一个引入近地层的区域气候模式*

汤剑平 苏炳凯 江 静 赵 鸣 潘益农

(南京大学大气科学系,南京 210093)

符淙斌

(中国科学院大气物理研究所,北京 100029)

摘 要 把近地层引入到 NCAR 的区域气候模式 RegCM2 中(简称为 RCMC1),用该 模式及 1991 年梅雨期间的观测资料作了 3 组模拟试验,并同实况进行了比较.结果表明, 在区域气候模式中引入近地层后,能够更合理的模拟出地表及植被同大气之间的感热和潜热 通量输送,从而改善模式模拟的月降水及月平均地面温度的分布.10 层的 RCMC1 比 18 层 RCM 具有更优的模拟气候的能力,且一个模式天的计算量节省 227 s。

关键词:近地层;区域气候模式;垂直层次

1 引言

近年来,区域气候的模拟研究在国际、国内的发展都非常快,出现了许多区域气候 模式(如 NCAR-RCM^[1,2],CSU-RAMS^[3]等),其中最有代表性的是 NCAR 的第二 代区域气候模式 RegCM2。随着 NCAR 的区域气候模式 RegCM2 在 90 年代引进国内 后,用该模式进行过许多东亚区域的季风、梅雨的模拟试验(如文献[4~8]),这些试 验都表明区域气候模式 RegCM2 能比 GCM(大气环流模式)更好地模拟出东亚区域 的气候特征。主要因为 RegCM2 模式的分辨率要比全球模式 GCM 高很多,模式考虑 的物理过程比 GCM 更为细致,能够较好地表示区域范围的地形和地表特征,同时还 包含了较详细的陆面过程,所以 RegCM2 能比 GCM 更好地分辨出区域尺度的大气特 征。但模式还存在一些有待改善的地方,如模拟的降水偏大^[6]、地面温度南部偏冷、北 部偏热^[7]等。

区域气候模拟中的一个重要部分是陆面过程,而现今许多的陆面过程模式基本上都 没有区分近地层。赵鸣等在1995年建立了一个引人近地层的土壤--植被-大气相互作用 模式^[9]。他们用该模式对几种不同植被类型的试验表明,该模式能较细致地描述土壤-植被-大气近地层间的相互关系,模拟的温度、通量都很合理,能够应用于气候模式。 为了进一步研究近地层对气候模拟的影响,我们把该模式引入区域气候模式。 RegCM2,并用1991年梅雨期的实测资料及引入近地层后的区域气候模式作了3组试 验,以检验改进后的模式的模拟能力。

1999--07--27 收到, 1999--11--25 收到修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目 G1999043400 和"九五"攀登预选项目"我国未来生存环境变化趋势的预测 研究"联合资助



2 引入近地层的区域气候模式

本文所用的模式是 NCAR 的第二代区域气候模式 RegCM2, 是在 MM4 的基础上 发展起来的。为了适合区域气候研究的需要,模式主要在 MM4 的基础上引入了辐射过 程和陆面过程。辐射方案采用的是 CCM2 模式中的辐射计算方案,陆面过程用生物圈 一大气输送方案^[10] (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme, 缩写为 BATS)。详见文 献[1,2]。

我们把引入近地层的土壤--植被--大气相互作用模式简称为 SVA 模式,该模式主要 对 BATS 方案作了 3 个方面的改进^[9]。

(1) SVA 模式与 Dickinson 的生物-大气输送方案(BATS)最主要差别是考虑了 近地层的影响。BATS 方案中土壤、植被与大气的各种通量交换是在大气模式最低层进 行的,而 SVA 模式中通量是与近地层交换的,这更符合实际,现今大多数的陆面过程 模式中都没有区分近地层。近地层的参数化过程类似于 Zhang 和 Anthes 的边界层模式 的处理^[11]。近地层中的气象要素由近地层中的预报方程给出的:

 $\partial \theta_{\rm va} / \partial t = [H_g + H_f + 180(E_g + E_f)c_p \rho - H_a] / c_p \rho \Delta, \tag{1}$

$$\partial q_{a} / \partial t = (E_{g} + E_{f} - E_{a}) / \rho \Delta, \qquad (2)$$

其中、0_{va}为虚位温、q_a为水汽含量、H_g、E_g、H_f、E_f分别为地表向近地层的热通量 和水汽通量及植被向近地层的热通量和水汽通量、H_a、E_a分别为近地层向上的热通量 和水汽通量、Δ为近地层高度、在本文中我们取近地层高度为 20 m。

(2) SVA 模式采用电路理论来处理地表、植被向上的热通量和水汽通量。这和其他一些陆面模式(如 SiB2^[12]、SSiB^[13]、LAPS^[14])是相似的。BATS 中是根据计算拖曳系数来处理地表、植被与大气最低层的热通量和水汽通量。

(3)SVA 模式中辐射通量的计算参考了 Blackadar 的工作,该方案考虑了辐射在

222

土壤表面与植被间的多次发射和植被的透射作用。

在 RegCM2 中引入近地层后,用大气最低层的气象要素来驱动近地层,近地层部 分积分完成后把感热和潜热通量下传给 BATS 中植被,土壤;进而反馈近地层,再影 响上层大气。这样,引人的近地层将 RegCM2 与 BATS 耦合起来。

3 数值试验的方案

本文所取的区域主要包括长江、淮河流域,纬向和经向格点数分别为41和40,格距 为60 km,中心位于(36°N,117°E);下垫面类型由0.5°×0.5°的Olson全球资料转换 得到;模拟区域内的地形由1°×1°的全球地形经过插值平滑而得;模式的初始和侧边界 由1991年实测资料经过客观分析后提供,侧边界每12h更新一次,采用指数松弛侧边界 条件;模式所选的主要物理过程是Holtslag边界层方案、Kuo类型的积云对流参数化方 案和隐式水汽方案;大气模式的积分步长为200 s;由于模式中引进了近地层,而近地层 变量由预报方程算出,为了使模式积分稳定,我们取近地层的积分时步为50 s。



本文设计了3组试验来检验引入近地层后的区域气候模式的模拟能力。第一组试验 用 10 层的两个模式模拟了 1991 年梅雨期间 5 月 18 日到 5 月 27 日第一次强降水过程; 第二组试验是对 1991 年 6 月梅雨期降水的模拟,该组试验采用 10 层非均匀垂直分层, 整σ层为 0.00、0.15、0.30、0.45、0.60、0.75、0.85、0.93、0.97、0.99、1.00;第三组 试验类同第二组试验,但模式垂直分层采用 18 层非均匀,整σ层为 0.00、0.20、 0.30、0.40、0.45、0.50、0.55、0.60、0.65、0.70、0.75、0.80、0.85、0.90、0.95、 0.98、0.99、1.00。

4 模拟结果分析

为了方便起见,在每组试验中,我们把引入近地层的区域气候模式称 RCMC1,而 作为对比试验用的未改动的区域气候模式称为 RCM。

4.1 第一组试验

第一组试验的目的是检验一下引入近地层后的区域气候模式 RCMC1 对早梅天气 过程的模拟能力。我们用 10 层的 RCM 和 RCMC1 模拟了 1991 年梅雨期的第一次强 降水过程 (5 月 18 日到 5 月 27 日),这次强降水过程主要有 3 个强降水中心,一个位 于江西九江、德兴附近,另两个在江苏的徐州、连云港一带^[8] (图 1a)。从两个模式模



图 1 1991 年梅雨期第一次强降水过程(5月18日~5月27日)(单位: mm) (a) 实况;(b) 10 层 RCM 模拟结果;(c) 10 层 RCMCI 模拟结果



拟的结果看, RCM 模拟的 100 mm 等雨量线范围(图 1b)要比实况的偏小并且未能模 拟出位于连云港的一个强降水中心,模拟的降水量总体上要比实况偏小; RCMC1 模拟 的 100 mm 雨量线(图 1c)要更接近实况,并且能够模拟出位于连云港的强降水中 心,模拟的降水强度也有所改善。但两个模式都没有能够很好地模拟出位于江西境内的 降水中心。

可以说,引入近地层的 RCMC1 对模拟较长的天气过程的能力比原 RCM 有所提高。

4.2 第二组试验

本组试验目的在于模拟区域气候时,是否有必要引入近地层。1991 年 6 月是整个 1991 年梅雨过程中的第二阶段。这一阶段的降水主要集中在江淮流域(如图 2a),200 mm 等雨量线在 30~34°N 之间、111°E 以东,中心最大雨量为 478 mm。另外在华北 东北部地区也有 288 mm 的降水中心。

图 2b、c 分别为 10 层 RCM、RCMC1 模拟的 1991 年 6 月的降雨,从模拟的结果 可以看到,两个模式基本上都能模拟出月降水在江淮流域的主要分布。但与实况(图 2a 相比, RCM 模拟的 200 mm 等雨量线范围偏大,在 110°E 附近 200 mm 雨量线到



图 2 1991 年 6 月中国东部降水分布图(单位: mm) (a) 实况; (b) 10 层 RCM 模拟结果; (c) 10 层 RCMC1 模拟结果



29°N 左右,降水中心雨量偏大,中心最大雨量为487 mm,比实况的大。RCM 模拟的 降水中心位置在安徽南部地区与实况降水中心在安徽北部地区相比偏南,实况的降水中 心在115°E 以东,RCM 模拟的在115°E 两侧。RCMC1 模拟的江淮流域的月降水量与 实况比较接近,中心最大雨量为476 mm,主要降水分布在115°E 以东120°E 两侧, 200 mm 等雨量线在31~35°N 之间,位置略偏北、范围略偏大,比 RCM 模拟的结果 更接近实况。RCMC1 模拟的主要降水带在安徽中部地区,与实况相比还是偏南,但比 RCM 模拟的有所改善。另外,RCMC1 较好地模拟出了位于华北北部地区的一片降 水,中心最大雨量为278 mm,也要比 RCM 模拟的有所改善。总之,引人近地层后的 区域气候模式 RCMC1 对月降水的模拟,无论在降雨的强度、范围、位置等方面都要 比 RCM 有所改进,更接近实际。

对模拟的地面温度来说,图 3a 是由测站实测资料经过客观分析后得到的月平均地面温度,图 3b、c分别是 10 层 RCM 和 RCMC1 模拟的月平均地面温度。两个模式基本上都能模拟出月平均地面温度的南高北低分布,从江淮流域到华北地区有一暖脊,在黄海地区有一低温中心。与实况相比,RCM 模拟的月平均地面温度在模拟区域的南部偏低 2 ℃左右,在河套地区有一 21 ℃的高温中心,这一地区的模拟结果要比实际偏



图 3 1991 年 6 月月平均地面温度(単位: ℃) (a) 实况(客观分析); (b) 10 层 RCM 模拟结果; (c) 10 层 RCMC1 模拟结果



高。RCMC1 月平均温度与实况比较接近,在模拟区域南部同实况图相似也有 26 ℃的 等温线,在河套地区基本上都低于 20 ℃。两个模式模拟的月平均温度都偏小,但 RCMC1 模拟的结果要比 RCM 的有所提高。

在区域气候模式 RegCM2 中引人近地层后,主要是为了改进大气低层的潜热、感 热通量输送。图 4a、b 分别为 10 层 RCMC1 与 RCM 模拟的月平均的潜热和感热通量 的差值。从潜热通量的差值图中可以看到,在江淮流域东部(120°E 两侧)有两个正值 中心,在华北北部地区有一个正值中心,而在江淮流域其他地区大部分都是负值区。这 表明,RCMC1 模拟的潜热通量在江淮地区东部及华北地区要比 RCM 模拟的大、而在 江淮流域的其他地区要小。这与两个模式模拟的降水分布是相当一致的。RCMC1 模拟 的降水总体上要比 RCM 模拟的小,但在江淮东部偏大,也就是降雨中心向东移,并且 RCMC1 模拟出了华北地区的降水分布。感热通量的差值在模拟区域南部大部分是正值 区,而在北部以负值区为主,特别是在西北部有较大的负值中心。这表明 RCMC1 模 拟的感热通量在模拟区域的南部要比 RCM 模拟的大,而在北部(特别是西北部)要 小,与地表温度的模拟结果 RCMC1 在南部比 RCM 的高,相反北部较低是一致的。



226

110°E 120°E 110°E 120°E

图 4 1991 年 6 月月平均潜热和感热通量差值 (RCMC1-RCM) (单位: W / m²)

(a) 潜热通量差; (b) 感热通量差

虚线为负,实线为正

下面进一步分析影响月降水的动力因子月平均的垂直速度和涡度。图 5a 是 10 层 RCMC1 和 RCM 模拟的 6 月 850 hPa 平均垂直速度的差值图。从图中可以看到, 在模 拟区域南部(长江以南)基本上都是正值区,负值区主要在华北地区及长江、黄河的中 间区域。从 RCMC1 和 RCM 各自的 850 hPa 平均垂直速度场看(图略),在江淮流域 主要降水区域都是负值。垂直速度场的分析表明,引入近地层的区域气候模式模拟的向 上的垂直速度,在华北地区和长江、黄河中间地区要比原来的区域气候模式模拟的大, 而在模拟区域南部要小,从而引起降水分布 RCMC1 模拟的要比 RCM 模拟的靠北, 更与实况接近。与降水联系比较密切的另一个物理量是涡度。图 5b 是模拟的低层 850 hPa 涡度场的差值图,可以看到在模拟区域南部主要是负值区,正值区在长江流域下游



和黄河流域中部地区,而两个模式模拟的 850 hPa 平均涡度场(图略)在降雨区均为正 值。所以低层涡度场表明 RCMC1 模拟涡度在长江流域下游要比 RCM 模拟的大,从 而月降水的分布 RCMC1 的要靠东,更接近实况的降水分布。

上述分析表明:由于近地层的引入,使土壤、植被与大气间的通量交换不在模式大 气最低层进行而在近地层进行,改善了地表土壤、植被与大气之间的通量输送,引起大 气低层物理量(如垂直速度、涡度、散度等)的变化,进一步使模式模拟的降水,温度 分布引起改变,使模拟的结果更合理。



图 5 (a)1991 年 6 月平均垂直速度差值(RCMCI-RCM)(单位: 10⁻³ hPa/s) 和 (b) 平均涡度差值(RCMC1-RCM)(单位: 10⁻⁵/s) 虚线为负,实线为正

4.3 第三组试验

本组试验目的是考察当模式垂直层次增加的情况下,是否还需要引入近地层到区域

气候模式中。为此我们又增加 18 层垂直分层对 1991 年 6 月进行了模拟。

通常模式垂直层次增加对气候模拟能力是有所增强的^[15],为此先看一下应用 RCM 模式的情况,也就是比较均未引入近地层的 RCM 的 18 层(图 6a)模拟结果和 10 层 模拟结果(图 2b)的差异。18 层 RCM 模拟的 200 mm 雨带范围要比 10 层 RCM 的 模拟结果有所减小,在 29~34°N 之间,200 mm 雨带位置在 118°E 以东比 10 层的偏 东,这与实际更加符合;主要降水带分布在 120°E 两侧,比 10 层的模拟要好,但位置 还是比较偏南。另外 18 层 RCM 能够较好地模拟出位于华北北部地区的降水分布,中 心为 187mm。而引入近地层后的区域气候模式的情况,也就是比较 RCMC1 的 10 层 (图 2b)和 18 层(图 6b)的模拟结果,10 层 RCMC1 模拟的月降水 100 mm 雨量线略 偏北,300 mm 雨量线范围偏小,而 18 层 RCMC1 模拟的月降水 100 mm 雨量线略 偏北,300 mm 雨量线也有所扩大,可见层次加密后的 RCMC1 的模拟结果要比未加 密的好。比较表明,RCM 和 RCMC1 在模式垂直层次增加的情况下,确实均增强了它 们的区域气候模拟能力。

进一步察看模式垂直层次增多的情况下引入近地层的贡献如何,也就是再比较垂直



层次均为 18 层的引入近地层的区域气候模式 RCMC1 与 18 层 RCM 的模拟效果。图 6a、b 分别为 18 层 RCM 和 RCMC1 模拟的 1991 年 6 月月降水分布。从 200 mm 等雨 量线的位置来看,RCM 模拟的结果比较偏南,南部到 29°N 左右,而 RCMC1 模拟的 基本上在 30~34°N,与实况(图 1a)的 200 mm 雨量分布(31~34°N)更加接近。从 主要降水中心的位置来看,RCM 模拟的降水中心主要在安徽南部地区,与实况相比偏 南一个纬距左右,而 RCMC1 模拟的基本上都在安徽北部,与实况的两个降水中心的 位置比较接近。从降水强度来看,RCM 模拟的两个降水中心为 658 mm 和 520 mm, RCMC1 模拟的为 463 mm 和 521 mm,实况为 478 mm 和 419 mm,RCMC1 的结果,更接近实况。另外从华北北部地区的降雨分布来看,两个模 式基本上都能模拟出这一地区的降雨分布,但 RCM 模拟的为 187 mm,比实况 288 mm 小 100 mm 左右,而 RCMC1 模拟的两个中心为 242 mm,更接近实际。比较表 明,尽管模式垂直层次增加,引入近地层后的 RCMC1 与第一组试验情况一样,对气候的模拟能力显著增强。可见,当模式垂直层次增加时,仍有必要要引入近地层。



25 卷

228

110 E 120 E 110 E 120 E

图 6 18 层垂直分层模拟的 1991 年 6 月降雨分布(单位: mm) (a) RCM 模拟结果; (b) RCMC1 模拟结果

最后进行交叉比较,即比较 10 层 RCMCI 的模拟结果和 18 层 RCM 的模拟结 果。18 层 RCM 模拟的月降水的中心雨带在安徽南部地区,比实况要偏南一个纬距左 右,而 10 层 RCMC1 模拟月降水在安徽中部地区,虽然与实况比还是有所偏南,但比 18 层 RCM 模拟的位置要好。从降水中心的强度来看 18 层 RCM 模拟的两个中心为 658 mm 和 520 mm,比实况偏大许多,而 10 层 RCMC1 模拟的为 474 mm 和 475 mm,与实况很接近。另外从 200 mm 等雨量线分布和华北北部地区的降水模拟来看, 10 层 RCMCI 的结果都要优于 18 层 RCM 的结果。比较表明,尽管引人近地层与增加 模式垂直层次都有改善模式模拟气候的能力,但有显著的差异,尤其是模拟主要雨区位 置、范围、强度等都是前者优于后者。另外,引入近地层仅仅是一层,就模式垂直层次 10 层而言,一个模式天的计算量 RCMC1 花费 CPU 747 s,比 RCM 的 567 s 仅增加 180 s,而 18 层的 RCM 花费 974 s,比 RCM 的增加 407 s, 10 层的 RCMC1 比 18 层



的 RCM 节省 227 s。

本组试验综合分析表明:不管垂直层次较少(10层)还是较多(18层)的情况,都有引人近地层到区域气候模式的必要。如果采用引入近地层的 10层 RCMC1 作长期积分,不但能节省机时更经济,而且能得到比较满意的结果。

5 结论和讨论

本文首先把近地层引人到区域气候模式中,并用该模式进行了3组模拟试验,其结论归纳如下:

(1)在区域气候模式中引入近地层后,使土壤、植被与大气间的通量交换不在模式 大气最低层进行而在近地层进行,改善了地表土壤、植被与大气之间的通量输送,进一步引起大气低层动力过程的变化,从而改善了模式对区域气候的模拟能力。

(2)引入近地层后的 10 层区域气候模式对月降水等要素的模拟比原区域气候模式 要好,而且节约了计算时间。这对长期气候积分是非常有利的。

总之,引人近地层大气-植被-土壤过程后能够更合理地描写植被、土壤与大气间 的通量输送,有利于改善区域气候的模拟。

参考文献

- Giorgi, F., M. R. Marinucci and G. T. Bates. Development of a second generation regional climate model (RegCM2), Part I: Boundary layer and radiative transfer process, Mon. Wea. Rev., 1993, 121, 2794~2813.
- 2 Giorgi, F., M. R. Marinucci, D. De. Canio and G. T. Bates, Development of a second generation regional climate model (RegCM2), Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary condition, Mon. Wea. Rev., 1993, 121, 2814~2832.
- 3 万齐林,区域气候数值模式的研究及试验,中国短期气候预测的模式研究(赵宗慈主编),北京:气象出版 社,1996.121~132.

- 4 魏和林、符淙斌、王维强,区域气候模式侧边界的处理对东亚夏季风降水的模拟的影响,大气科学,1998, 22,779~790.
- 5 符淙斌、魏和林、陈明、苏炳凯等,区域气候模式对中国东部季风雨带演变的模拟,大气科学,1998,22, 523~534.
- 6 罗勇、赵宗慈, NCAR RegCM2 对东亚区域气候的模拟试验,应用气象学报,1997,8(增刊),124~133。
- 7 刘永强、丁一汇、赵宗慈、1991年江淮特大异常降水的区域气候模拟,中国短期气候预测的模式研究(赵宗 慈主编),北京;气象出版社、1996,106~120.
- 8 龚威、李维亮,中国区域气候模式的建立和模拟试验结果的分析,气候变化规律及其数值模拟研究论文(第 二集)(85-913项目 02课题论文编委会编),北京:气象出版社,1996,273~288.
- 9 赵鸣、江静、苏炳凯、符淙斌,一个引入近地层的土壤-植被-大气相互作用模式,大气科学,1995,19,405 ~414.
- 10 Dichinson, R., A. Henderson-Sellers and P. J. Kennedy, Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1E as Coupled to the NCAR Community Climate Model, NCAR, Tech. Note. NCAR / TN-387+STR, 1993, 72pp.
- 11 Zhang Dalin and R. A. Anthes, A high-resolution model for the PBL-sensivity tests and comparison with SESAME-79 data, J. Appl. Meteor., 1982, 21, 1594~1609.
- Seller, P. J. et al., A simple biosphere model(SiB) for use within general circulation models, J. Atmos. Sci., 1986, 43, 505~531.
- 13 Xue, Y., P. J. Seller et al., A simplified biosphere model for global climate studies, J. Climate, 1991, 4, 345~364.



- 14 Mihailovic, D. T. and Ruml M., Design of land-air parameterization scheme (LAPS) for modelling boundary layer surface processes, *Meteor. Atmos. Phys.*, 1996, **58**, 65~81.
- 15 赵宗慈、罗勇,区域气候模式在东亚地区的应用研究——垂直分辨率与侧边界对夏季风降水影响研究、大气 科学,1999,23,523~532。

A Regional Climate Model with a Surface Layer

Tang Jianping, Su Bingkai, Jiang Jing, Zhao Ming and Pan Yinong

(Department of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093)

Fu Congbin

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

Abstract By use of the regional climate model RCMC1, which modifies the NCAR regional climate model Regcm2 by including a surface layer, we have performed 3 simulation experiments with observational data of June 1991. The results show that the inclusion of the surface layer in the regional climate model can simulate the distributions of monthly precipitation and monthly mean surface temperature more accurately due to the more reasonable simulations of the sensible and latent fluxes between the surface, vegetation, and the atmosphere. The simulation ability of RCMC1 with 10 levels is superior to that of the Regcm2 with 18 levels.

Key words: surface layer; regional climate model; vertical levels of the model

