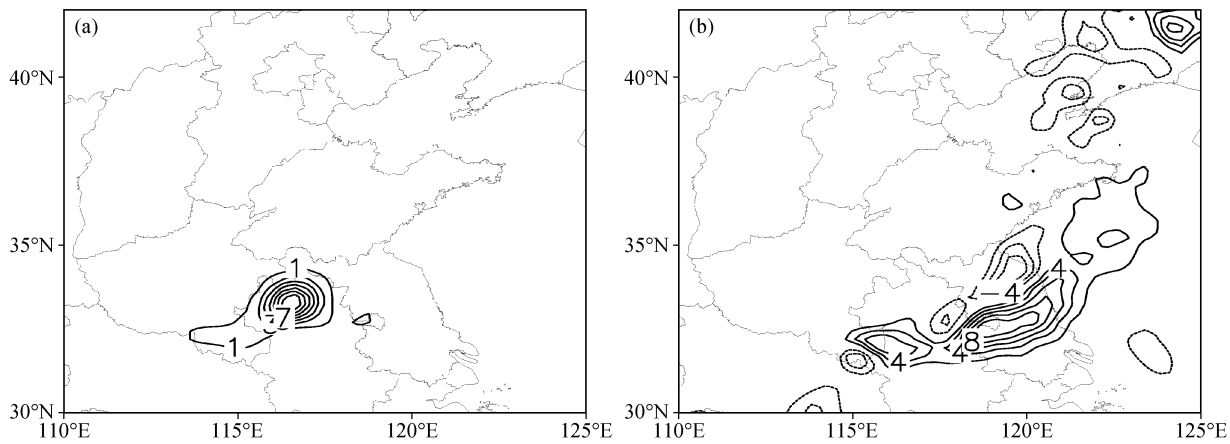


图 6 2003 年 4 月 18 日 00 时敏感性试验 Sen 与 Sen_cv 模拟的 6 小时累积总的降水量之差 (a, 单位: mm) 和垂直积分云凝结物总量之差 (b, 单位: 10^{-2} m)
Fig. 6 The differences of simulated (a) 6-h accumulative rainfall (mm) and (b) vertically integrated total cloud hydrometeors (10^{-2} m) between expts Sen and Sen_cv at 0000 UTC 18 Apr 2003

度上都小于 Sen 模拟的降水量, 这在一定程度上表明云凝结物调整和积云对流参数化方案调整对模式降水预报的影响不是非常显著的, 而水汽 Nudging 同化调整的影响相对来说是关键的。如图 6b 所示, 18 日 00 时 Sen 与 Sen_cv 云凝结物的差异呈带状, 二者差的正值区中心强度大于负值区中心强度, 云凝结物和积云对流参数化方案调整在安徽省和江苏省中部以及辽宁省南部地区 (正值区) 促进降水云系的发展, 而在安徽省中西部和江苏省东北部以及辽东半岛周围 (负值区) 抑制降水云系的发展。进一步分析表明, 受云凝结物和积云对流参数

化方案调整显著影响的云凝结物是雪, 倾向于增加云内雪的混合比含量 (图略)。

本文进一步分析 Nudging 同化方案对水物质、动力和热力场垂直结构的影响 (如图 7 所示), 17 日 18:20 Nudging 同化周期结束时, Sen 增加了 $31^{\circ}\text{N}\sim 34^{\circ}\text{N}$ 纬度带内对流层近地面层的水汽比湿和 33°N 上空 2 km 高度附近的云水和雨水含量, 其中 Sen 的云水增加量比较显著; 在纬度带 $31.5^{\circ}\text{N}\sim 33.5^{\circ}\text{N}$ 上空 10 km 高度附近 Sen 增加冰、雪和霰混合比含量, 其中冰和雪的增加量小于云水增加量, 而雨水和霰的增加量相对小得多。因此, Nud-

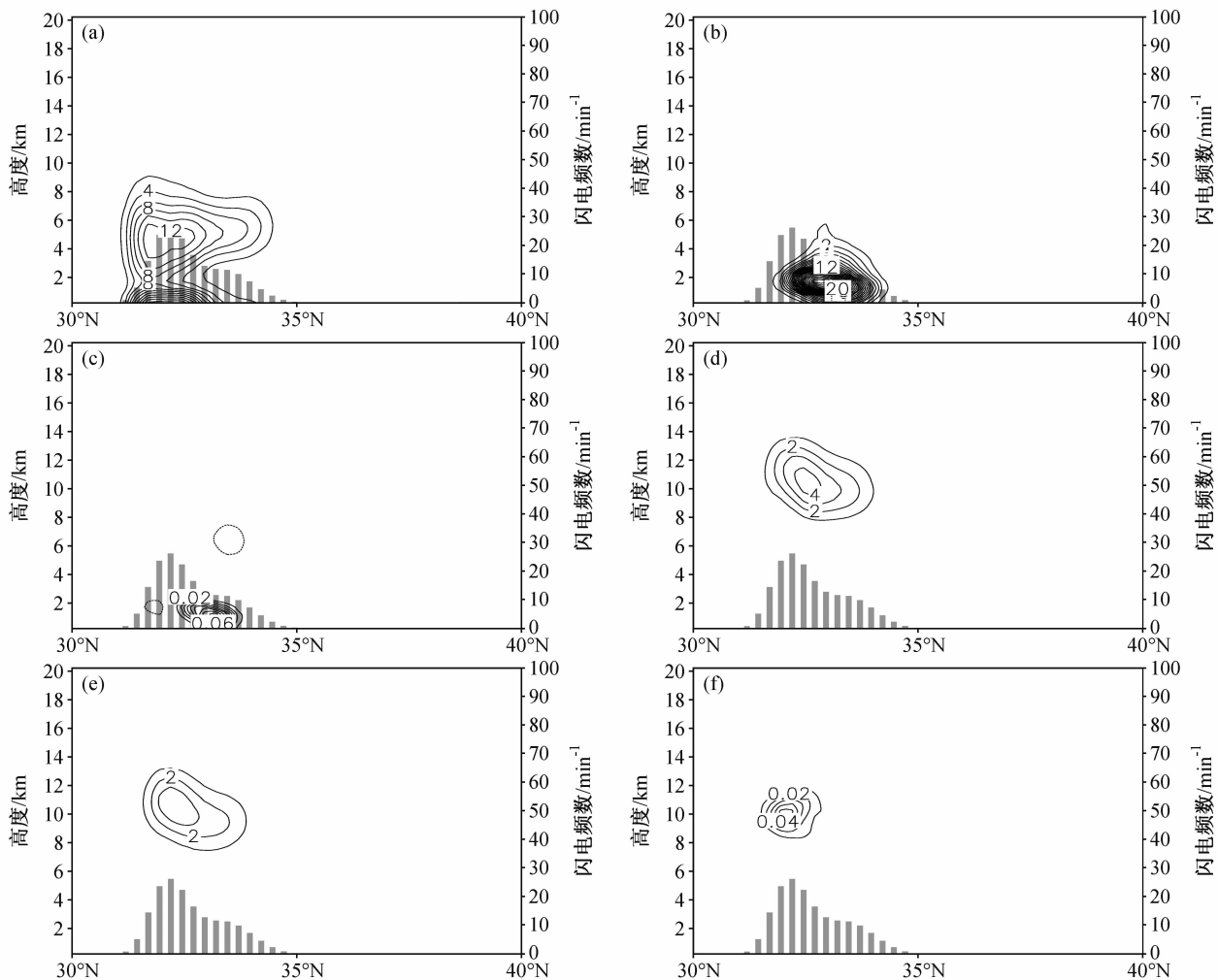


图 7 2003 年 4 月 17 日 18:20 Sen 与 Cnl 的水汽比湿差 (a)、云水混合比差 (b)、雨水混合比差 (c)、云冰混合比差 (d)、雪混合比差 (e) 和霰混合比差 (f) 在沿 116°E 经向垂直剖面内的分布 (单位: 10^{-4} kg/kg)。直方图代表观测的闪电频数

Fig. 7 Cross sections along 116°E for differences of (a) specific humidity and mixing ratios of (b) cloud water, (c) rain water, (d) ice, (e) snow, and (f) graupel between expts Sen and Cnl (units: 10^{-4} kg/kg) at 1820 UTC 17 Apr 2003. The histogram denotes the observed lightning flash frequency

ging 同化调整增加了闪电观测区对流层低层水汽比湿, 促进了水汽向云水转化, 增进了对流层高层水汽向云冰和雪以及云冰与雪之间的转化。如图 8 所示, Sen 与 Cnl 水平速度的差主要出现在 32°N 附近, 两个正负极值中心分别位于 12 km 高度附近和近地面层, Nudging 同化调整使对流层低层水平风减速, 对流层高层增速。Sen 与 Cnl 垂直速度的差异主要表现为 Sen 在 32.75°N 附近增强垂直运动, 二者垂直速度偏差的极大值中心位于 9 km 高度附近。Sen 与 Cnl 的位温场偏差主要表现为 Sen 在 32°N 附近 12 km 以下高度降温, 在 33°N 附近上空 1 km 和 10 km 高度附近增温, 其中 Sen 的低层

增温可能是增强水汽凝结潜热释放造成的, 高层的增温可能与增强水汽向云冰凝华转化有关, 而引起 Sen 中层降温的原因比较复杂。与 Cnl 相比, Sen 在 32°N~33°N 纬度带内对流层低层扰动增压明显, 其上方和北侧主要表现为扰动减压。

需要指出的是, 虽然在 Nudging 同化周期结束时, 闪电观测区上空动力和热力场已经受到一定的影响, 但水平速度、垂直速度、位温和气压对 Nudging 同化的响应略有滞后, 因此此时这些物理量的调整相对于它们的本身量级来说比较小。

为了讨论水物质、动力和热力场对 Nudging 同化的协调响应特征, 本文进一步对比分析了 Sen 和

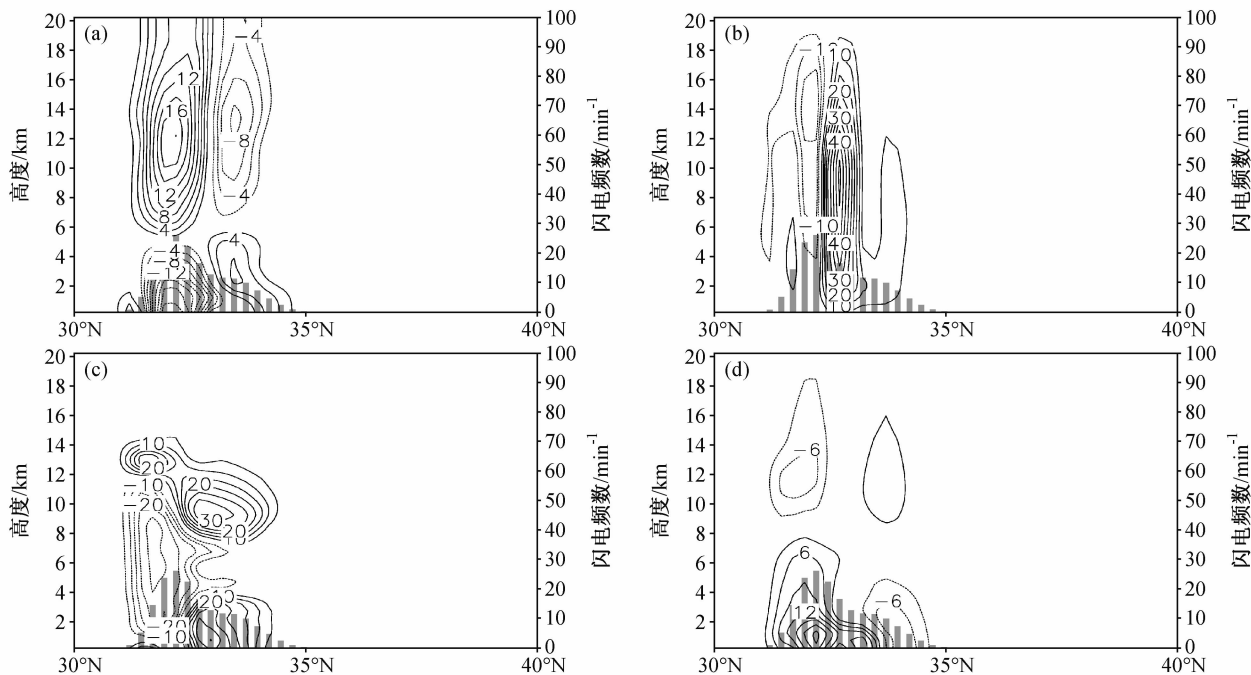


图 8 同图 7, 但为水平风速差 (a, 单位: 10^{-2} m/s)、垂直速度的绝对值之差 (b, 单位: 10^{-3} m/s)、位温差 (c, 单位: 10^{-2} K) 和扰动气压差 (d, 单位: Pa)

Fig. 8 The same as Fig. 7, except for differences of (a) horizontal wind speed (10^{-2} m/s), (b) absolute value of vertical velocity (10^{-3} m/s), (c) potential temperature (10^{-2} K), and (d) pressure perturbation (Pa)

Cnl 预报物理量的时间演变。如图 9 所示, Nudging 同化调整有利于增加水物质含量, Nudging 同化周期结束时 Sen 水物质含量高于 Cnl, 并达到极大值, 表明 Nudging 同化对水物质的影响比较显著。Sen 和 Cnl 水汽比湿的时间演变趋势比较相似, 但在强度上前者大于后者。17 日 18:20 Sen 和 Cnl 水汽比湿的差异最大, 二者之差约为 0.2 kg/kg , Sen 试验的水汽比 Cnl 试验增加了约 10%; 在 18:20~20:40 时段内, Sen 和 Cnl 水汽比湿的差异逐渐减小, 在其后时段内二者逐渐减弱, 并保持恒定的偏差。Nudging 同化对云水的影响比较明显, 在 18:10~20:00 时段内 Cnl 的云水含量较少, 而 Sen 的云水含量迅速增加, 并在 18:20 达到极大值 0.9 kg/kg , 远远地高于 Cnl; 随后 Sen 的云水迅速减弱, 大约在 19:10 左右达到极小值, 反映了云水与模式各个物理量场之间的协调调整; 接着 Sen 和 Cnl 的云水逐渐缓慢增加, 23:00 左右二者强度相当。Sen 的雨水、云冰、雪和霰含量高于 Cnl, 其中, Sen 雪和云冰混合比含量的极大值小于云水, Sen 雨水和霰含量的极大值相对其它三种云凝结物来说略弱一些。Sen 水和云冰的极大值同时出现,

而雨水、雪和霰的极大值比云水和云冰的极大值晚 10 分钟出现, 这意味着 Nudging 同化首先改变云水和云冰的含量, 再经由云水和云冰影响雨水, 雪和霰。Sen 的降水率高于 Cnl, 降水率的极大值与降水粒子雨水、雪和霰的极大值基本同时出现, 此时 Sen 的雨水、雪和霰含量都比较多, 因此 Sen 的降水率是由这三种降水粒子共同造成的。Cnl 降水率的极大值主要出现在 18:50, 此时 Cnl 降水粒子雨水和霰的含量比较少, 雪的含量相对较多, 因此 Cnl 的降水率主要是由雪引起的。

在 18:20~19:20 时段内水汽和云凝结物经历了由极大值减小到极小值的过程, 说明在 Nudging 同化结束后 Sen 水物质要经历大约 1 小时的调整适应阶段。

如图 10 所示, 动力和热力场的调整适应略微落后于水物质场, 例如, Sen 的水平速度从 18:20 开始增长, 并大于 Cnl 的水平速度, 20:50 二者的强度相当, 在其后的时段内 Sen 的水平速度低于 Cnl。Sen 与 Cnl 水平速度的最大差约为 0.3 m/s , 相对于水平速度本身的量级 (10 m/s) 来说是比较小的。Sen 的垂直速度始终大于 Cnl, 18:30 左右

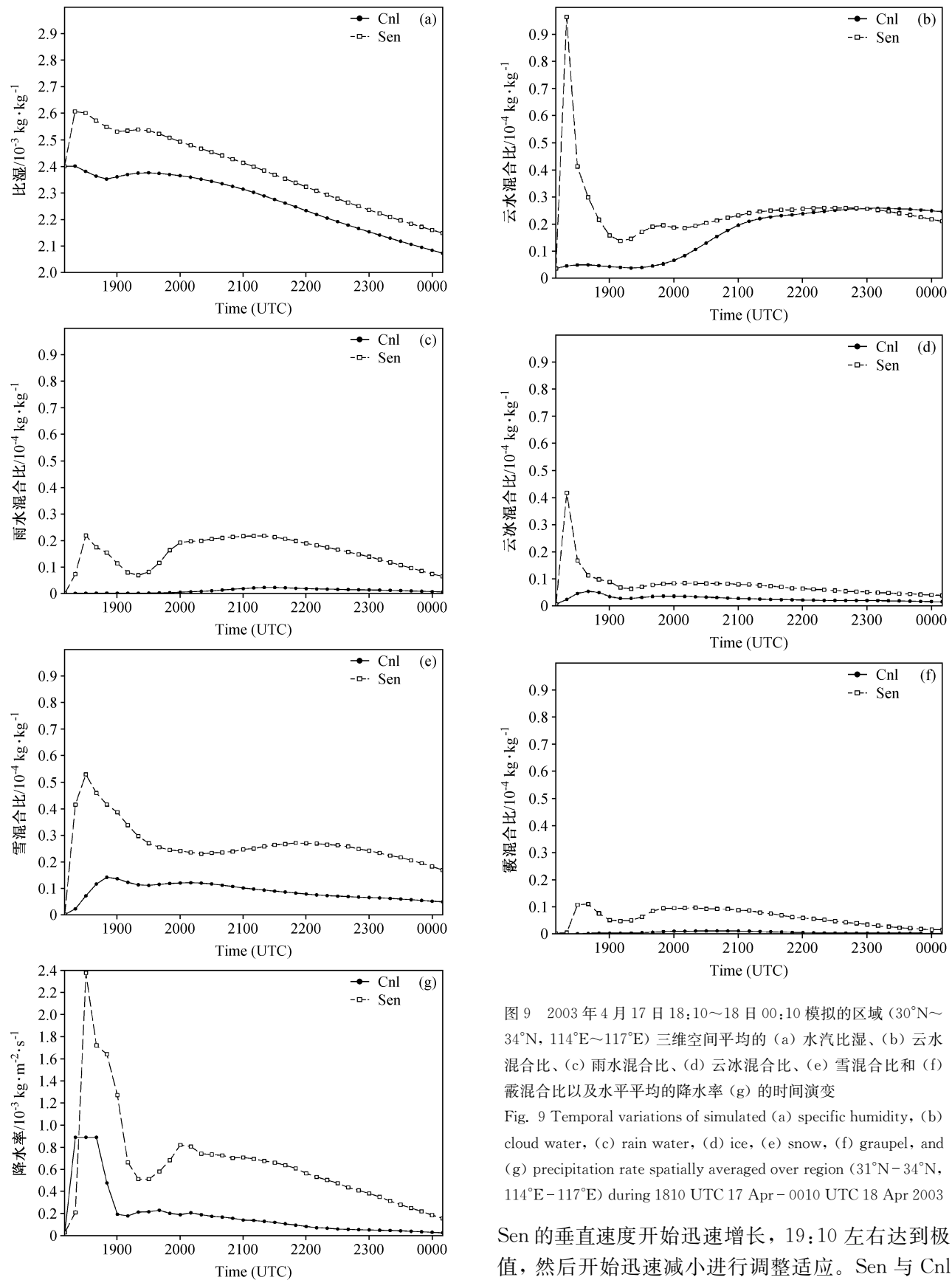


图9 2003年4月17日18:10~18日00:10模拟的区域(30°N~34°N, 114°E~117°E)三维空间平均的(a)水汽比湿、(b)云水混合比、(c)雨水混合比、(d)云冰混合比、(e)雪混合比和(f)霰混合比以及水平平均的降水率(g)的时间演变

Fig. 9 Temporal variations of simulated (a) specific humidity, (b) cloud water, (c) rain water, (d) ice, (e) snow, (f) graupel, and (g) precipitation rate spatially averaged over region (31°N - 34°N, 114°E - 117°E) during 1810 UTC 17 Apr - 0010 UTC 18 Apr 2003

Sen的垂直速度开始迅速增长, 19:10左右达到极值, 然后开始迅速减小进行调整适应。Sen与Cnl

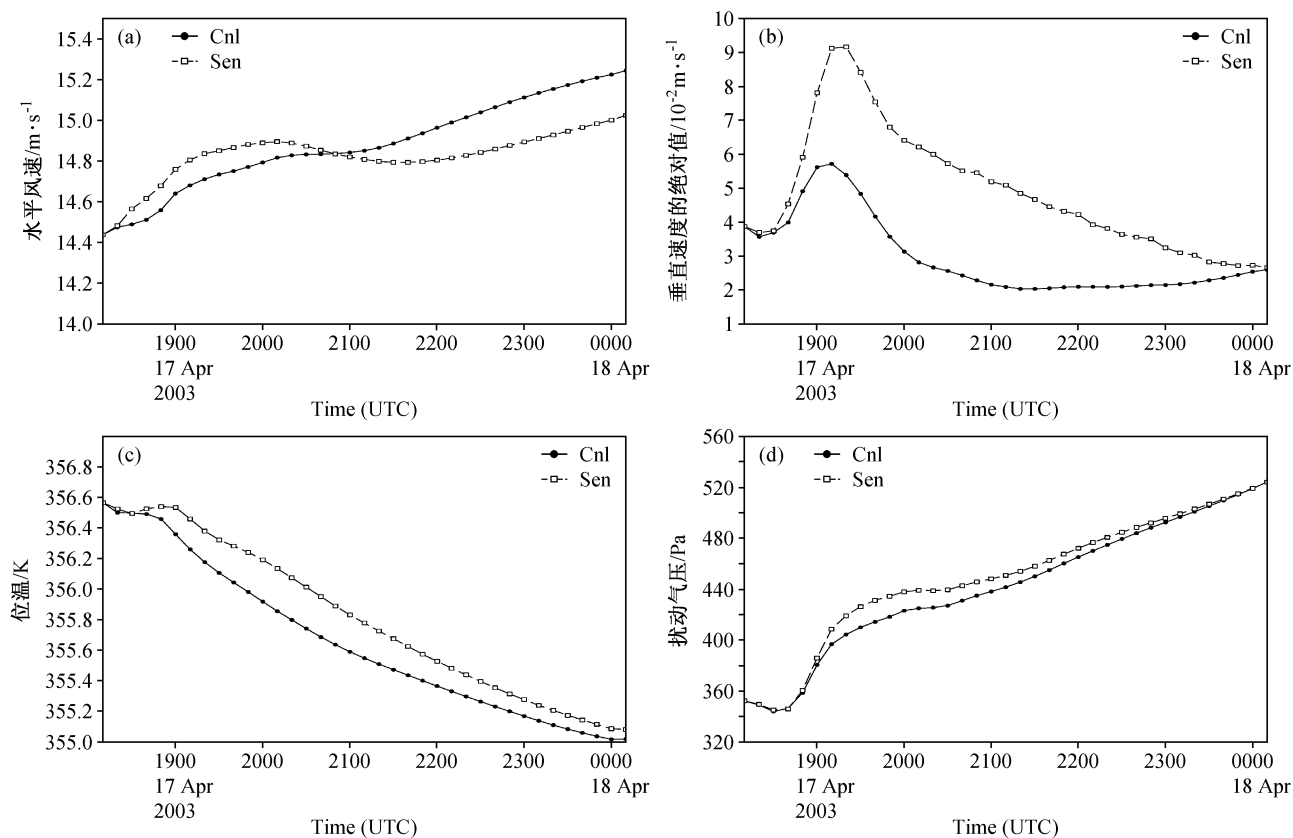


图 10 同图 9, 但为水平风速 (a)、垂直速度的绝对值 (b)、位温 (c) 和扰动气压 (d)

Fig. 10 The same as Fig. 9, except for (a) horizontal wind speed, (b) absolute value of vertical velocity, (c) potential temperature, and (d) pressure perturbation

垂直速度差的最大值约为 3.5 m/s , 相对于垂直速度的本身量级 (1 m/s) 来说是比较显著的。位温场大约在同化周期结束 10 分钟后才开始响应, Sen 的位温始终略高于 Cnl, 二者的时间演变趋势类似, 随时间逐渐减弱; Sen 与 Cnl 位温差 (小于 0.5 K) 相对于位温本身量级 (355 K) 来说也是比较弱的。Sen 和 Cnl 的气压逐渐增强, 从 19:00 开始 Sen 的气压高于 Cnl, 相对来说, 气压场对同化调整的响应比较慢。

4 结论

本文提出一种 Nudging 同化技术, 根据 TRMM 卫星闪电观测资料, 对水汽和云凝结物进行 Nudging 同化, 对积云对流参数化方案进行调整, 通过调整模式初始场中水汽和云凝结物的含量和空间分布结构, 改善模式初始水物质场的质量。这里的 Nudging 同化技术与三维变分和四维变分同化方案不同, 其本质是把物理初始化技术与

Nudging 技术结合起来。

本文把这种 Nudging 同化技术应用于一小时短降水过程的数值模拟中, 对比敏感试验和控制试验的结果可以看出, 本文提出的 Nudging 同化技术可以改善数值模式初始水汽和云凝结物场的质量, 提高中尺度数值模式短降水预报效果, 这在一定程度上验证了 Nudging 同化技术的有效性。进一步分析表明, Nudging 同化的结果有利于增加水物质含量, 特别是水汽和云水含量, 云水和云冰对 Nudging 同化的响应比较快, 而雨水、雪和霰对 Nudging 同化的响应略慢, 在 Nudging 同化结束后水物质要经历大约 1 小时的调整适应阶段。水平速度、垂直速度、位温和气压对 Nudging 同化的响应滞后于水物质, 其中 Nudging 同化对垂直速度的影响比较显著。

随着闪电观测技术的发展, 人们越来越重视闪电资料在数值模式中的同化应用, 针对不同的研究目的, 相继提出多种闪电观测资料同化方案。例

如, 李万彪等 (2008) 利用 TRMM 卫星闪电观测资料和测雨雷达资料得到了闪电发生率与对流降水之间的统计关系, 根据该统计关系反演出对流性降水, 再连续同化到数值模式的初始场中, 较好地改善了江淮流域暴雨的模式预报。Mansell et al (2007) 提出的中尺度预报模式闪电资料同化技术主要是利用闪电观测判断模式初始场中是否存在深对流系统, 进而控制 KF 对流参数化方案是否强制启动。Papadopoulos et al. (2005) 闪电同化方案主要包括水汽比湿的 Nudging 同化和是否强制启动对流参数化方案的控制。本文采用的 TRMM 卫星闪电观测资料 Nudging 同化方案与 Papadopoulos et al. (2005) 提出的地闪同化方案类似, 与其相比, 本文方案还有两点不同: 第一, 本文增加了对云凝结核混合比含量的 Nudging 同化调整; 第二, 本文的水汽 Nudging 同化方案中增加了动力学因素 (湿热力平流参数) 的判断。本文研究表明, 闪电资料的同化可以提高数值模式在短期降水预报方面的预报技巧, 这点与以往的研究结果一致。另外, 本文提出的方案可以直接读入闪电资料, 不用对每个闪电反演的降水量和凝结潜热释放等进行额外的分析, 简单易行, 因此该方案更适用于快速更新的周期数值预报。

参考文献 (References)

Alexander G D, Weinman J A, Karyampudi V M, et al. 1999. The effect of assimilating rain rates derived from satellites and lightning on forecasts of the 1993 superstorm [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 127: 1433–1457.

Brenner I S. 2004. The relationship between meteorological parameters and daily summer rainfall amount and coverage in west-central Florida [J]. *Wea. Forecasting*, 19: 286–300.

Chang D E, Weinman J A, Morales C A, et al. 2001. The effect of spaceborne microwave and ground-based continuous lighting measurements on forecasts of the 1998 Groundhog 2 day storm [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129: 1809–1833.

冯桂力, 鄒秀书, 吴书君. 2008. 山东地区冰雹云的闪电活动特征 [J]. *大气科学*, 32 (2): 289–299. Feng Guili, Qie Xiushu, Wu Shujun. 2008. Cloud-to-ground lightning characteristics of hail clouds in Shandong province [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (2): 289–299.

冯桂力, 鄒秀书, 袁铁, 等. 2007. 雹暴的闪电活动特征与降水结构研究 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 37: 123–132. Feng Guili, Qie Xiushu, Yuan Tie, et al. 2007. Investigation of lightning activity

associated with hail storm and precipitation structure [J]. *Science in China (Ser. D) (in Chinese)*, 37: 123–132.

Gallus W A, Segal M. 2001. Impact of improved initialization of mesoscale features on convective system rainfall in 10-km Eta simulations [J]. *Wea. Forecasting*, 16: 680–696.

Jones C D, Macpherson B. 1997. A latent heat nudging scheme for the assimilation of precipitation data into an operational mesoscale model [J]. *Meteor. Appl.*, 4: 269–277.

李万彪, 宋国琼, 童科. 2008. TRMM 卫星 LIS 闪电资料在数值模式中的应用 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 44: 399–406. Li Wanbiao, Song Guoqiong, Tong Ke. 2008. Applying TRMM-LIS lightning data to numerical model [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese)*, 44: 399–406.

Lin Y L, Farley R D, Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22: 1065–1092.

刘冬霞, 鄒秀书, 冯桂力. 2010. 华北一次中尺度对流系统中的闪电活动特征及其与雷暴动力过程的关系研究 [J]. *大气科学*, 34 (1): 95–104. Liu Dongxia, Qie Xiushu, Feng Guili. 2010. Evolution characteristics of the lightning and the relation with dynamical structure in a mesoscale convective system over North China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (1): 95–104.

Mansell E R, Ziegler C L, Macgorman D R. 2007. A lightning data assimilation technique for mesoscale forecast models [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 135: 1732–1748.

Papadopoulos A, Chronis T G, Anagnostou E N. 2005. Improving convective precipitation forecasting through assimilation of regional lightning measurements in a mesoscale model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 133: 1961–1977.

Papadopoulos A, Serpetzoglou E, Anagnostou E N. 2009. Evaluating the impact of lightning data assimilation on mesoscale model simulations of a flash flood inducing storm [J]. *Atmospheric Research*, 94: 715–725.

鄒秀书, 刘欣生, 张广庶, 等. 1998. 甘肃中川地区雷暴的地闪特征 [J]. *气象学报*, 56: 312–322. Qie Xiushu, Liu Xincheng, Zhang Guangshu, et al. 1998. Characteristics of lightning discharge to ground in Zhongchuan area [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 56: 312–322.

鄒秀书, 余晔, 王怀斌, 等. 2001. 中国内陆高原地闪特征的统计分析 [J]. *高原气象*, 20: 395–401. Qie Xiushu, Yu Ye, Wang Huaibin, et al. 2001. Analysis on some features of ground flashes in Chinese inland plateau [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 20: 395–401.

Rogers R F, Fritsch J M, Lambert W C. 2000. A simple technique for using radar data in the dynamic initialization of a mesoscale model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128: 2560–2574.

Wu X, Ran L, Chu Y. 2011. Diagnosis of a moist thermodynamic advection parameter in heavy-rainfall events [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28: 957–972.

- Xue M, Droegemeier K K, Wong V, et al. 2001. The Advanced Regional Prediction System (ARPS) —A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part II: Model physics and applications [J]. Meteor. Atmos. Phys., 76: 143 – 166.
- 袁铁, 鄒秀书. 2010. 基于 TRMM 卫星对一次华南飗线的闪电活动及其与降水结构的关系研究 [J]. 大气科学, 34 (1): 58 – 70.
- Yuan Tie, Qie Xiushu. 2010. TRMM-based study of lightning activity and its relationship with precipitation structure of a squall line in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (1): 58 – 70.
- 张廷龙, 鄒秀书, 袁铁, 等. 2008. 中国内陆高原地区典型雷暴过程的地闪特征及电荷结构反演 [J]. 大气科学, 32 (5): 1221 – 1228.
- Zhang Tinglong, Qie Xiushu, Yuan Tie, et al. 2008. The characteristics of cloud-to-ground lightning flashes and charge structure of a typical thunderstorm in Chinese inland plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (5): 1221 – 1228.