第16卷第2期	气 候 与 环 境 研 究	Vol. 16	No. 2
2011 年 3 月	Climatic and Environmental Research	Mar.	2011

鞠永茂, 王亚洲, 王汉杰, 等. 2011. 动力数值模式侧边界强迫的改进试验 [J]. 气候与环境研究, 16 (2): 149-158. Ju Yongmao, Wang Yazhou, Wang Hanjie, et al. 2011. Numerical experiment of the lateral boundary forcing improvement of the nesting dynamical model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (2): 149-158.

动力数值模式侧边界强迫的改进试验

鞠永茂1 王亚洲2 王汉杰3 王伟华1 宋帅3

1 解放军 61741 部队,北京 100094

2 山东省科学院海洋仪器仪表研究所,青岛 266001

3 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室,北京 100029

摘 要通过修正嵌套模式侧边界缓冲区温度强迫项的计算方法,使区域气候模式所刻画的温度日变化信息 与不同下垫面区域的天气变化规律相符合。进而利用数值模式 ASRegCM 研究了侧边界缓冲区温度强迫的改进 处理对嵌套模式模拟效果的影响,并讨论了其对模拟结果改进的可能机制。数值试验结果表明,该侧边界缓冲 区强迫的改进对地面气温和降水距平分布的影响并不明显,但对二者强度的模拟有一定程度的改进,其中地面 降水距平量级的改善尤为明显。机理探讨结果认为,模拟效果的改进首先源于侧边界修正处理对原有地面气温 波动振幅的放大,其次是侧边界修正处理后地面气温时间演变的模拟中增加了周期为 7~10 d 的经向和纬向低 频波动分量,两者的综合效应抑止了不稳定的对流性降水过程,增加了连续性的非对流性降水,削弱了数值模 式中热带和亚热带地区积云对流与非对流云之间的不稳定。

关键词 侧边界强迫 嵌套模式 数值试验 ASRegCM 仿真 文章编号 1006-9585 (2011) 02-0149-10 中图分类号 P435 文献标识码 A

Numerical Experiment of the Lateral Boundary Forcing Improvement of the Nesting Dynamical Model

JU Yongmao¹, WANG Yazhou², WANG Hanjie³, WANG Weihua¹, and SONG Shuai³

- 1 Troop 61741, PLA, Beijing 100094
- 2 Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Qingdao 266001
- 3 Key Laboratory of Regional Climate Environment Research for Temperate East Asia, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The lateral boundary forcing effects in the buffer zones of a nesting modeling system by improving the calculation method of temperature forcing terms are simulated. This new method makes the regional climate model have the ability to describe the daily temperature evolution characteristics that are consistent with the change rules under different underlying surfaces. By using the regional climate model ASRegCM, a numerical experiment is conducted to test the effects of the lateral boundary emulation. Simulation results show that the anomalous intensity of the surface temperature and precipitation is improved with the improvement of temperature calculation in lateral boundary buffer zones, whereas there is no significant change in the distribution pattern of anomalous signs. It also

资助项目 国家重点基础研究发展计划 2011CB403202, 国家自然科学基金项目 40675040

作者简介 鞠永茂,男,博士,工程师,主要从事气候与全球变化方面的研究。E-mail: juym100@sina.com

收稿日期 2009-07-20 收到, 2010-12-20 收到修定稿

shows that there is more evident improvement in the simulation of precipitation than that of surface temperature though the sensitive test is conducted on temperature only. The improvement in numerical simulation may be concluded into two aspects. One is the amplification effects on wave amplitudes of the surface temperature. The other is the effects of adding the zonal and longitudinal low frequency wave variability component with a 7 – 10-day cycle into the process of lateral buffer emulation. The co-effects restrain the unstable convective precipitation process, and increase the continuous non-convective precipitation process. And then the instability between cumulus convection and un-convective clouds in tropical and semi-tropical zones are weakened during the model simulation. **Key words** lateral boundary forcing, nested mode, numerical experiment, ASRegCM, emulation

1 引言

应用嵌套模式开展气候研究,其区域气候模 式 (Regional Climate Model, RCM) 的侧边界必 须满足两方面的条件:一方面,通过侧边界处理 引入大尺度强迫信息后, RCM 得到的大尺度环流 信息必须与所提供的大尺度强迫相一致;另一方 面,所引入的大尺度强迫不可太强,不能抑制了 区域范围中尺度强迫信号的发展,从而使 RCM 能 够给出基于模式内部物理过程的高分辨率信息。 但嵌套模式在侧边界处理中的数学物理问题是不 完全适定的, RCM 侧边界强迫和模式内部物理过 程动力平衡之间的矛盾会不会导致计算结果"垃 圾进垃圾出"的问题一直都是嵌套模式所要解决 和回答的问题, 故 RCM 侧边界强迫的处理是一个 既困难又重要的问题(Giorgi et al., 1993; Giorgi and Marinucci, 1996)。该问题本质上是嵌套网 格技术的实现问题,为了更好地解决区域模式中 引入大尺度信息的问题,海绵边界条件、辐射边 界条件、Davies 松驰边界条件和 Perkey 倾向松弛 边界条件等嵌套网格技术先后被应用到数值预报 中(沈桐立等,1996)。

现阶段,围绕松弛边界条件引入技术和缓冲 区的选取等问题,国外学者(Giorgi et al., 1993; Jones et al., 1995; Giorgi and Marinucci, 1996; Seth and Giorgi, 1997)和中国学者(沈桐立等, 1996;魏和林等, 1998;钱永甫和刘华强, 2001; 钟中等,2004)开展了深入的研究改进工作。相 关研究主要从空间区域处理的角度出发,选用较 好的侧边界处理方法,以使侧边界处理所引入的 误差在单个时次上得到优化。当嵌套模式被用于 气候预测业务时,出于计算能力、数据存储和耦

合性能等方面的考虑,多采用单向嵌套实现方式, 即直接利用全球海气耦合数值模式(Coupled ocean - atmosphere General Circulation Model, CGCM) 的输出产品来驱动 RCM, 而不是为 RCM 提供逐时间步长的边界条件,这就涉及到相 邻两个时次 CGCM 输出产品在时间演变上的处理 问题。目前,数值模式侧边界嵌套方案对 CGCM 临近两个时次资料产品采用的是线性插值,即随 着时间的增加侧边界区域的气象要素由前一个时 刻的数值线性变化到下一个数值。但大气作为一 种流体,其要素的变化以波动为主,当嵌套模式 采用线性演变处理侧边界强迫时,气象要素的日 变化特征也就被平滑掉了。而气候预测中日变化 的处理是影响嵌套误差的重要因素之一,就长时 间积分的气候模式来说,误差的考虑不能仅限于 空间方面,随时间累积的误差往往更为致命(黄 丽萍等, 2004)。因此, 在数值模式侧边界嵌套方 案中有必要考虑气象要素的日变化信息。本文基于 有限时次间隔的 CGCM 输出资料产品,对数值模式 侧边界嵌套方案的时间演变方案进行仿真处理,从 而在 RCM 中引入更为详细的气象要素日变化信 息,以期能改进嵌套模式的预测能力,同时对该 修正处理引起嵌套模式变化的机理特征和单向嵌 套技术替代双向嵌套的可行性进行初步探讨。

2 数值试验方案设计

2.1 模式配置

数值试验的模式工具为月尺度气候预测业务 模式 ASRegCM,模式的方案设计和区域设置详 见鞠永茂等(2011),以下仅作简要说明。该业务 预测模式采用区域数值模式 MM5V3(Dudhia et al.,2004)动力框架,在模式边界层方案中耦合 海浪模式 WAVEWATCH III (Tolman, 2002) 以修正模式下垫面海表粗糙度的计算方法。研究 区域中心点设在(25°N, 120°E),采用两重嵌套 网格。粗网格区域水平分辨率为 60 km,经纬向 网格数分别为96×114。细网格区域水平分辨率为 20 km,经纬向网格数分别为106×124,范围大 致为(10°N~30°N,100°E~130°E)。模式垂直方 向上σ坐标非等距的分为28 层。模式下垫面采用 NOAH 陆面过程和 MRF 边界层参数化方案,上 边界定为100 hPa,选用 CCM2 辐射方案。粗细 网格区域的积云对流参数化方案分别采用 Kuo 方 案和 Grell 方案,湿物理过程分别为简冰方案和 Goddard 方案。

考虑到气候预测要进行长时间的积分,对大 尺度强迫场的引进过程中须保留有气候意义的长 波,故模式粗网格缓冲区取 12 圈 (如图 1 所示), 粗细网格之间的区域即为模式的缓冲区。从图 1 可以看出,除了 20°N 以南和 130°E 以东的缓冲区 位于大面积的海洋区域之外,其他缓冲区位于地形 复杂的青藏高原周边区域以及中蒙交界的草原地 区,这些区域的气温日变化尤为明显。用于驱动业 务模式的背景场资料为 2006 年 5 月 1~30 日 00 时 (协调世界时,下同)与 12 时的 CGCM_1.1 资料 产品 (李维京等, 2005),其时间分辨率为 12 h。

2.2 仿真处理方案

本文的仿真处理方案是基于有限时次间隔的 CGCM 大尺度背景场资料,在 RCM 侧边界缓冲





Fig. 1 Domain of numerical experiments and the configuration of the model buffer zones (areas between two rectangles are the model buffer zones, shaded areas denote the terrain height and the numbers are observation stations' number) 区内,采用正弦拟合替代原有的线性插值处理方法,从而使嵌套模式缓冲区气象要素日变化规律 与实际演变规律近似一致。需要说明的是,试验的 侧边界缓冲区仿真处理只针对数值模式的粗网格区 域,气象要素则只针对气温,以下予以详细介绍。

ASRegCM 侧边界处理方案中使用的是 Davies 松弛边界方案,该方案在区域模式侧边界中 设置缓冲区,并使模式的模拟值在缓冲区内向大 尺度强迫场逼近,松弛边界条件方案包括牛顿项 和耗散项 (Grell et al., 1995)。对某一气象要素 变量 α,在缓冲区内按照下面的公式将其加进到模 式倾向方程中:

$$\left(\frac{\partial \alpha_{\rm M}}{\partial t}\right)_{n} = F(n)F_{1}(\alpha_{\rm LS} - \alpha_{\rm M}) - F(n)F_{2}\Delta^{2}(\alpha_{\rm LS} - \alpha_{\rm M}), n = 2, 3, 4, \cdots, N$$
$$F_{1} = \frac{0.1}{\Delta t},$$
$$F_{2} = \frac{(\Delta s)^{2}}{100\Delta t},$$
$$F(n) = \frac{N-n}{N-2}, \tag{1}$$

其中,下标 LS 和 M 分别指背景场大尺度强迫值 和嵌套模式的计算值, Δt 为 RCM 粗网格区域的 积分步长, Δs 为粗网格区域的水平网格距,N 为 侧边界缓冲区网格数,试验中取 12 圈。n=1 代表 最外层的一圈侧边界,随着 n 的增加向内类推。 F(n)为权重函数,代表背景场大尺度强迫的强弱, 取值范围为 0~1。越远离模拟区域中心到模式粗 网格区域缓冲区的外围,F(n)数值越大,即背景 场大尺度强迫作用越强。

从空间分布更合理的角度出发,以前的改进 工作主要体现在 N 值大小的选取以及 F(n) 的计 算方法上 (Giorgi et al., 1993; Jones et al., 1995; Giorgi and Marinucci, 1996; Seth and Giorgi, 1997)。本文则是从时间演变的角度出发, 考虑临近两个时次的 CGCM 资料产品中气象要素 的日变化特征怎么引进到 RCM 中来的问题,将研 究的重点放在上面公式主体项 ($a_{LS} - a_M$) 的处理 上。为方便起见,分别记 $a_{LS}(T+1)$ 和 $a_{LS}(T)$ 为 全球模式资料产品两个临近时段的某气象要素场, 其中, T 代表任意一个侧边界更新时刻。同时记 $a_{LS}(t)$ 为 RCM 从 CGCM 资料产品得到的侧边界 场, t 为 RCM 从侧边界 $a_{LS}(T)$ 开始的相对积分 时间(范围为 0~12 h)。则嵌套模式由线性处理 方案所确定的 RCM 中临近两个时次侧边界缓冲区 任意时刻的气象要素场表达式为:

$$\alpha_{\rm LS}(t) = \alpha_{\rm LS}(T) + \left[\alpha_{\rm LS}(T+1) - \alpha_{\rm LS}(T)\right] \times t/12,$$
(2)

若记 $a_{tend}(t)$ 为由线性处理方案所确定的 CGCM 资料产品大尺度强迫项与嵌套模式积分结果之间 的瞬时偏差,则

$$\overline{\alpha}_{\text{tend}}(t) = \alpha_{\text{LS}}(t+1) - \alpha_{\text{LS}}(t).$$
(3)

为考虑气象要素的日变化影响,在此基础上增加 一个正弦修正项 α[′] tend (t),其表达式为

$$\alpha'_{\text{tend}}(t) = \frac{1}{2} |\alpha_{\text{LS}}(t+1) - \alpha_{\text{LS}}(t)| \times \sin(\pi \times t/12).$$
(4)

因此,修正处理后,CGCM资料产品大尺度强迫 项与嵌套模式积分结果之间的瞬时偏差变化为

$$\alpha_{\text{tend}}(t) = \alpha_{\text{tend}}(t) \pm \alpha'_{\text{tend}}(t) = \left\{ \begin{aligned} \alpha_{\text{LS}}(t+1) - \alpha_{\text{LS}}(t) + \frac{1}{2} &| & \alpha_{\text{LS}}(t+1) - \alpha_{\text{LS}}(t) + \frac{1}{2} &| & \alpha_{\text{LS}}(t+1) - \alpha_{\text{LS}}(t) \\ \alpha_{\text{LS}}(t) &| \times \sin(\pi \times t/12), t = \Delta T_{00-12} \\ \alpha_{\text{LS}}(t+1) - \alpha_{\text{LS}}(t) - \frac{1}{2} &| & \alpha_{\text{LS}}(t+1) - \alpha_{\text{LS}}(t) \\ \alpha_{\text{LS}}(t+1) - \alpha_{\text{LS}}(t) - \frac{1}{2} &| & \alpha_{\text{LS}}(t+1) - \alpha_{\text{LS}}(t) \\ \alpha_{\text{LS}}(t) &| \times \sin(\pi \times t/12), t = \Delta T_{12-24} \end{aligned}$$
(5)

其中, ΔT_{00-12} 代表计算过程利用 CGCM 产品的 00 时和 12 时的资料, ΔT_{12-24} 则代表利用 CGCM 产 品的 12 时和次日 00 时的资料。故嵌套模式仿真 处理方案确定的 RCM 中临近两个时次侧边界之间 任意时刻的气象要素场表达式为

$$\alpha_{\rm LS}(t) = \alpha_{\rm LS}(T) + \lfloor \alpha_{\rm LS}(T+1) - \alpha_{\rm LS}(T) \rfloor \times t/12 + \alpha_{\rm tend}(t).$$
(6)

为检验上述处理方案的效果,本文随意挑洗 了位于模式缓冲区的两个观测站点,将其观测实 况资料 (3h间隔)、仿真处理结果以及嵌套模式 原有处理方式得到的结果进行了对比。如图1中 所示,观测站点分别是位于长江源头的托托河 「站号: 56004, (34.22°N, 92.43°E), 海拔高度 为4534.30 m] 和内蒙古自治区的二连浩特「站 号: 53068, (43.65°N, 111.97°E), 海拔高度为 965.90 m]。从图 2 可以看出,经过上述仿真方案 处理后的两站资料都较嵌套模式原有处理方式更 接近实况, 且气温波动的规律正好与天气气候的 日变化规律特征相一致。对比分析图 2a 和 2b 可 以看出, 仿真处理的结果在托托河站的结果不如 二连浩特站理想,这与缓冲区的时区跨度有关, 该仿真处理方案更适合东八时区附近的模式缓冲 区域。但从均方根误差的角度分析,该段时间内 嵌套模式原有处理方案相应站点的方差分别为 4.36 和 4.14, 两站仿真处理后的资料与观测资料 的方差分别为 3.12 和 2.45, 分别减少了 28% 和 41%。以下将该仿真处理方案应用到区域气候模 式 ASRegCM 中, 针对 2006 年 5 月的气候特征进 行模拟对比分析,以检验该仿真处理方案在气候 预测中的作用。为便于描述,以下将仿真处理后 的试验简称 SEN 试验, 侧边界缓冲区没有进行修 正的试验简称 CTL 试验。



图 2 缓冲区内地面气温的逐时演变: (a) 托托河站; (b) 二连浩特站。OBS 为观测结果, CTL 为控制试验结果, SEN 为敏感性试验结果 Fig. 2 Hourly variations of the surface air temperature in the model buffer zones: (a) Tuotuo He station; (b) Erenhot station. OBS is observation, CTL is control experiment, and sensitive is sensitive experiment

No. 2

2.3 侧边界仿真在数值模式中的实现

首先分析嵌套模式下垫面处,经上述仿真方 案处理后所引起的地面温度变化。如图 3 所示, 在嵌套模式最低层 σ = 0.9975 处,SEN 试验与 CTL 试验的侧边界值在 00 时与 12 时偏差为 0, 而该两个时次即 CGCM 资料产品原有输出时次, 故 SEN 试验完全保留了原有大尺度背景场资料强 迫信息。进一步分析其他时次结果可以看出,在 此 σ 高度层,SEN 试验相对于 CTL 试验的偏差较 大的位置位于模式缓冲区的西边界和北边界,尤 其是西边界,气温最高偏差接近 10 °C;在缓冲区 的南边界和东边界,SEN 试验相对于 CTL 试验的 偏差则较小,其中,在东边界处气温偏差数值低 于 2 °C。结合图 1 给出的模式缓冲区地形分布加 以分析,可以看出,缓冲区各边界处 SEN 试验相 对于 CTL 试验的偏差分布与其所处区域的下垫面 热力差异特征相对应。缓冲区南边界和东边界大 部分位于海洋区域,尤其是东边界下垫面基本都 是海洋,海洋区域海表面附近高度的气温日较差 比较小。而西边界和北边界则位于青藏高原和内 蒙古草原等海拔较高、地形复杂的陆地区域,内 陆高原等陆地区域的气温日较差则比较大。此外, 从缓冲区西边界温度偏差随纬度的分布特征也可 以看出这一规律,20°N 以南区域温度的日变化明 显的低于该纬度以北的区域。

图 3 所给出的是嵌套模式缓冲区最低层的对 比结果,图 4 则进一步给出了嵌套模式缓冲区下 垫面为陆地区域的格点(30°N,90°E)和下垫面



图 3 侧边界缓冲区 SEN 试验相对于 CTL 试验地面温度差值的时间演变(单位:°C): (a) 西边界; (b) 东边界; (c) 北边界; (d) 南边界 Fig. 3 The temporal variations of the surface air temperature difference between SEN and CTL numerical experiments in the model lateral boundary buffer zones (units: °C): (a) West boundary; (b) east boundary; (c) north boundary; (d) south boundary

为海洋区域的格点 (25°N, 150°E), SEN 试验相 对于 CTL 试验的时空变化。对下垫面为陆地区域 的格点而言, SEN 试验与 CTL 试验的温度偏差在 垂直方向上的分布特征也存在一定的差异。以σ= 0.6 高度为界,该高度层以下的大气低层两试验 结果的温度差异比较大,该高度层以上的温度差 异则明显减小, 高层个别温差比较大的时刻也是 由于受低层较大温差的影响所致。区别于下垫面 为陆地区域的格点,下垫面为海洋区域的格点的 两试验温度差异在垂直方向上的梯度并不明显, 温度差异本身数值也较小, 仅与下垫面为陆地区 域格点的高层变化幅度接近。下垫面为陆地区域 格点处,两试验的温度差异在 $\sigma=0.2$ 以上的高层 接近0。但在下垫面为海洋区域的格点处,在该 σ 层以上的高度却可能出现较高的数值。高原区域 的温度日变化本身远大于海洋区域,而且高原地 区对流活动却没有海洋区域剧烈。因此高原地区 的温度日变化更多地受辐射的影响,而海洋区域 由于云阻挡以及对流活动等影响垂直方向上温度 变化的高度可能会比较高,日变化受辐射影响相 对而言要小,该规律特征与图4所示的结果一致。 因此,该仿真方案对嵌套模式缓冲区下垫面处气 温的处理,也符合天气气候规律。因此,SEN 试 验不但保留了大尺度背景场的固有资料信息,而

且在此基础上刻画的温度日变化信息与缓冲区不同下垫面区域的天气变化规律相符,体现了海陆 热力差异和区域时空热力变化规律,SEN试验的 仿真处理具有明确的气候学意义。下面对数值试 验结果加以对比,进一步检验SEN试验所引进的 侧边界缓冲区仿真处理方案在气候模拟中的作用。

3 试验结果分析

气候预测的对象是气象要素的距平,即某些气 象要素某段时间内相对于历史气候平均值的偏差, 因此,数值试验的结果分析主要针对距平值。CTL 试验与 SEN 试验对地面温度和降水距平分布的模 拟情况如图 5 所示(为直观起见,仅对正负距平符 号加以区分,并未考虑距平数值大小)。可以看出, 两试验距平分布格局总体一致,地面温度的距平符 号有 15 个格点发生变化,占区域格点的 2.6%,地 面降水的距平符号变化比例稍高,为 18 个站点, 占总站点数的 13.5%。因此,SEN 试验对模式区域 地面温度和降水距平分布格局的影响并不明显。

下面从距平量级变化的角度检验侧边界缓冲 区仿真处理后,SEN试验结果与CTL试验结果相 比,其月平均值是否更接近观测距平。从地面温 度场上分析,SEN试验相对于CTL试验而言,温



图 4 缓冲区内 SEN 试验相对于 CTL 试验温度差值的时空分布: (a) 西边界缓冲区的陆地区域格点 (30°N, 90°E); (b) 东边界缓冲 区的海洋区域格点 (25°N, 150°E)

Fig. 4 The temporal and spatial distributions of the air temperature difference between SEN and CTL numerical experiments in the model buffer zones: (a) Grid point $(30^{\circ}N, 90^{\circ}E)$ in the west buffer zone which lies in the land zones; (b) grid point $(25^{\circ}N, 150^{\circ}E)$ in the east buffer zone which lies in the ocean zones

2期



(a、c) CTL 试验和 (b、d) SEN 试验对 (a、b) 地面温度距平和 (c、d) 降水距平的模拟。深灰色网格区域为负距平, 浅灰 图 5 色网格区域为正距平,空白网格区域为缺测

Fig. 5 Simulated anomalies of (a, b) the surface air temperature and the (c, d) precipitation from (a, c) CTL experiment and (b, d) SEN experiment. The dark gray grids show the negative anomalies, the shallow gray grids show the positive anomalies, and the blank grids are the undefined data grids

度场主要偏差在 24°N~28°N 的范围内气温偏低, 其他区域尤其是台湾岛和雷州半岛区域的气温则 偏高(图 6a)。与其对应,实测地面温度距平结果 显示,2006年5月福建、广东一带气温偏低,台湾 岛北部以及 28°N 以北的地区温度偏高(图 6b)。由 此可见,观测距平分布结果与偏差试验模拟的温度 场分布相一致。从地面降水的角度分析, SEN 试验 结果较 CTL 试验结果的偏差主要特征是模拟的雨 带更加偏北,实际观测的降水距平结果同样显示, 沿模式区域内海岸线方向降水量较历史气候值明显 偏高,两者给出的结果也较为接近。此外,从试验 偏差结果与观测距平值的数值量级大小上看,两者 数量级相同, 这说明 SEN 试验结果对各气象要素 的影响是显著的。综合图 5 和图 6 的结果,不难看 出,虽然侧边界缓冲区仿真处理后的 SEN 试验结 果对地面气温和降水分布格局的影响并不明显,但 SEN 试验较 CTL 试验的模拟结果更加合乎观测结 果,在主要气象要素地面气温和降水强度方面, SEN试验模拟结果确有一定程度的改进。

从预报评分的角度定量加以分析, SEN 试验 较 CTL 试验模拟结果的各项评分整体都有所提高 (图略)。在各评分标准中,反映大尺度距平符号 的评分要素——预报评分和技巧评分的提高有限, 但反映距平符号量级的评分指标——异常级评分 和距平相关系数的提高较为明显。其中,地面温 度的一级异常 TS 评分和地面降水的距平相关系数 提高比较明显,分别为70%和21%。

机理探讨 4

侧边界缓冲区的修正项对白昼和夜晚所添加 正弦项的振幅相反,刚好构成24h的日周期。因



图 6 (a, b) 地面温度(单位: °C)和(c, d) 地面降水(单位: mm)的(a, c) 试验偏差及其(b, d) 对应的观测距平 Fig. 6 The (a, c) difference distributions of (a, b) surface air temperature (°C) and (c, d) precipitation (mm) from SEN and CTL experiments, and (b, d) corresponding observation anomalies

此,模式细网格区域日平均地面气温和降水的演 变特征(如图7a和7b所示)正可以反映该修正 处理对区域数值模拟的总效应,不难发现两方面 的特征:其一,就整个模式细网格区域平均结果 而言,侧边界修正后的数值模拟结果使地面气温 有变暖的趋势,地面降水呈现增多的特征。其二, 对于日变化较为剧烈的天气过程,侧边界修正后的 模拟结果使其差异变得更加明显,如5月9~11日 的冷空气过程和25~27日的高强度降水过程。

从时空演变的角度加以分析(如图7c和7d 所示),侧边界修正处理后,在整个细网格模式区 域触发形成了地面温度新的波动,纬向平均结果 显示地面气温出现10d左右的波动演变特征,经 向平均结果则显示地面气温出现7d左右的波动 演变特征,而且该特征在模式区域东侧和北侧下 垫面为陆地的区域尤为明显。降水的产生分为两 种情况,一是热力过程造成对流发展,形成阵性的对流性降水;另一种是由于流场环流的演变, 冷暖空气相互作用形成的连续的非对流性降水。 从两种降水在模式细网格区域区域平均的演变特征(如图7e和7f所示)可以看出,侧边界修正后 模拟的对流性降水减少,非对流性降水大量增加, 且夜间对流性降水的减弱较白昼更为明显。该结 果表明,在数值计算过程中,由模式对流参数化 形成的降水减少,而由显式微物理过程产生的降 水比重增加。

综合分析图 7 的结果可以看出,地面气温和 降水强度模拟的改进首先源于侧边界修正处理对 原有地面气温波动振幅的放大。尽管侧边界缓冲 区的修正项对白昼和夜晚所添加正弦项的振幅相 反,刚好构成 24 h的日周期,但其总体效果并不 是对原有地面气温波动波峰波谷传播的简单时间



图 7 SEN 试验相对于 CTL 试验的区域平均偏差结果:(a) 日平均地面温度;(b) 日平均降水变化距平百分率;(c) 经向和(d) 纬向 平均地面温度(单位:°C);(e) 昼和(f) 夜降水变化距平百分率

Fig. 7 The area averaged differences of the SEN and CTL experiments: (a) Daily averaged surface temperature; (b) daily averaged anomaly percentage of precipitation; (c) meridional and (d) zonal variations of the surface temperature (°C); (e) day and (f) night anomaly percentage of precipitation

调整。其次,侧边界修正处理后的地面气温增加 了周期为7~10 d的经向和纬向低频波动分量, 抑止了不稳定的对流性降水过程,增加了连续性 的非对流性降水,削弱了热带、亚热带地区积云 对流与非对流云之间的不稳定性。

5 结论与讨论

本文通过修正嵌套模式侧边界缓冲区强迫项

计算方法,初步实现了数值模式侧边界缓冲区区 域温度日变化的仿真,利用模拟结果讨论了基于 有限时次间隔的全球模式资料产品,如何在嵌套 模式中更好地引入大尺度强迫的问题。得出的主 要结论如下:

(1) 在背景场大尺度强迫项与嵌套模式积分 结果瞬时偏差的基础上增加一个正弦修正项,可 以将有限时次间隔的 CGCM 资料产品在 RCM 的 每个积分步长时刻都加以时间上的细化,更好地 在数值模式中考虑气温日变化影响。

(2) 该侧边界缓冲区强迫的改进方案不但保 留了大尺度背景场的固有资料信息,而且其所刻 画的温度日变化信息与不同下垫面区域的天气变 化规律相符合,具有明确的天气气候学意义。

(3)该侧边界缓冲区强迫的改进方案对地面 气温和降水距平分布的影响并不明显,但对二者 强度的模拟有一定程度的改进,其中地面降水距 平量级的改善尤为明显。

(4)该侧边界缓冲区强迫的改进方案一方面可以对原有地面气温波动振幅加以放大,另一方面使地面气温的模拟中增加周期为7~10 d的经向和纬向低频波动分量,两者的综合效应抑止了不稳定的对流性降水过程,增加了连续性的非对流性降水,削弱了数值模式中热带和亚热带地区积云对流与非对流云之间的不稳定。

本文的研究内容一方面是为检验嵌套模式对 外部强迫响应的敏感性,另一方面更是为了嵌套 模式的进一步发展和完善,使其能更好地模拟区 域气候的细节特征,进而提高短期区域气候预测 的准确率。应该指出,该侧边界缓冲区强迫的改 进技术是初步的,技术处理较为单一,改进试验 方案对较短时间尺度(如旬尺度)的影响有一定 的局限性,对于季节、年尺度数值模拟而言,此 种改进处理对模拟结果的影响是否会更加明显, 也有待开展更多的试验加以详细对比研究。

参考文献 (References)

- Dudhia J, Gill D, Manning K, et al. 2004. PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version 3 [R]. NCAR, USA, 180pp.
- Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T. 1993. Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part II. Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions [J]. Mon. Wea. Rev., 121: 2814 – 2832.
- Giorgi F, Marinucci M R. 1996. An investigation of the sensitivity of simulated precipitation to model resolution and its implications for climate studies [J]. Mon. Wea. Rev., 124 (1): 148–166.
- Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. 1995. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale Model (MM5) [R]. Technical Report NCAR/TN 398+STAR, National Center for Atmosphere Research, 16 – 17.
- 黄丽萍, 颜宏, 赵俊英. 2004. 区域气候模拟中侧边界嵌套误差的

研究 [J]. 应用气象学报, 15 (2): 152-161. Huang Liping, Yan Hong, Zhao Junying. 2004. Analysis of lateral boundary nesting errors in regional climate modeling [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 15 (2): 152-161.

- Jones R G, Murphy J M, Noguer M. 1995. Simulation of climate change over Europe using a nested regional climate model. Part I. Assessment of control climate including sensitivity to location of lateral boundary conditions [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 52: 95-118.
- 鞠永茂,王汉杰,万应虎,等. 2011. 航空短期区域气候模式预测 系统研究 [J]. 气候与环境研究,16 (1):85-93. Ju Yongmao, Wang Hanjie, Wan Yinghu, et al. 2011. A study of the aviation short-term regional climate model prediction operational system [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (1):85-93.
- 李维京,张培群,李清泉,等. 2005. 动力气候模式预测系统业务 化及其应用 [J]. 应用气象学报,16 (增刊):1-11. Li Weijing, Zhang Peiqun, Li Qingquan, et al. 2005. Research and operational application of dynamical climate model prediction system [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 16 (Suppl.):1-11.
- 钱永甫,刘华强. 2001. 论区域气候模式与全球模式嵌套时的边界 区的选择 [J]. 大气科学, 25 (4): 492 - 502. Qian Yongfu, Liu Huaqiang. 2001. On nesting area selection of regional climate models coupled to a global climate model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (4): 492-502.
- Seth A, Giorgi F. 1997. The effects of domain choice in summer precipitation simulation and sensitivity in a regional climate model [J]. J. Climate, 10: 2698-2712.
- 沈桐立,丁一汇,李骥,等. 1996. 区域模式的嵌套边界条件研究 [J]. 南京气象学院学报,19(4):427-433. Shen Tongli, Ding Yihui, Li Ji, et al. 1996. Study on nested boundary conditions of a regional model [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 19 (4): 427-433.
- Tolman H L. 2002. User manual and system documentation of WAVE-WATCH III version 2.22 [R]. NOAA/NWS/NCEP Technical Note, 133pp.
- 魏和林,符淙斌, 王维强. 1998. 区域气候模式侧边界的处理对东 亚夏季降水模拟的影响 [J]. 大气科学, 22 (5): 779 - 790. Wei Helin, Fu Congbin, Wang Weichyung. 1998. The effect of lateral boundary treatment of regional climate model on the East Asian summer monsoon rainfall simulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22 (5): 779-790.
- 钟中,苏炳凯,赵鸣,等. 2004. 区域气候模式中侧边界地形缓冲 区作用的数值试验 [J]. 高原气象,23 (1):48-54. Zhong Zhong, Su Bingkai, Zhao Ming, et al. 2004. Numerical experiments on the effects of lateral boundary topographic buffer zone in regional climate model [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (1):48-54.