

李明妍, 崔志强, 王澄海. 2017. Nudging 方法对中国西北强降水过程的模拟试验研究 [J]. 气候与环境研究, 22 (5): 563–573. Li Mingyan, Cui Zhiqiang, Wang Chenghai. 2017. A numerical simulation study on heavy rain processes in Northwest China using the nudging method [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (5): 563–573, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16177.

Nudging 方法对中国西北强降水过程的模拟试验研究

李明妍 崔志强 王澄海

兰州大学大气科学学院, 甘肃省干旱气候变化及减灾重点实验室, 兰州 730000

摘要 通过在 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式中运用松弛逼近方法 (Nudging) 同化 NCEP-FNL 资料, 对中国西北地区夏季 3 次对流降水过程进行了模拟试验, 检验了模式运用谱逼近 (Spectral Nudging, SN) 和格点逼近 (Grid Nudging, GN) 方案后对研究区域内降水过程的模拟性能。结果表明: SN 和 GN 试验相对于控制试验, 模拟的降水结果更接近于站点观测。在降水落区和量级的模拟效果上都有显著提高, 且 SN 试验所得结果优于 GN 试验。通过分析两个同化试验在降水时段的基本要素场 (湿度、温度和风速) 变化, 在近地面层, GN 试验模拟的风速和温度较 SN 试验更接近观测; 但 700 hPa 上, SN 试验中风速、风向、温度、湿度的增量场变化及分布同降水的模拟结果存在较好的对应关系。最后, 从物理诊断量—水汽通量散度的空间垂直变化来看, SN 试验中 600 hPa 和 700 hPa 的水汽通量散度的正负分布有效调节降水的空间分布, 更逼近观测。因此 700 hPa 的物理量场变量增量是降水模拟效果改善的主要原因之一。

关键词 西北降水 WRF 模式 松弛逼近 水汽通量散度

文章编号 1006-9585 (2017) 05-0563-11

中图分类号 P456.7

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16177

A Numerical Simulation Study on Heavy Rain Processes in Northwest China Using the Nudging Method

LI Mingyan, CUI Zhiqiang, and WANG Chenghai

College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730000

Abstract Numerical simulations with application of the nudging technique in the Weather Research and Forecasting (WRF) model to assimilate Final Operational Global Analysis data (FNL) were implemented to study three convective rainfall processes in Northwest China. Impacts of spectral nudging (SN) and grid nudging (GN) methods on precipitation simulation in this area were also examined. The result shows that the simulations of SN and GN experiments agree better with station-observed data compared with that of the control experiment. It is obvious that the simulation of distribution and magnitude of precipitation have been improved significantly in the two experiments with nudging, while the SN experiment results are better than that of the GN experiment. Analysis of differences in the basic meteorological elements (humidity, temperature, and wind speed) during the precipitation period simulated in the two assimilation experiments, it was found that the surface wind speed and temperature simulated by the GN experiment are closer to observations than that simulated by the SN experiment. However, the simulation of wind speed and relative humidity at 700 hPa and

收稿日期 2016-09-26; 网络预出版日期 2017-04-26

作者简介 李明妍, 女, 1993 年出生, 研究生在读, 主要从事数值模式研究。E-mail: limy15@lzu.edu.cn

通讯作者 王澄海, E-mail: wch@lzu.edu.cn

资助项目 公益性行业 (气象) 科研专项 (重大专项) GYHY201506001-4

Funded by China Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest (Major projects, GYHY201506001-4)

precipitation in the SN experiment are better than that in the GN experiment. Finally, from the perspective of the vertical variation of the diagnostic physical variable, i.e. water vapor flux divergence, the positive and negative distributions of water vapor flux divergence at 700 hPa and 600 hPa in the SN experiment effectively modulate the spatial distribution of precipitation and the simulation agrees well with observation. The increase of water vapor flux at 700 hPa is one of the major reasons for the improvement of precipitation simulation.

Keywords Northwest precipitation, WRF model, Nudging method, Water vapor flux divergence

1 引言

Bjerknes (1911) 曾把数值天气预报归结为初边值的问题,即在给定了当前大气状态的初值和合适的边界条件,模式将能给出大气将来时刻的演变结果。制约数值天气预报模拟的准确性主要有两个关键因子,一是自身的物理和动力过程的描述;二是模式初始场的质量。随着数值模式快速的发展,新一代中尺度模式数值框架、物理动力过程的参数化方案日趋完备,初始条件的误差成为制约模式预报精度的突出因子(龚建东和丑纪范,1999; Simmons and Hollingsworth, 2002; 汪君和王会军, 2013; 马媛媛等, 2014)。资料同化是改进初始场的重要途径,其同化效果取决于观测资料的质量和时空分布。目前地面高空探测的常规观测资料融合多种气象卫星、雷达等遥感手段探测的高时空分辨率的非常规观测资料,制备的多种再分析资料空间分布均匀、时间连续,且具有较高的可信度(张爱忠等, 2005; 官元红等, 2007; 王澄海等, 2011; 朱国富, 2015)。连续同化方法是在模式积分中有同化资料的时刻,将同化资料不断地嵌入模式,可以提供较为充分的资料信息,使模式积分结果逐渐靠近真实状态(王云峰等, 2004)。变分方法是一种常用的分析方法,它把模式作为一个强约束进行求解,从而得到物理和动力上与模式相协调的初始场(Danard et al., 1968)。变分方法主要有三维变分同化和四维变分同化两种,四维变分同化是三维变分在时间维上的简单推广,其基本思想是在整个时间序列分析过程中保持变量的动力协调(Thompson, 1969; 李崇银和袁重光, 1978; Talagrand, 1981; 龚建东等, 1999; 马艳和张庆华, 2002)。但是,这种方法需要通过大量迭代步数求解成本函数的极值,且需要计算背景误差协方差矩阵,而对于实际大气运动状态预报误差分布随时间和空间变化的性质,其定常、均匀和各向同性的属性难以满足(Menéndez et al., 2001; 马旭林等, 2014)。

Nudging 作为一种应用较为广泛的同化方法,通过在控制方程中加上强迫项,逐渐把模式状态向观测状态逼近。这些强迫项相对于方程中的各项量级较小,保证了在每个积分步长中各物理量之间的动力平衡(Stauffer and Seaman, 1990; 何斌等, 2009; Glisan et al., 2013)。计算过程中不需要计算伴随矩阵和背景误差协方差矩阵,计算成本较低,具有很高的实用价值。研究表明,Nudging 方法对数值模拟结果都有不同程度的改进(Kanamaru and Kanamitsu, 2007; Cha et al., 2011; Glisan et al., 2013)。在区域气候模式中运用 Spectral Nudging 可有效地减少区域气候模式在模拟过程中的气候漂移现象(Von Storch et al., 2000)。例如利用该方法对东亚夏季降水进行分析和适用性检验,采用 Spectral Nudging 方法后,模式的模拟能力显著提高,有效地降低了试验中的个体偏差(宋寔和汤剑平, 2011; Ma et al., 2016);在风场的模拟中运用 Spectral Nudging 方法,可在较大程度上改进模式对于梅雨期降水位置和强度的模拟(曾先锋和周天军, 2012)。在 WRF 降尺度试验中添加 Spectral Nudging 和 Grid Nudging,认为 Spectral Nudging 在对大尺度和小尺度的特性模拟上效果好于 Grid Nudging(Liu et al., 2012; Berg et al., 2013)。

前述研究表明, Spectral Nudging 和 Grid Nudging 两种方法一般多用于对气候尺度的模拟研究。对天气尺度的模拟有较大的不确定性,尤其对于短期对流天气过程, Spectral Nudging 和 Grid Nudging 对降水的模拟效果如何需要深入探索。

本文通过对西北地区发生 3 次强降水过程分别进行不加 Nudging、添加 Spectral Nudging 和 Grid Nudging 的数值试验,通过对比不同试验对降水模拟的差异,比较不同 Nudging 方案得到的物理量场相对观测均方根误差(Root-mean-square error, RMSE)的时间序列,评估 Spectral Nudging 和 Grid Nudging 两种方法对模拟改进的差异,分析同化后模拟的不同要素场的空间分布形态,检验两种同化方法对中国西北干旱区强降水过程的改进能力。

2 模式与数据

2.1 模式简介、数据及试验设置

本文采用的观测数据来自中国气象数据网所提供的中国地面气候资料日值数据集(V3.0)、NCEP-FNL再分析资料以及MICAPS的常规地面观测资料。

本文选取的3个降水个例分别发生于2011年8月13~15日青藏高原地区东北部(个例一)、2012年7月29~30日河西走廊中部(个例二)、以及2013年7月7~9日西北地区东部(个例三)。3个降水个例均发生在中国西北干旱区,该地区地形复杂,相对于南方的对流降水过程,强降水的地理分布受地形影响较大(陶诗言,1984)。通过同化,检验模式在复杂地形条件下的改进程度。

同化试验模式采用WRFV3.5.1,3个个例的模拟均采用两层双向嵌套方案(图1)。D01覆盖了中国大部分区域以及为降水提供主要水汽的孟加拉湾等地,D02覆盖了本次西北降水发生的区域。两层嵌套区域的水平网格格点数分别为 180×165 、 319×211 ,相应的网格距为30 km、10 km,时间步长均为120 s。本文采用兰伯特投影方式,模式考虑的主要物理过程包括:云微物理过程、积云对流降水过程、地面通量以及云对辐射的影响。模式中对于长波辐射采用RRTM方案,短波辐射采用Dudhia方案,近地面层采用Monin-Obukhov方案,陆面过程采用Noah陆面过程方案,边界层采用YSU方案,积云参数化采用KF方案。

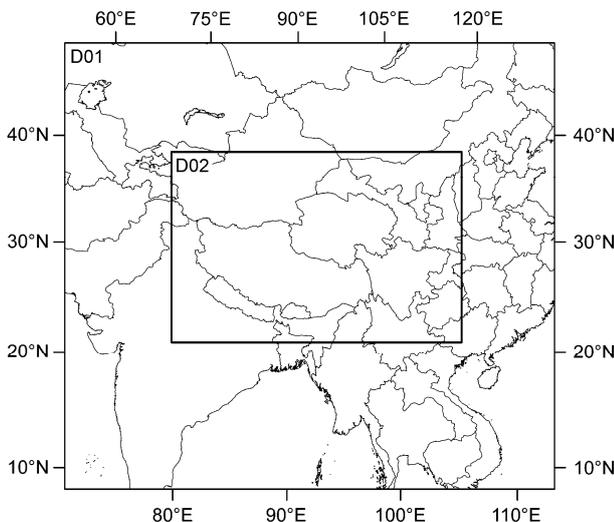


图1 模拟区域示意图

Fig. 1 Model domains of the numerical experiments

初始场和边界场资料为NCEP-FNL资料,每个数据文档空间分辨率为 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度),时间间隔为6 h,垂直方向从1000 hPa到100 hPa共27层。同化模拟试验时段分别为2011年8月11日00:00(世界协调时,下同)到17日00:00、2012年7月27日00:00到30日00:00、2013年7月6日00:00到10日00:00。所有的个例中Spectral Nudging和Grid Nudging试验都分别在整个模拟时段间隔6 h进行一次。所用的Spectral Nudging方法中内外层 x 方向的波数分别为2、2, y 方向的波数分别为1、2。所有Nudging系数均取 0.0003 s^{-1} 。

3次降水过程模拟均设置3种试验方案——一个控制试验和两个同化试验,分别用CTL、SN和GN表示(见表1)。

表1 模拟试验设计

Table 1 Design of numerical experiments and nudging methods

试验名称	同化FNL资料	同化方法
CTL	不使用	不使用
SN	使用	Spectral Nudging
GN	使用	Grid Nudging

2.2 Nudging方法简介

Nudging方法是基于动力学的同化方法,其核心思想是在数值模式积分的指定时刻,在预报方程中增加一个附加项,即预报值与观测值之差的松弛项,使得方程的解逼近观测值。

$$\frac{d\alpha}{dt} = X(\alpha) + G_\alpha w(\eta) \sum_{|n| \leq N} \sum_{|m| \leq M} K_{mn} (\alpha_{0,mn} - \alpha_{mn}) e^{ik_m x} e^{ik_n y}, \quad (1)$$

Spectral Nudging方程中变量 α 的值由相邻时刻的观测分析值内插得到; t 为时间; X 为模式算子; G_α 为松弛因子,它决定了模式中同化项相对于物理强迫中所有模式物理过程的大小; $w(\eta)$ 代表垂直方向上松弛的权重系数; m 、 n 分别表示经向和纬向; α_0 为再分析变量; K_{mn} 代表对于不同尺度的逼近系数; k_m 、 k_n 代表经向和纬向波数,其值根据格距、格点数以及波长进行计算而得,以此来调整模式的大尺度环流场,使其与真实强迫场保持一致。Spectral Nudging方法通过设置波数进行滤波,在空间中过滤掉大于此波数的高频波,保留大尺度波动,然后按照一定权重,把这部分大尺度波动加到模式的预报场上,从而可以将模拟状态不断靠近大尺度驱动状态,较好地减小大尺度误差,模式变量

可自由发展中小尺度过程，同时又可反应出较小尺度的特性。

对于 Grid Nudging，其基本思路就是在方程中加入额外的逼近项：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = F(\theta) + G_{\theta} W_{\theta} (\theta_0 - \theta), \quad (2)$$

其中， θ 为模式的积分变量， t 为时间， $F(\theta)$ 是由于物理过程、平流和科里奥利力等造成的物理强迫项； G_{θ} 为控制松弛大小的时间尺度因子； W 为附加的四维权重系数； θ_0 是通过临近时刻观测值内插以及空间格点差值得到的时空分析场，从而来逼近模式解。

Grid Nudging 是使用格点对格点的松弛强迫项逐步逼近分析场，通过同化观测信息，为所嵌套的区域细网格提供更高质量的侧边界条件，从而实现模式场的调整。

为了对模拟结果进行检验，本文使用 RMSE 进行统计分析。均方根误差是通过计算观测值与真值偏差的平方和观测次数 n 比值的平方根，来衡量观测值同真值之间的偏差。RMSE 越小，表明预报值越接近观测值，两者之间的偏差越小。

3 降水特征及其发生前后的环流形势

为了比较两种同化方法对模式模拟效果的改进程度，本文选取发生在我国西北地区夏季（7~8 月）的 3 个降水个例，对降水的范围和强度进行对比分析。

个例一选择的降水过程发生于 2011 年 8 月 13~15 日，强降水分布呈西北—东南的带状分布，降水落区位于甘肃省中部与青海省交界处，24 h 累计降水量在 10~40 mm 之间。8 月 13 日开始出现降水，主要位于河西走廊中部，青海省东北部有少量降水，雨量在 5~10 mm 之间。8 月 14 日 18:00 开始，降水量迅速增大，降水范围也逐渐扩大，主要降水落在青海省北部与甘肃省中部交界处，该地区地处青藏高原东北侧，地形落差较大，甘肃省的河西走廊部分属于干旱区，降水较少。24 h 累积降水量达 50 mm 以上，该降水历时 48 h，是该地区较为罕见的强降水过程。8 月 15 日，雨带东移出青海省，雨量减少，本次降水过程结束。个例二是发生于 2012 年 7 月 29 日 13:00，降水主要落在河西走廊中部地区，最大雨强中心出现在甘州区一带，降水量可达 36 mm，降水过程持续约 14 h，于 30 日

03:00 降水量逐渐减小并结束。个例三为发生于 2013 年 7 月 7~9 日，降水范围主要包括甘肃省东南部、宁夏南部及陕西省等地区。雨量在 8~9 日逐渐增大，甘肃东南部部分地区 24 h 累计降水量超过 100 mm。

在个例一中，8 月 12 日 500 hPa 形势场（图略）表现为，巴尔喀什湖东为一低压槽，呈东北—西南走向，副热带高压 588 gpm 线西伸至 107°E 附近，高压脊线稳定在 23°N 附近，河西走廊处于低压槽前部和副热带高压西侧的西南气流的折西的偏东气流中，24 h 累计降水量较少。8 月 13 日、14 日（图 2a）低压槽向东移动约 5°经度，副热带高压向西北推进，14 日 06:00，副高北伸，588 gpm 线西伸至 93°E 附近，西伸约 14°经度，高压脊北抬至 30°N 附近，低槽东移与副高北抬，使河西走廊中部地区辐合上升运动加强，副高西侧偏南气流输送暖湿水汽，造成了本次强降水过程。个例二与个例三的 500 hPa 环流形式均为在巴尔喀什湖一带出现低压槽，影响降水的天气系统的演变和发展与个例一相似，即 3 次降水个例的影响天气系统都是高空槽。低层存在低涡切变（图略）。3 次降水过程历时短，雨量较大，但降水落区和范围不同（图 3a1、3b1、3c1），模式直接模拟的捕捉效果相对较差（图 3a2、3b2、3c2）。

4 同化试验结果分析

从个例一站点资料所显示的 24 h 累计降水量分布（图 3a1、a2、a3、a4）中可以看出，降水落区主要位于河西走廊中部以及青海东北部，降水在青海省东北部与甘肃省交界处的量级较大，降水呈带状分布。将 CTL 试验所模拟的降水与站点资料进行对比得到，CTL 试验对降水量级的模拟结果较好，但未能模拟出甘肃西北部地区的降水，所模拟的降水范围较小。SN 试验模拟的降水量级较大，尤其对于降水的大值中心附近，从降水的范围上来看，模拟的降水区域明显增大，模拟出了干旱区（内蒙古西部）的降水，且降水量较大。GN 试验所模拟的降水范围和形态变化与站点资料相比有明显的不同。其模拟的降水范围和量级明显较小，且未模拟出河西走廊地区的降水。

从个例二的 7 月 29 日站点资料 24 h 累计降水量可以看到（图 3b1、3b2、3b3、3b4），降水位于

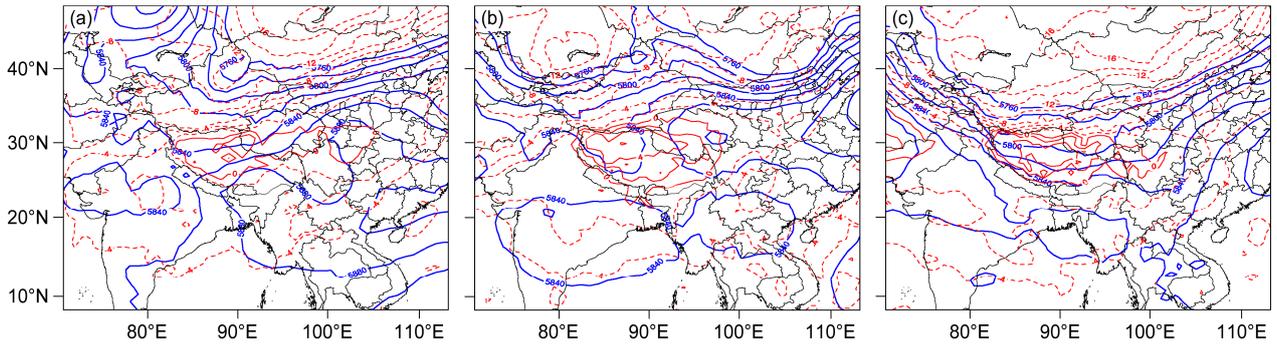


图2 (a) 2011年8月14日06:00、(b) 2012年7月28日06:00、(c) 2013年7月8日06:00 500 hPa 环流场(实线为等压线, 单位: hPa; 虚线为等温线, 单位: °C)

Fig. 2 500-hPa circulations at (a) 0600 UTC 14 Aug 2011, (b) 0600 UTC 28 Jul 2012, and (c) 0600 UTC 8 Jul 2013 (solid lines are isobaric lines, units: hPa; dashed lines are isothermal lines, units: °C)

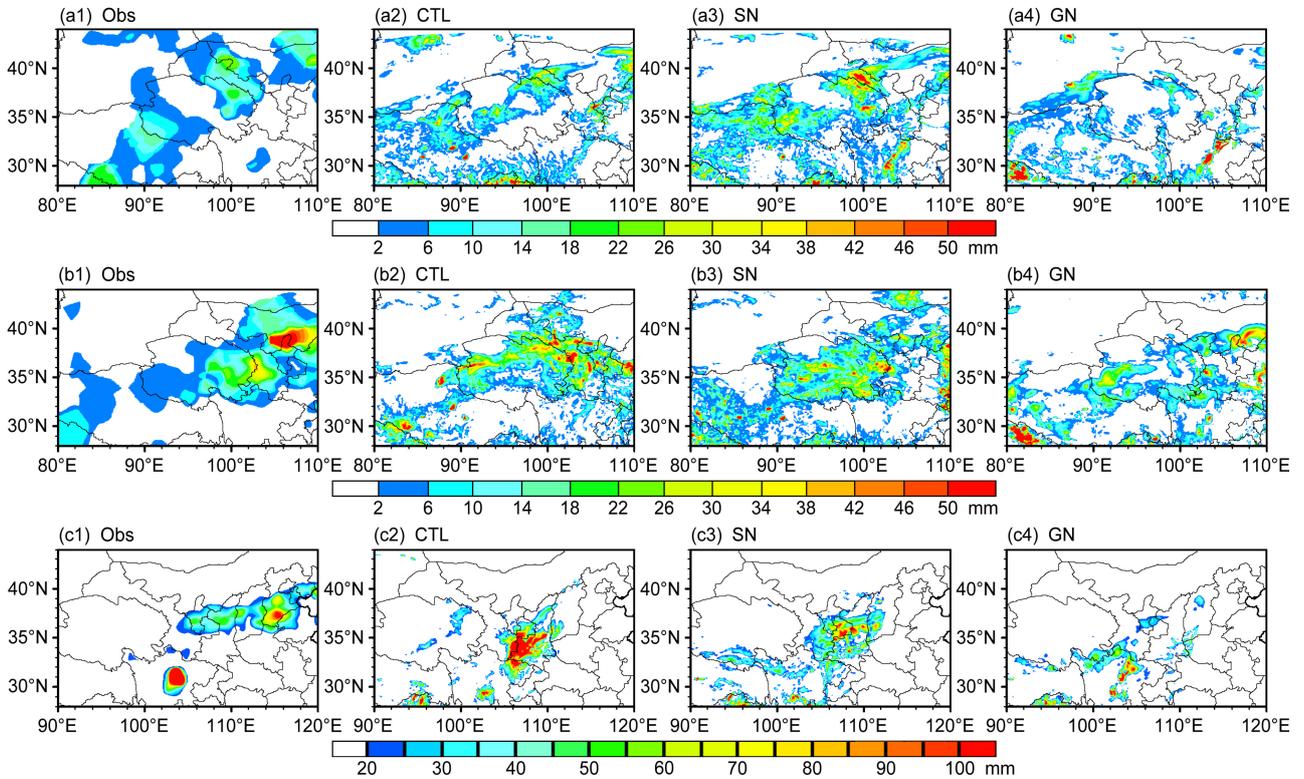


图3 观测、CTL 试验、SN 试验、GN 试验的 (a1、a2、a3、a4) 2011年8月13日12:00至14日12:00个例一、(b1、b2、b3、b4) 2012年7月29日12:00至30日12:00个例二、(c1、c2、c3、c4) 2013年7月8日12:00至9日12:00个例三24 h 累计降水量分布

Fig. 3 24-h accumulated precipitation in (a1, a2, a3, a4) case 1 during 1200 UTC 13 Aug–1200 UTC 14 Aug 2011, (b1, b2, b3, b4) case 2 during 1200 UTC 29 Jul–1200 UTC 30 Jul 2012, (c1, c2, c3, c4) case 3 during 1200 UTC 8 Jul–1200 UTC 9 Jul 2013 from observations, CTL test, SN test, and GN test

青海省东北部、甘肃省东部、宁夏以及内蒙古东部等地, 降水大值中心位于宁夏中部地区, 降水呈带状分布。CTL 试验与站点资料相比, 模式模拟出降水的形态, 但未能模拟出内蒙古地区的降水; SN 试验对降水的范围和雨带模拟较为准确, 但降水大值中心偏南; GN 试验的模拟结果相对较差, 模拟的降水量级及范围偏小。

个例三的强降水事件发生在 2013 年 7 月 8 日

(图 3c1、3c2、3c3、3c4), 从站点资料可以看出, 降水位于甘肃东部、宁夏、陕西一带, 呈东—西带状分布, 未有明显的降水大值中心。CTL 试验模拟的降水量级偏大, 且降水落区偏南; SN 试验模拟出雨带的分布特性, 模拟的降水量级略大于站点资料, 模拟结果在宁夏附近有降水的大值中心; GN 试验模拟的降水量级偏小, 且未能模拟出宁夏一带的降水特征。

降水的发生与风速和风向、温度、湿度等要素的分布密切相关, 这些要素的变化对模拟结果有着重要的影响。为了了解不同 Nudging 方法对降水的改进机制, 对同化 (Nudging) 过程中地面和高空要素进行分析。

4.1 Nudging 对近地层温度、风场的改进

为了评估 SN 和 GN 两种方法对地面场变量模拟能力的改进效果, 通过与 MICAPS 观测数据进行比较分析, 图 4 给出了计算的 3 个降水个例的地面预报温度以及风速在 54 h 之内的 RMSE。

图 4 表明, 温度和风速的 RMSE 在同化 FNL 资料后的 12 h 内均减小, 并且 GN 的 RMSE 明显小于 SN 的, 说明两种 GN 和 SN 方法都改进了模式的模拟结果。

从个例一温度的 RMSE 随时间的变化 (图 4a) 中可以看出, 在同化 FNL 资料后的 12 h 内, 加入两种方法后, RMSE 均比同化前的值小, 并且 GN 比 SN 试验的结果约小 0.5 m/s。这说明 GN 和 SN 方法对温度的模拟结果均有提高, 同时, GN 对模拟能力的改进更大。同化后的 12~18 h 之间, SN 和 GN 试验的结果与 CTL 相近, 说明在这一时段内, 同化对模式模拟能力的改进不大。18~36 h 之间,

两组试验的 RMSE 均减小, 对模式的模拟结果都有改进。36 h 之后, 同化后的 RMSE 值没有减小, 同化效果不显著。从风速的 RMSE 随时间的变化 (图 4b) 中可以看出, 在 48 h 之内, GN 试验的 RMSE 相比 CTL 试验所得结果减小约 1 m/s, 而 SN 的结果与 CTL 试验相近。说明在同化后的 48 h 内, GN 试验有效地改进了对风速的模拟, SN 对模式模拟能力的提高不大。

同样, 个例二和个例三温度和风速的 RMSE 的变化可以看出, SN 和 GN 两种方法的 RMSE 与 CTL 的值相近, 可见温度在同化 FNL 资料的整个过程中几乎改进不明显。GN 方法对风速模拟的 RMSE 在 48 h 内均小于 SN 和 CTL 试验, 说明同化对于风速模拟准确性的提高起到了很好的正作用。也即, SN 和 GN 对于地面风场和温度场均有不同程度的改进。

4.2 同化试验的 700 hPa 温度、相对湿度及风矢增量场

增量场反映了模式在同化前后的动力调整, 增量场结构特征越精细, 表示同化对局地天气的动力调整越明显, 从而更好地反映出局地天气过程的精细化特征 (陈敏等, 2008)。

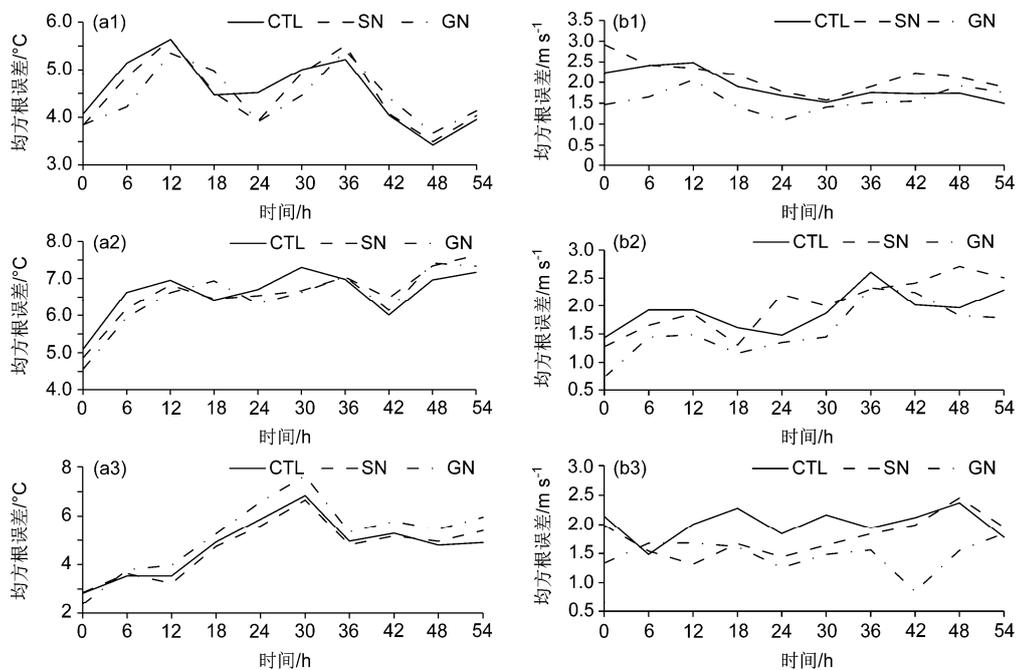


图 4 D02 区域中 (a1, b1) 2011 年 8 月 11 日 00:00 至 13 日 06:00 个例一、(a2, b2) 2012 年 7 月 27 日 00:00 至 29 日 06:00 个例二、(a3, b3) 2013 年 7 月 6 日 00:00 至 8 日 06:00 个例三地面预报温度 (左列)、风速 (右列) 的 RMSE 随时间的变化

Fig. 4 RMSEs of ground temperature (left panel) and wind speed (right panel) in (a1, b1) case 1 during 0000 UTC 11 Aug–0600 UTC 13 Aug 2011, (a2, b2) case 2 during 0000 UTC 27 Jul–0600 UTC 29 Jul 2012, and (a3, b3) case 3 during 0000 UTC 6 Jul–0600 UTC 8 Jul 2013 in D02

为了进一步说明同化 FNL 资料前后对物理量模拟效果的改进情况。图 5 和图 6 给出了 2011 年 8 月 14 日 00:00、2012 年 7 月 28 日 06:00 以及 2013 年 7 月 8 日 06:00 同化前后温度、风场和相对湿度的增量场。从个例一温度的增量场(图 5)中可以看出,在 700 hPa 上,SN 试验(图 5a1)的模拟结果与 CTL 试验结果接近,同化后温度变化不大;GN 试验(图 5a2)在降水落区存在明显的正增量,表明其模拟的温度相比 CTL 试验偏高。个例二中 SN 和 GN 试验(图 5b1、5b2)均模拟出温度的正增量,两种方法的模拟结果均偏高。个例三中 SN 试验(图 5c1)模拟的温度在降水区域为正增量;GN 试验(图 5c2)得到的温度与 CTL 试验相近,

同化后变化不大。

相对湿度和风矢量变化可以看到水汽局地的分布状态及判断未来发展的趋势。本次降水过程中存在着高空(500 hPa)风场辐散,低空(700 hPa)风场辐合。在 500 hPa 降水落区附近(图略),SN 与 GN 试验模拟的相对湿度均存在较大的正增量,较 CTL 试验偏高。从 700 hPa 风场和湿度场上来看,两组试验的结果差别较大,SN 试验(图 6a1)得到相对湿度的正增量,模拟的相比 CTL 偏高,GN 试验(图 6a2)为负增量,模拟结果偏低。这表明了 SN 试验中在降水落区有效地增加了空气中水汽含量,可以为降水形成提供有利的条件,而 GN 试验中明显削减了空气中的含量,不利于降水的发生。

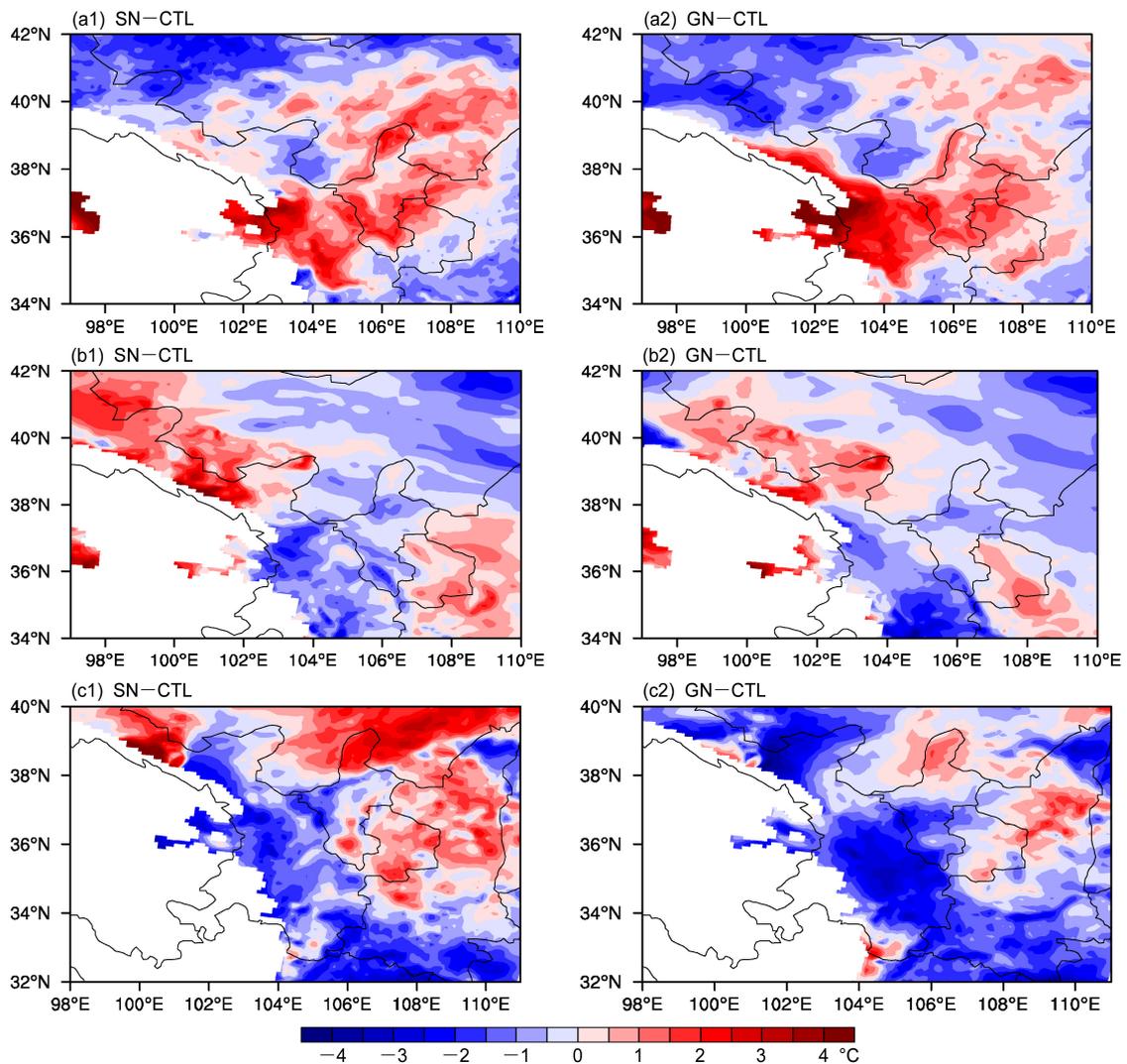


图 5 (a1、a2) 2011 年 8 月 14 日 00:00 个例一、(b1、b2) 2012 年 7 月 28 日 06:00 个例二、(c1、c2) 2013 年 7 月 8 日 06:00 个例三由 SN 试验(左列)、GN 试验(右列)得到的在 700 hPa 上温度的增量场

Fig. 5 Temperature increments in (a1, a2) case 1 at 0000 UTC 14 Aug 2011, (b1, b2) case 2 at 0600 UTC 28 Jul 2012, and (c1, c2) case 3 at 0600 UTC 8 Jul 2013 at 700 hPa from SN test (left panel) and GN test (right panel)

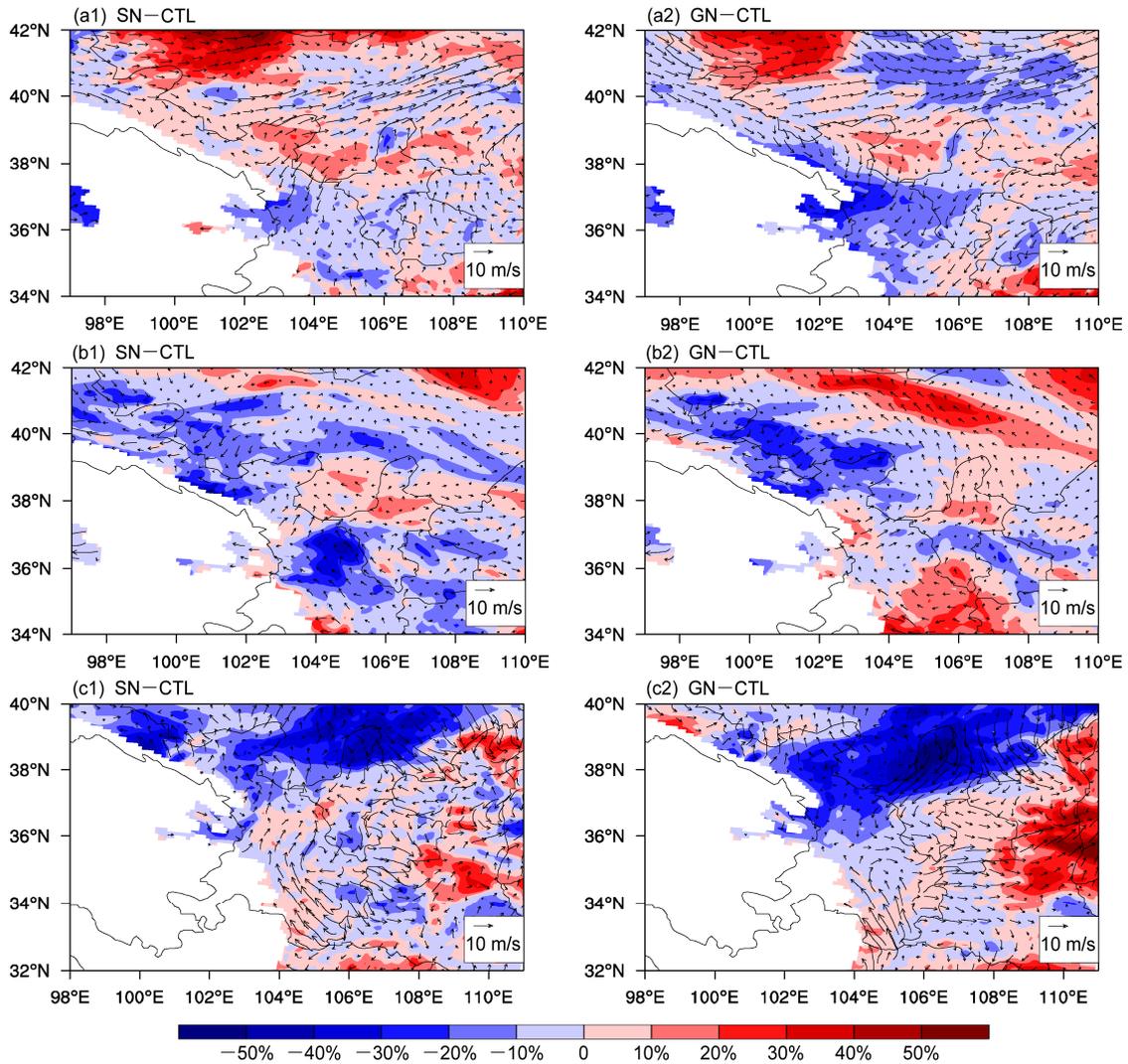


图6 (a1、a2) 2011年8月14日00:00个例一、(b1、b2) 2012年7月28日06:00个例二、(c1、c2) 2013年7月28日06:00个例三由SN试验(左列)、GN试验(右列)得到的在700 hPa上风速和相对湿度的增量场

Fig. 6 Increments of wind speed and relative humidity in (a1, a1) case 1 at 0000 UTC 14 Aug 2011, (b1, b2) case 2 at 0600 UTC 28 Jul 2012, and (c1, c2) case 3 at 0600 UTC 8 Jul 2013 at 700 hPa from SN test (left panel) and GN test (right panel)

个例二在700 hPa上, SN和GN试验(图6b1、6b2)所模拟的相对湿度在降水落区均为负增量,但SN负增量的绝对值小于GN试验,表明SN试验相对于GN试验空气中水汽含量较多,相应的降水的可能性也较高。个例三中,控制试验中模拟降水中心偏南,两个同化试验(图6c1、6c2)在降水的偏南地区都存在相对湿度的负增量,在实际降水的地区均有明显正增量,但SN试验相对GN在增量范围和强度上均较为明显,因此,SN试验通过调节水汽含量的变化和模拟降水变化相一致,使得降水向观测靠近。

可见,两种同化方法对影响降水的物理量都有不同程度的增量。700 hPa的水汽含量对降水的量

级和范围有着重要的影响,SN试验所模拟的相对湿度较CTL试验偏高,较好地模拟出了该地的水汽含量,进而更好地模拟了降水的量级,对降水模拟产生了积极效应,有效改善了模式模拟的偏差。结合24 h累计降水分布图来看,加入两种同化方法后对温度的模拟结果增量差异不明显,而对相对湿度的模拟两组试验的结果差异较大,尤其是在700 hPa上,由此可看出,700 hPa上相对湿度的模拟对提升预报质量有着重要作用。

4.3 同化FNL试验对水汽通量散度的影响

对于西北地区,造成干旱的重要原因之一是降水量稀少,而水汽输送的强弱是能否形成持续有效

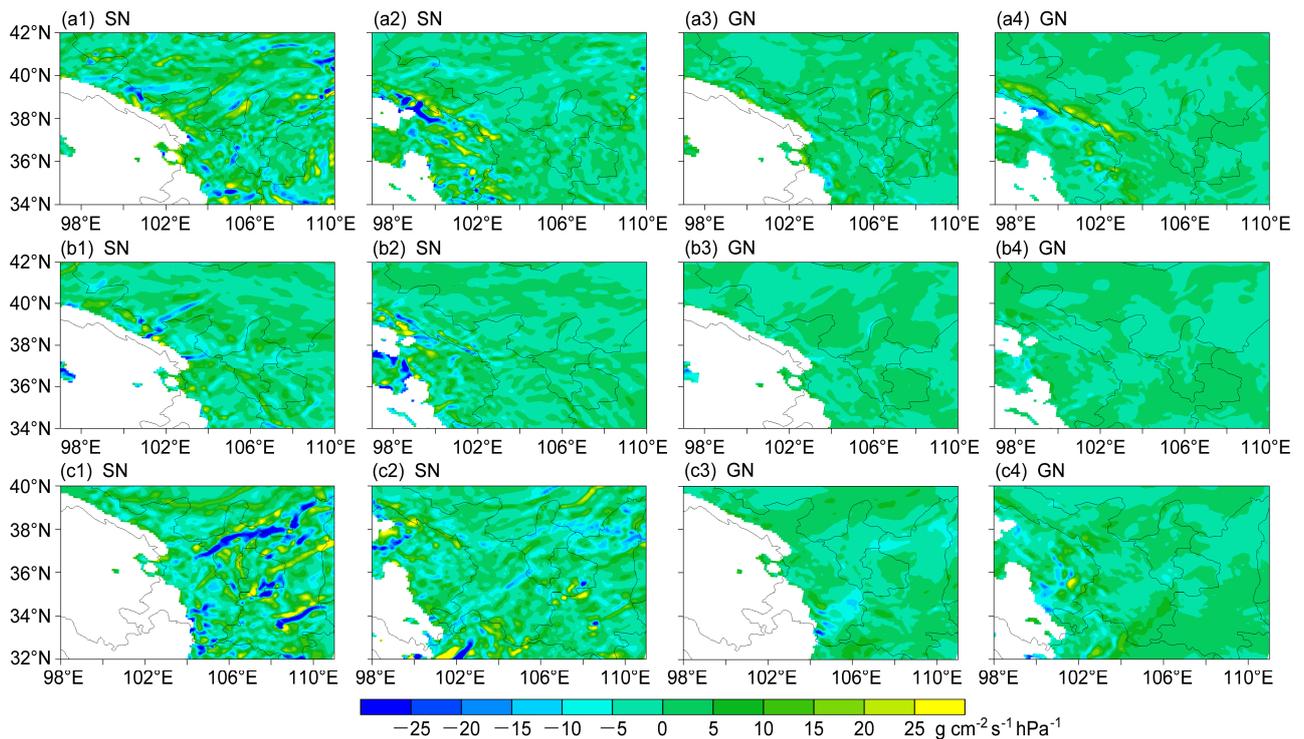


图7 模拟的个例一 2011年8月14日00:00(上行)、个例二 2012年7月28日00:00(中行)、个例三 2013年7月8日06:00(下行)的水汽通量散度在(a1、a3、b1、b3、c1、c3)700 hPa和(a2、a4、b2、b4、c2、c4)600 hPa高度层上的分布

Fig. 7 Distributions of vapor flux divergence in case 1 at 0000 UTC 14 Aug 2011 (top), case 2 at 0600 UTC 28 Jul 2012 (middle), case 3 at 0600 UTC 8 Jul 2013 (bottom) at (a1, a3, b1, b3, c1, c3) 700 hPa and (a2, a4, b2, b4, c2, c4) 600 hPa

降水的重要影响因素。水汽通过气流的输送、辐合及辐散等动力作用影响区域内的水汽收支,进而直接影响该地降水量的大小。

从水汽通量散度(图7)中可以看到,个例一SN试验(图7a1)在700 hPa上模拟的水汽通量散度在降水大值中心东部附近为负值,水汽辐合。在600 hPa上,SN试验(图7a2)所模拟的水汽通量散度在河西走廊地区为正值,表示水汽在该地区有强烈的辐散运动。这表明,SN试验较好地模拟出了降水落区附近高低空水汽的辐合辐散特性,这也与24 h累计降水量相对应。GN试验(图7a3、7a4)在600 hPa及700 hPa两层所模拟的水汽通量散度均为正值,水汽有辐散运动,对高低空水汽的垂直运动模拟不明显。在个例二(图7b1、7b2、7b3、7b4)中,SN试验相比于GN试验模拟出了水汽的高空辐散、低空辐合的特征,结合增量场的特征可以看到,SN试验很好地模拟出了降水的范围和量级,与站点资料相接近。从个例三(图7c1、7c2、7c3、7c4)700 hPa上来看,SN试验在宁夏中部地区模拟的水汽通量散度为负值,水汽辐合,在600

hPa上为正值,水汽辐散,SN试验对于水汽的模拟可以更好地反应降水特性;GN试验模拟的高低空水汽通量散度在降水落区附近均为正值,未能很好地模拟出水汽的垂直运动。

从西北地区的3个降水个例的模拟试验中可以看出,700 hPa上相对湿度和水汽通量散度的模拟对降水的模拟效果有着重要作用。通过对SN和GN两种方法的对比可以看到,相比GN试验,在降水大值中心附近,SN试验较好地模拟出了降水过程中水汽的垂直上升运动,从而对降水量级和范围的模拟更为准确。

5 结论

一般地,Nudging同化对于长时间的气候模拟具有较好的效果。本文则通过用WRF模式同化FNL资料对西北地区的降水天气过程进行模拟试验,对比分析Spectral Nudging和Grid Nudging两种方法对复杂地形条件下强降水过程的改进效果,得出以下初步结论:

(1) SN 试验对复杂地形条件下短时强降水的落区和降水大值中心的模拟有显著改进, 模拟的降水量更接近于站点观测资料的结果。SN 较 GN 试验对降水量级和范围的模拟性能更好。

(2) 从引起降水关键要素场的同化效果上来看, Nudging 方法对地面风场、湿度场和温度场均有改进, 但 Grid Nudging 的改进效果优于 Spectral Nudging, 而增量场上来看, 对 700 hPa 的温度和相对湿度的模拟, Spectral Nudging 相对于 Grid Nudging 改进效果显著, 这反映出 SN 方法对降水形成的热力过程的再现效果好, 也是降水模拟效果提高的主要原因。也表明在该地区低层 (700 hPa) 的温、湿条件是模拟强降水过程中的关键。

本文的结果表明, 尽管 Nudging 同化方法对天气尺度的降水模拟效果有所改进, 但是效果也是有限的, 这可能是与西北的降水过程时间较短, 对大尺度的信息没有很好地利用有关。

致谢 兰州大学杨毅教授对本文提出有益的建议。甘肃省甘南州气象局罗王军同志提供了天气过程时段的 MICAPS 资料, 两名审稿人对本文提出了宝贵的修改意见, 在此谨致谢意。

参考文献 (References)

Bjerknes V. 1911. Dynamic meteorology and hydrograph, Part II [M]. Kinematics, Carnegie Institute, Gilson Bros. New York, 175pp.

Berg P, Döscher R, Koenigh T. 2013. Impacts of using spectral nudging on regional climate model RCA4 simulations of the Arctic [J]. Geoscientific Model Development, 6 (3): 849–859, doi: 10.5194/gmd-6-849-2013.

Cha D H, Jin C S, Lee D K, et al. 2011. Impact of intermittent spectral nudging on regional climate simulation using Weather Research and Forecasting model [J]. J. Geophys. Res., 116 (D10): D10103, doi: 10.1029/2010JD015069.

陈敏, 仲跻芹, 郑祥芳. 2008. 北京地区一次强降水过程的多种观测资料四维变分同化试验 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 44 (5): 756–764. Chen Min, Zhong Jiqin, Zheng Zuofang. 2008. Four dimensional variational data assimilation of multiple types of observations for a severe storm in Beijing area [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese), 44 (5): 756–764, doi: 10.3321/j.issn:0479-8023.2008.05.015.

Danard M B, Holl M M, Clark J R. 1968. Fields by correlation assembly—A numerical analysis technique [J]. Mon. Wea. Rev., 96 (3): 141–149, doi:10.1175/1520-0493(1968)096<0141:FBCAAN>2.0.CO;2.

Glisan J M, Gutowski Jr W J, Cassano J J, et al. 2013. Effects of spectral nudging in WRF on Arctic temperature and precipitation simulations [J]. J. Climate, 26 (12): 3985–3999, doi:10.1175/JCLI-D-12-00318.1.

龚建东, 丑纪范. 1999. 论过去资料在数值天气预报中使用的理论和办法 [J]. 高原气象, 18(3): 392–399. Gong Jiandong, Chou Jifan. 1999. The theories and methods of utilizing historical data in numerical weather

forecast [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (3): 392–399, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.1999.03.015.

龚建东, 邱崇践, 王强, 等. 1999. 区域四维变分资料同化的数值试验 [J]. 气象学报, 57 (2): 131–142. Gong Jiandong, Qiu Chongjian, Wang Qiang, et al. 1999. The numerical experiment in area four-dimensional variational data assimilation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57 (2): 131–142, doi:10.11676/qxxb1999.012.

官元红, 周广庆, 陆维松, 等. 2007. 资料同化方法的理论发展及应用综述 [J]. 气象与减灾研究, 30 (4): 1–8. Guan Yuanhong, Zhou Guangqing, Lu Weisong, et al. 2007. Theory development and application of data assimilation methods [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research (in Chinese), 30 (4): 1–8, doi:10.3969/j.issn.1007-9033.2007.04.001.

何斌, 李云泉, 范晓红, 等. 2009. 四维同化技术在区域数值模式中的应用研究 [C]//第六届长三角科技论坛——长三角气象科技论坛论文集. 南通: 中国气象学会, 88–94. He Bin, Li Yunquan, Fan Xiaohong, et al. 2009. The four-dimensional assimilation technology application in the numerical model research [C]//The 6th Meteorological Science and Technology BBS on Yangtze River Delta (in Chinese). Nantong: Chinese Meteorological Society, 88–94.

Kanamaru H, Kanamitsu M. 2007. Scale-selective bias correction in a downscaling of global analysis using a regional model [J]. Mon. Wea. Rev., 135 (2): 334–350, doi:10.1175/MWR3294.1.

李崇银, 袁重光. 1978. 四维资料同化的试验研究 [J]. 大气科学, 2 (3): 238–245. Li Chongyin, Yuan Chongguang. 1978. An experimental study on four-dimensional data assimilation [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 2 (3): 238–245, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1978.03.07.

Liu P, Tsipididi A P, Hu Y, et al. 2012. Differences between downscaling with spectral and grid nudging using WRF [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 12 (8): 3601–3610, doi: 10.5194/acp-12-3601-2012.

马旭林, 陆续, 于月明, 等. 2014. 数值天气预报中集合-变分混合资料同化及其研究进展 [J]. 热带气象学报, 30 (6): 1188–1195. Ma Xulin, Lu Xu, Yu Yueming, et al. 2014. Progress on hybrid ensemble-variational data assimilation in numerical weather prediction [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 30 (6): 1188–1195, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2014.06.020.

马艳, 张庆华. 2002. 四维资料同化方法的特点分析和发展趋势 [J]. 黄渤海海洋, 20 (1): 72–77. Ma Yan, Zhang Qinghua. 2002. Characteristics and development trend of four-dimensional data assimilation [J]. Journal of Oceanography of Huanghai and Bohai Seas (in Chinese), 20 (1): 72–77, doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2002.01.010.

马媛媛, 杨毅, 胡小明, 等. 2014. WRF 中三种边界层参数化方案对新疆“2·28”大风过程模拟的对比分析 [J]. 沙漠与绿洲气象, 8(3): 8–18. Ma Yuanyuan, Yang Yi, Hu Xiaoming, et al. 2014. Evaluation of three planetary boundary layer parameterization schemes in WRF model for the February 28th, 2007 gust episode in Xinjiang [J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 8 (3): 8–18, doi: 10.3969/j.issn.1002-0799.2014.03.002.

Ma Y Y, Yang Y, Mai X P, et al. 2016. Comparison of analysis nudging and spectral nudging techniques for dynamical downscaling with the WRF model over the China region [J]. Advances in Meteorology, 2016 (2–3): 1–16, doi:10.1155/2016/4761513.

Menéndez C G, Saulo A C, Li Z X. 2001. Simulation of South American

- wintertime climate with a nesting system [J]. *Climate Dyn.*, 17 (2-3): 219-231, doi:10.1007/s003820000107.
- Simmons A J, Hollingsworth A. 2002. Some aspects of the improvement in skill of numerical weather prediction [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 128 (580): 647-677, doi: 10.1256/003590002321042135.
- 宋寔, 汤剑平. 2011. 谱逼近方法在东亚夏季降水区域模式模拟中的适用性研究: 区域大小和位置的影响 [J]. *气象学报*, 69 (2): 297-309.
- Song Shi, Tang Jianping. 2011. An application of the spectral nudging technique to the simulation of summer precipitation over East Asia using a regional climate model: The impact of domain size and position [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 69 (2): 297-309, doi:10.11676/qxxb2011.025.
- Stauffer D R, Seaman N L. 1990. Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I: Experiments with synoptic-scale data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 118 (6): 1250-1277, doi: 10.1175/1520-0493(1990)118<1250:UOFDDA>2.0.CO;2.
- Talagrand O. 1981. A study of the dynamics of four-dimensional data assimilation [J]. *Tellus*, 33 (1): 43-60, doi:10.1111/j.2153-3490.1981.tb01729.x.
- 陶诗言. 1984. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 225pp. Tao Shiyuan. 1984. *Rain Storm in China* (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 225pp.
- Thompson P D. 1969. Reduction of analysis error through constraints of dynamical consistency [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 8 (5): 738-742, doi: 10.1175/1520-0450(1969)008<0738:ROAETC>2.0.CO;2.
- Von Storch H, Langenberg H, Feser F. 2000. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128 (10): 3664-3673, doi: 10.1175/1520-0493(2000)128<3664:ASNTFD>2.0.CO;2.
- 王澄海, 隆霄, 杨毅. 2011. 大气数值模式及模拟 [M]. 北京: 气象出版社, 293pp. Wang Chenghai, Long Xiao, Yang Yi. 2011. *Atmospheric Numerical Model and Simulation* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 293pp.
- 汪君, 王会军. 2013. WRF 模式对江苏如东地区风速预报的检验分析 [J]. *气候与环境研究*, 18 (2): 145-155. Wang Jun, Wang Huijun. 2013. Forecasting of wind speed in Rudong, Jiangsu Province, by the WRF model [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 18 (2): 145-155, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.11152.
- 王云峰, 伍荣生, 王元, 等. 2004. 变分连续同化中优化步长的推导方法及数值试验 [J]. *大气科学*, 28 (3): 415-423. Wang Yunfeng, Wu Rongsheng, Wang Yuan, et al. 2004. The method of calculating the optimal step size in variational continual assimilation and the numerical experiments [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 28 (3): 415-423, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.03.08.
- 曾先锋, 周天军. 2012. 谱逼近方法对区域气候模式性能的改进: 不同权重函数的影响 [J]. *气象学报*, 70 (5): 1084-1097. Zeng Xianfeng, Zhou Tianjun. 2012. Impact of the spectral nudging on the simulation of a regional climate model: Different weight function [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 70 (5): 1084-1097, doi:10.11676/qxxb2012.091.
- 张爱忠, 齐琳琳, 纪飞, 等. 2005. 资料同化方法研究进展 [J]. *气象科技*, 33 (5): 385-389, 393. Zhang Aizhong, Qi Linlin, Ji Fei, et al. 2005. Advancement in data assimilation method research [J]. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 33 (5): 385-389, 393, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2005.05.001.
- 朱国富. 2015. 理解大气资料同化的根本概念 [J]. *气象*, 41 (4): 456-463. Zhu Guofu. 2015. Understanding of the fundamental concept of atmospheric data assimilation [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 41(4): 456-463, doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.04.008.