

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 夏季季风降水影响研究*

赵宗慈 罗勇

(中国气象局国家气候中心, 北京 100081)

摘要 将美国国家大气研究中心(NCAR)的区域气候模式(RegCM2-1996)设置在东亚-西太平洋区域(简称东亚区域气候模式 RegCM2/EA)。利用该模式研究东亚区域气候模式的几个重要问题, 即: 垂直分辨率的影响, 侧边界条件(如嵌套技术、缓冲区宽度、不同资料)的重要性等。数值试验结果表明: 细垂直分辨率模拟的降水分布优于粗分辨率模式, 但容易引起“数值点暴雨”; RegCM2/EA 与不同来源的大尺度侧边界嵌套, 模拟的降水会有明显的不同; 当用 RegCM2/EA 模拟较大区域时, 应该取较宽的缓冲区; 在各种嵌套方案中, 指数松弛嵌套方法最好。这些结果为进一步探讨东亚区域气候模式的特点以及发展与改造区域气候模式提供一定的依据。研究结果还需要用更多的数值试验来验证。

关键词 区域气候模式 东亚 降水模拟 分辨率 侧边界条件

1 引言

区域气候变化明显影响该地区的经济与社会发展, 因此, 各国科学家和政府极为重视对区域气候变化与变率的研究。区域气候变化与变率的模拟研究经常采用全球环流模式(GCM), 但是在区域尺度存在较大的不确定性。为解决这些问题, 高分辨率的全球环流模式、可变分辨率的全球环流模式和区域气候模式在近年来有了较大的发展^[1,2]。

近10年来, 美国国家大气研究中心(NCAR)的第一代和第二代区域气候模式(简称 RegCM1 和 RegCM2)已经被广泛地用来模拟北美、西欧、东亚和非洲的区域气候变化与变率^[3~10]。研究表明, 区域气候模式有能力模拟降水过程以及洪涝和干旱强度与分布。他们的研究还注意到, 区域气候模式在很大程度上取决于侧边界条件, 因而, 嵌套方法是极为重要的。90年代以来, 中国科学家也在引入该模式后作了一些对东亚和中国气候变化的模拟研究^[11~15]。国内外对区域气候模式的研究都注意到, 模式的物理过程、分辨率和侧边界处理是区域气候模式发展中的几个重要问题。本工作则选择垂直分辨率和侧边界方面进行重点研究。由于较多的中国科学家用 NCAR RegCM

1998-04-28收到, 1998-10-19收到修改稿

* 中国气象局和美国能源部的合作项目中国区域气候模式对比计划, “九五”重中之重项目 96-908-02 和国家自然科学基金重大项目 39393000 的联合资助

类的模式做模拟研究, 因而, 本研究也选用该模式。

本文的第 2 部分将简单地介绍东亚-西太平洋区域气候模式(简称为 RegCM2/EA)的基本特征, 第 3 部分将着重讨论与分析东亚区域气候模式的几个重要的问题, 如垂直分辨率的作用、侧边界条件(如嵌套技术、缓冲区宽度、不同资料)的重要性。文章的最后部分将给出结论与讨论。

2 RegCM2/EA 模式简述和试验设计

我们的研究是将美国国家大气研究中心(NCAR)的区域气候模式(RegCM2 1996 版本)设置在东亚-西太平洋区域, 简称东亚区域气候模式(RegCM2/EA)。NCAR RegCM2 模式的动力学框架同于美国国家大气研究中心与美国宾州大学联合建立的有限区域模式 MM4^[6,7,16], 模式中主要的气候物理过程源于 NCAR 全球大气环流模式 CCM2 (1993 版本)。模式中还包括可选择的 Kuo/Anthes 或 Grell 对流降水方案和显式与隐式非对流降水方案, BATS 陆面植被方案^[17], 显式行星边界层计算方法^[18]以及 NCAR CCM2 大气辐射计算方案等^[6,7]。NCAR RegCM2 模式的嵌套方案, 缓冲区宽度、对流与非对流降水方案等都设置成可选择的多种通道^[6~8], 以使用户可以根据不同区域的气候特点进行多种选择和修改相应的参数。RegCM2/EA 的模式范围大致在(10~45°N, 90~150°E), 中心在(30°N, 120°E)。模式的水平分辨率为 60 km。

本研究中进行的数值试验有: 模式取不同的垂直分辨率如粗分辨率 14 层和细分辨率 23 层; 侧边界缓冲区的宽度试验; 模式输入不同的初边界场资料如欧洲中期数值预报中心(ECMWF)分析资料(简称 EC)和再分析资料(简称 EC-RE), 美国国家环境预测中心与国家大气研究中心(NCEP/NCAR)的再分析资料(简称 NCEP-RE)以及各种嵌套方案(如固定侧边界、时间相关、输入与输出、海绵侧边界、线性和指数松弛法)的评估。全部数值试验均输入 1997 年 5 月 1 日 00 时作为初始场和 5~7 月的侧边界场。

为便于分析, 根据东亚地区气候特征, 将东亚地区分成 8 个分区(见图 1)^[19]: 中国南方(SC)、中国西南(SWC)、中国江淮流域(YT)、中国西北(NWC)、中国华北(NC)、中国东北(NEC)、朝鲜半岛(KOR)、日本(JAP)。

由于本文重点是研究东亚地区夏季季风降水的模拟, 因此, 主要的计算与分析着重于模式对降水的模拟效果。为严格对比各种试验结果, 我们统一计算了模式在东亚全区(TOT)、8 个分区的降水量以及与相应观测值的误差, 均方差(RMS)和降水在全区分布的相关系数(CC)等, 以此作为评估各种方案的优劣标准。

3 对东亚区域气候模式应用的数值试验

用东亚区域气候模式重点作了垂直分辨率和侧边界状况的数值试验。

3.1 垂直分辨率

NCAR RegCM 已经作过北美区域粗细水平分辨率的作用的研究^[8], 但是, 尚未作

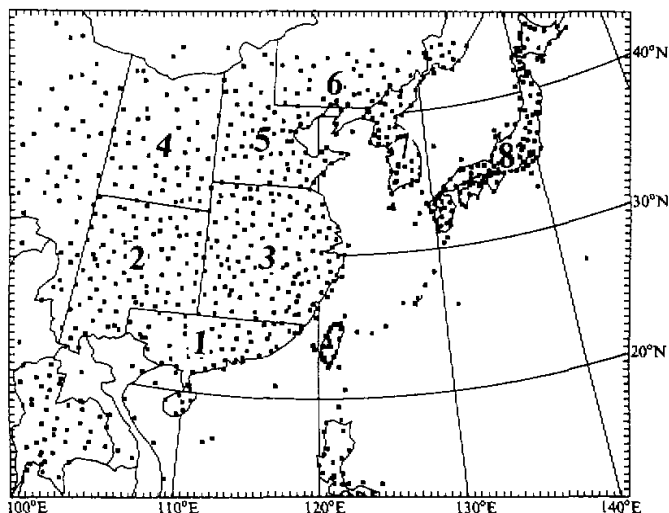


图1 模式在东亚地区的8个分区

过区域气候模拟对垂直分辨率的敏感性研究。以前, NCAR RegCM 类模式的垂直分辨率一般取 10~16 层, 从未多于 18 层^[6,7,9,10,13]。最近, 在三个区域气候模式 (PNNL RCM、SUNYA RCM 和 NCAR RegCM2) 作东亚地区气候模拟对比试验中, 考虑到区域气候模式的垂直层数应该多于全球环流模式, 因而取模式的垂直分辨率为 23 层^[13]。综上所述, 有必要研究垂直分辨率对区域气候模式的影响程度。

区域气候模式垂直分辨率的敏感性试验采用 Grell 对流方案和显式湿度方案, 分别取模式的垂直分辨率为 23 层和 14 层, 作模拟试验。每个试验从 1991 年 5 月 1 日积分到 5 月 31 日。模式的初边界场取自 ECMWF 分析资料, 缓冲区取 18 圈, 侧向嵌套采用指数松弛法。表 1 给出试验中 14 层和 23 层分别对应的 σ 值。对于 23 层试验, 垂直分辨率的取法同于三个东亚区域气候模式的对比试验^[15]。对于 14 层试验, 垂直分辨率的取法同文献[10]的研究。从表 1 注意到, 两个试验的模式顶部均在 10 hPa。对于 14 层和 23 层试验, 分别有 5 层和 8 层在 0.8 以下; 6 层和 12 层在 0.8 和 0.2 之间; 4 层在 0.2 以上。

表1 14层 (L14) 和 23层 (L23) 垂直分辨率试验的 σ 值

试验	低于 0.8	在 0.8 和 0.2 之间	高于 0.2	顶部
L14	1, 0.99, 0.97, 0.93, 0.86	0.77, 0.67, 0.56, 0.46, 0.35, 0.25	0.17, 0.10, 0.04, 0	10 hPa
L23	1, 0.99, 0.98, 0.96, 0.93, 0.89, 0.85, 0.80	0.75, 0.70, 0.65, 0.60, 0.55, 0.50, 0.45, 0.40, 0.35, 0.30, 0.25, 0.20	0.15, 0.10, 0.05, 0	10 hPa

计算了两个数值试验 (L14 和 L23) 模拟的 1991 年 5 月东亚全区和 8 个分区的降水量和模拟与观测场的相关系数和均方差, 如图 2 所示。从图 2 注意到, 模式取垂直分辨率 23 层模拟的降水相关系数为 0.42, 明显高于 14 层模拟的相关系数 (0.30)。但

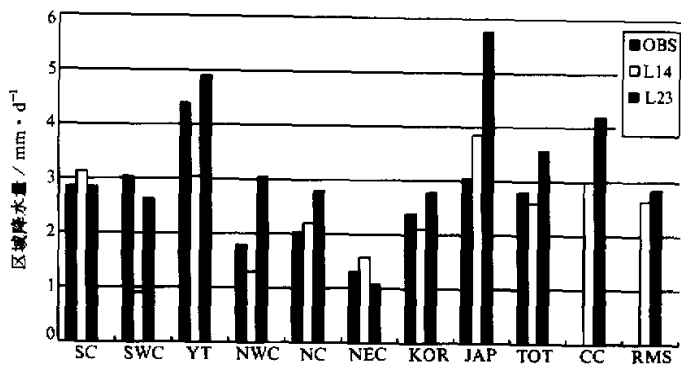
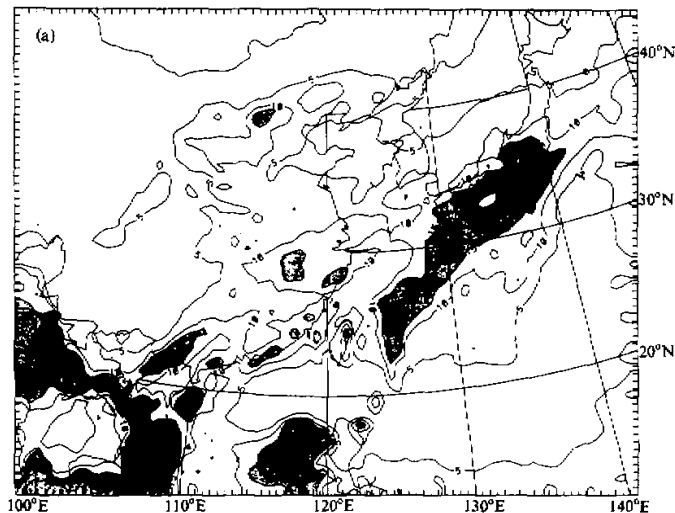


图2 1991年5月观测和L14、L23试验模拟的东亚全区和8个分区降水量, 相关系数(CC), 均方差(RMS)
SC: 中国南方, SWC: 中国西南, YT: 中国江淮流域, NWC: 中国西北,
NC: 中国华北, NEC: 中国东北, KOR: 朝鲜半岛, JAP: 日本

是, 对于整个东亚区域降水量模拟与观测的均方差, 则是14层略优于23层。对于8个分区降水量的模拟, 注意到23层模式对于中国西南分区(SWC)降水量的模拟值较接近观测值, 而14层模式则模拟降水量太小。对于其他分区, 则有些分区23层模拟较好, 有些分区14层较好。

为进一步分析14层与23层的异同, 图3给出1991年5月东亚地区模式分别取14层和23层模拟的降水分布以及相应的观测场。对比图3发现, 14层和23层模式均合理地模拟出发生在我国江淮流域和日本南部的洪涝, 但是, 与观测相比, 14层模式过多地模拟了出现在华北地区的降水。

需要强调指出的是, 虽然23层模式模拟的降水分布明显优于14层模式, 但是23层模式比14层模式出现更多的不合理的“数值点风暴”。同时还发现具有细垂直分辨率



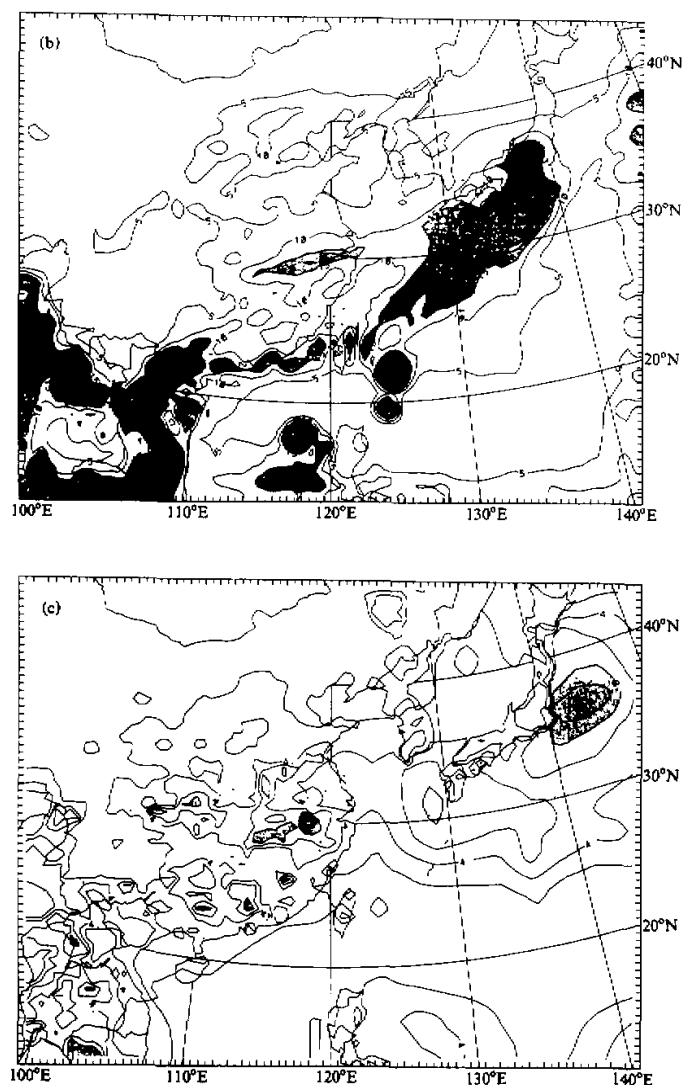


图3 1991年5月东亚地区降水分布(单位: cm)

(a) 14层模拟结果; (b) 23层模拟结果; (c) 观测值(资料取自GPCP)

(a)、(b)中的阴影区为降水量大于15 cm, (c)中的阴影区为降水量大于8 cm

的区域气候模式可能引起计算的不稳定性。为了解决这方面的问题,我们试验了几种时间步长: 180、120、90、60和30 s。试验表明,对于细垂直分辨率,应该相应选用较小的时间步长如120或60 s,而对于粗垂直分辨率则可以取较长的时间步长如180 s。

综上所述,模式模拟与观测的降水分布表明,23层优于14层;但是,模拟的降水强度14层稍优于23层。总的来看,细垂直分辨率略优于粗分辨率。需要指出的是,细

垂直分辨率如 23 层相对于粗分辨率如 14 层，容易引起“数值点风暴”。尚需说明，本文专门分析降水，并未全面分析粗细垂直分辨率对其他各种变量的影响。

3.2 缓冲区的宽度

区域气候模式缓冲区的作用是把外部大尺度场融合到区域气候模式的区域尺度上来，其结果既能保持大尺度信息，并且又能使模式在该区域范围内产生自己的中尺度环流。因而，区域气候模式的缓冲区宽度的取法是非常重要的。Giorgi 等^[6,7]发现，区域气候模式 RegCM2 的缓冲区如果只有 3 个格点宽度是不够的，他们建议应该选取较宽的缓冲区。

一些研究工作利用 NCAR RegCM 模拟了 1991 年夏季发生在我国江淮流域和日本南部的洪涝^[10~15]。在这里，我们首先给出这些研究工作所用的缓冲区的宽度（表 2）。从表 2 注意到，对于一个大的范围如东亚和西太平洋地区，区域气候模式的缓冲区如果只取几个格点的宽度是不够的^[10,13,15]。但是，如果对于一个较小的范围如中国东南部，则只取几个格点的宽度是可以的^[11,14]。

表 2 用 NCAR 区域气候模式模拟 1991 年夏季洪涝所选缓冲区（BZ）

作者（时间）	区域	范围（格点数）	BZ（格点数）	{BZ / 总数} %
Liu et al., 1996	东亚和西太平洋	9776	2704	27.7
龚威、李维亮, 1996	中国	2064	400	19.4
郑维忠等, 1996	中国东南部	1640	100	6.1
张晶等, 1996	中国东南部	1190	100	8.4
赵宗慈、罗勇, 1997	东亚和西太平洋	5525	100	1.8
罗勇、赵宗慈, 1997	东亚和西太平洋	5525	1296	23.5

在我们的区域气候模式研究中试验了侧边界缓冲区分别取 5 个和 18 个格点（5 BZ 和 18 BZ），看其不同的作用。两个试验分别从 1991 年 5 月 1 日积分到 7 月 31 日，初边界场用 ECMWF 分析资料，Grell 对流降水与显式非对流降水方案，垂直分辨率取 23 层，侧向嵌套采取指数松弛法。

同样计算了 1991 年 5~7 月区域气候模式缓冲区 5 BZ 和 18 BZ 模拟的与观测的降水的相关系数（CC）和均方差（RMS）（见表 3）。计算表明，18 BZ 模拟的各月的降水相关系数和均方差都优于 5 BZ。例如，18 BZ 的相关系数在 0.33 和 0.35 之间，而 5 BZ 的相关系数只有 0.05~0.20。计算还表明，18 BZ 模拟的各月各分区降水量与相应的观测值的偏差也明显小于 5 BZ 的模拟结果，尤其是在模式中心部分的江淮流域，5 BZ 模拟的降水量只有观测值的一半（表略）。

表 3 1991 年 5~7 月区域气候模式缓冲区 5 BZ 和 18 BZ 模拟的与观测的降水的相关系数（CC）和均方差（RMS）

	CC		RMS	
	5 BZ	18 BZ	5 BZ	18 BZ
5 月	0.05	0.33	3.41	2.76
6 月	0.18	0.33	6.29	5.62
7 月	0.20	0.35	6.67	6.64

为进一步研究区域气候模式对缓冲区宽度的敏感性，还分析了大气低层相对湿度场和风场。从分析中注意到，在 18 BZ 的模拟中，模式较好地模拟出在中国南方造成洪涝的强西南气流和对应的湿舌。而 5 BZ 由于缓冲区宽度太小，因而模拟的湿舌和西南气流强度偏弱且位置偏南，因而不可能形成和模拟出江淮流域的洪涝（图略）。

用 Kuo-Anthes 对流降水和隐式非对流降水方案作了类似的试验。计算表明,例如对于 5 BZ 和 18 BZ 模拟和观测的 1991 年 5 月降水的相关系数和均方差分别为 0.26、0.43 和 5.18、4.88。显然,与以上分析的 Grell 方案得到类似的结论,即 18 BZ 优于 5 BZ。

总括以上的几个试验表明,对于一个较大的范围,区域气候模式应该选择较宽的缓冲区。例如,对于东亚地区 65×85 格点范围,5 个格点宽度是太少了。根据估算,对于一个较大的区域,RegCM2 的缓冲区的格点数应该是总网格点数的 $1/6$ 到 $1/4$ 之间。

3.3 不同初始条件和侧边界条件的作用

经常用来生成区域气候模式初始场和侧边界场的大尺度分析资料是欧洲中期数值预报中心的分析资料(简称 EC)。近年来,分析资料有了较大的改进,如美国国家环境预报中心(NCEP)和国家大气研究中心(NCAR)联合建立了再分析资料(简称 NCEP-RE),欧洲中期数值预报中心也释放了再分析资料(简称 EC-RE)。因此需要研究区域气候模式(RegCM2/EA)对由不同大尺度分析资料生成的初边界场驱动的敏感性。

在我们的数值试验中分别试验东亚区域气候模式对三种不同的资料(EC、NCEP-RE 和 EC-RE)生成的初边界条件的响应的异同。三个试验均以模拟 1991 年 5~7 月东亚降水场为例,设置为 Grell 对流方案和显式非对流方案,垂直分辨率取 23 层,采用 18 BZ 缓冲区,侧向嵌套采用指数松弛法。计算了模拟与观测的降水在各分区与全区的数值、相关系数和均方误差。

作为一个例子,表 4 给出分别由三套不同的资料作初边界场模拟 1991 年 5~7 月中国江淮分区(YT)的降水与相应观测的偏差(单位: mm/d)、相关系数(CC)和均方误差(RMS)。对比模拟结果发现,三个模拟试验均成功地模拟出发生在我国江淮流域和日本南部的洪涝。需要指出的是,由于输入不同的初始场和边界场,模拟出的各月各分区降水量数值和相关系数,均方误差明显不同。由此表明,区域气候模式对侧边界条件是敏感的。另一方面还注意到,三套资料模拟的偏差趋势似乎是一致的,例如,都过多地计算了出现在日本的降水,而模拟的中国西南分区的降水量均偏小等。

表 4 1991 年 5~7 月中国江淮分区(YT)模拟的降水与观测的偏差(单位: mm/d)、相关系数(CC)和均方误差(RMS)。模拟值分别来自三个试验,即 EC-W、NCEP-RE 和 EC-RE

	在 YT 分区的偏差			CC			RMS		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
5 月	0.52	0.30	-1.04	0.42	0.38	0.44	2.85	2.66	2.36
6 月	-0.38	-0.58	-1.05	0.39	0.35	0.40	5.15	4.46	4.63
7 月	2.62	0.76	1.81	0.35	0.41	0.35	5.89	4.87	6.42

对比计算的相关系数发现,欧洲中心的再分析资料(EC-RE)模拟东亚降水的分布形式优于其他两套资料,如 5 月和 6 月模拟与观测的相关系数分别为 0.44 和 0.40。另一方面还注意到,用 NCEP-RE 模拟的降水的偏差和均方误差在 5~7 月均最小。例如在 7 月江淮流域分区, NCEP-RE 的偏差只有 0.76 mm/d。

进一步分析每个分区逐日降水量演变的模拟效果。分别计算和绘制了三套资料在 8 个分区 5~7 月(共 92 天)的降水演变曲线,并且计算了与观测值相对应的相关系数。图 4 给出对于 EC、EC-RE 和 NCEP-RE 三套资料模拟的 8 个分区各 92 天与相应观

测的降水的相关系数。从图 4 注意到, 三套资料模拟的大部分分区的相关系数均大于 0.40。这表明区域气候模式在三套资料下均能成功地模拟出这 3 个月各分区的几次暴雨过程和间歇期。NCEP 和 ECMWF 再分析资料模拟靠近区域的西部边界的分区 (SWC 和 NWC) 的降水过程优于 EC。而在靠近区域中心的分区 (江淮分区 YT), 则是 EC 优于其他两套资料。

作为一个例子, 图 5 分别给出其中江淮流域分区 (YT) 对于 EC-RE 和 NCEP-RE 两种初、侧边界条件模拟的以及对应该区观测的自 1991 年 5 月 1 日到 7 月 31 日的日降水演变。从图 5 观测表明, 在这三个月中有 4 次明显的暴雨过程, 即 5 月上旬前期, 5 月后半月, 6 月上旬和 7 月前半月。两种侧边界都合理地模拟出这 4 次暴雨过程的出现时段和强度。但是, 模拟的强度有时过大, 有时偏小。此外, 模式还模拟了个别虚假的暴雨过程。

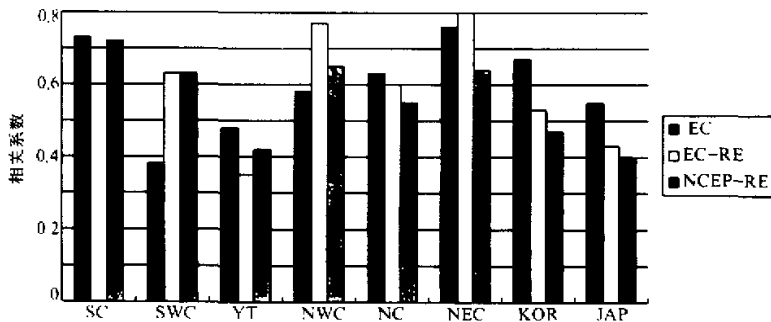


图 4 8 个分区模拟与观测的降水的相关系数 (1991 年 5 月 1 日~7 月 31 日, 共 92 天)
初边界场分别为 EC、EC-RE、NCEP-RE

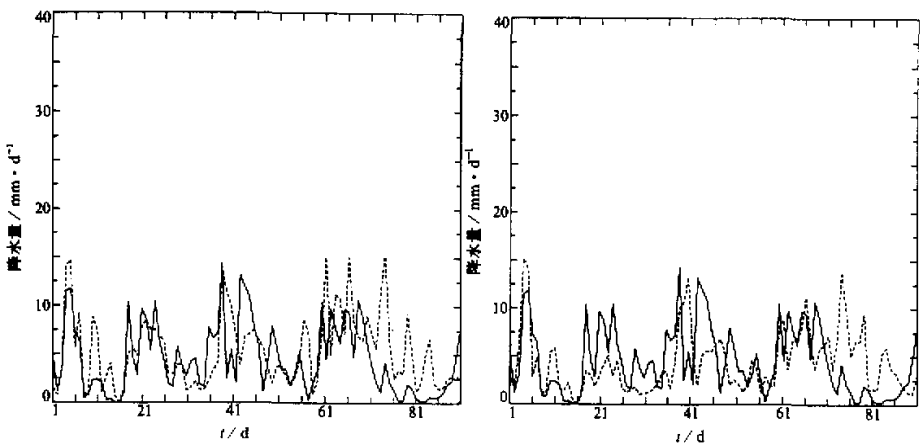


图 5 1991 年 5 月 1 日到 7 月 31 日 (共 92 天) 江淮流域 (YT) 日降水量演变曲线
实线: 观测值, 虚线: 模拟值
左图是 NCEP-RE, 相关系数 $r=0.48$; 右图是 EC-RE, 相关系数 $r=0.35$

用上述三种侧边界条件输入区域气候模式都较好地模拟出 1991 年夏季发生在我国江淮流域和日本南部的洪涝及几次主要的暴雨过程。模式对 8 个分区月平均降水以及日降水的变化亦模拟得较好。但是, 分析与计算表明, 模式输入不同的侧边界, 其模拟的降水量有明显的差异。从模式模拟的各月降水的分布来看, EC-RE 侧边界模拟效果最好; 从模式模拟的各月全区和分区的降水量来看, NCEP-RE 的模拟效果最好。由此表明, 区域气候模式对侧边界条件的响应非常敏感。

3.4 嵌套方法的影响

区域气候模式中的侧边界嵌套方案与方法是重要的。在 NCAR 的区域气候模式 RegCM2 中包括 6 种嵌套方法, 即: 固定嵌套、时间相关嵌套、湿度流入与流出嵌套、海绵嵌套、线性和指数松弛嵌套^[7]。松弛过程的公式由牛顿和扩散项构成, 其作用是在侧边界缓冲区逐渐牵引模式的解如风分量、温度、水汽混合比以及表面气压向大尺度值融合。在水汽场中有湿度的流入与流出边界条件。流入与流出条件假设在侧边界网格点上有流入, 而流出梯度为零。Giorgi 等^[7]用 NCAR RegCM 在欧洲区域作了有关侧边界嵌套方法的数值试验, 发现与线性松弛方案相比, 指数松弛方案似乎提供了从大尺度到区域尺度的比较光滑的输送。

我们用 RegCM2/EA 模式在输入 ECMWF 再分析资料条件下分别试验了 6 种嵌套方案, 并且作了计算与对比。每种嵌套方案积分从 1991 年 5 月 1 日到 31 日。模式取 23 层垂直分辨率, 采用 18BZ 缓冲区, 选用 Grell 对流方案和显式非对流降水方案。6 种嵌套方案分别是固定嵌套 (简称为 FIXED)、时间相关嵌套 (简称为 TIME-D)、湿度流入与流出嵌套 (简称为 IN/OUT)、海绵嵌套 (简称为 SPO)、线性和指数松弛嵌套 (简称为 LIN-REL 和 EXP-REL)。

6 种方案计算中, 湿度流入与流出方案和海绵方案在分别计算 14 和 12 天后出现溢出, 即表明对于东亚-西太平洋这样较大的研究区域, 这两种方案不能提供从大尺度到区域尺度的比较光滑的输送。计算了另外 4 种嵌套方案模拟的降水分区和全区的数值、相关

表 5 1991 年 5 月模式对 4 种嵌套方案模拟的
东亚全区降水量与观测的偏差、相关
系数 (CC) 和均方误差 (RMS)

嵌套方案	偏差 / (mm/d)	CC	RMS
FIXED	0.32	0.03	2.83
LIN-REL	-0.27	0.39	2.72
TIME-D	0.48	-0.002	2.98
EXP-REL	0.00	0.44	2.36

系数和均方误差。表 5 给出 1991 年 5 月模式对 4 种嵌套方案模拟的东亚全区降水量与观测的偏差、相关系数和均方误差。

从表 5 对比发现, 指数松弛嵌套方案对降水量和分布的模拟均优于其他几种方案。对 8 个分区降水量的模拟也表明指数松弛方案最佳, 降水量更接近观测值, 尤以靠近边界的分区明显。总结以上结果,

在 RegCM2/EA 模式的 6 种嵌套方案中, 指数松弛方案最好, 其次是线性松弛方案。

4 结论和讨论

本研究针对区域气候模式的一些主要方面用 RegCM2/EA 进行一些分析, 以便为今后用区域气候模式做东亚降水预报提供一些参考。

用 RegCM2/EA 输入 ECMWF 分析资料、ECMWF 再分析资料和 NCEP/NCAR 再分析资料, 试验表明区域气候模式在分别输入这几套资料作为初边界场时, 均能较好地模拟出 1991 年东亚夏季降水分布的基本特点。但是, 试验还表明区域气候模式对这几套资料是敏感的, 即当模式输入不同的资料时, 对应在同一时间和地区, 其降水值随资料不同有明显差异。对比表明, ECMWF 再分析资料模拟的降水空间分布更接近观测实际, 而 NCEP/NCAR 再分析资料模拟的降水量更接近观测实际。

粗细垂直分辨率对降水的影响的数值试验表明, 细垂直分辨率 (如 23 层) 模拟东亚地区降水分布比粗垂直分辨率 (如 14 层) 更接近实际观测, 从总体来看, 细垂直分辨率模拟降水略优于粗垂直分辨率。尚需指出的是, RegCM2/EA 区域气候模式在选用细垂直分辨率 (如 23 层) 时, 容易形成更多的虚假“数值点风暴”和计算的不稳定性。解决这个问题的方法之一是, 缩小模式运行的时间步长。当然, 还需要说明的是, 在这个研究中我们重点是分析垂直分辨率对降水的影响, 并没有分析对其他变量如辐射和云等的影响。在未来的研究中将作进一步的分析。

正如前面所述, 区域气候模式是不独立的, 它的模拟效果在很大程度上取决于侧边界资料的质量、缓冲区宽度和嵌套方法等。用 RegCM2/EA 作缓冲区宽度的数值试验表明, 当区域模式的范围较大如包括东亚和西太平洋时, 模式的缓冲区不能取得太小, 一般来说, 缓冲区的宽度大致应该是区域范围网格点数的 $1/4 \sim 1/6$ 。对 6 种嵌套方案的数值试验表明, 指数松弛方案在 6 种方案中最优, 其次是线性松弛方案。

综上所述, 在区域气候模式的应用中除应该注意侧边界状况的选择外, 还应该注意垂直分辨率的选取, 从而可以更有效地模拟区域的气候变化。以上得到的一些结论有待于做更多的个例数值试验来验证。区域气候模式的物理过程设置也是重要问题, 本文没有涉及到这方面的研究。

致谢: 几套资料由美国能源部西北太平洋国家实验室 R. Leung 博士提供; 美国国家大气研究中心 F. Giorgi 博士等提供他们的区域气候模式并且多次提出宝贵建议和热诚帮助; 美国能源部西北太平洋国家实验室 R. Leung 和 S. Ghan 博士对本研究提出了建议和帮助; 感谢刘永强、龚威、郑维忠和张晶博士介绍他们的模拟结果; 对国家气候中心计算机室为我们的大量数值试验多次安排了计算时间和空间表示由衷的感谢。

参 考 文 献

- 1 Houghton, J. T., M. Filho et al. (eds.), 1996, *Climate Change 1995, The Science of Climate Change*, Cambridge: Cambridge University Press, 572pp.
- 2 Zhao Zongci and Luo Yong, 1997, Advances in regional climate modeling since 1990, *Acta Meteorologica Sinica*, **11**, 385~406.
- 3 Giorgi, F., 1991, Sensitivity of simulated summertime precipitation over the western United States to different physics parameterizations, *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 2870~2888.
- 4 Giorgi, F. And M. R. Marinucci, 1991, Validation of a regional atmospheric model over Europe: sensitivity of wintertime and summertime simulations to selected physics parameterizations and lower boundary conditions, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **117**, 1171~1206.
- 5 Giorgi, F., M. R. Marinucci and G. Visconti, 1992, A 2XCO₂ climate change scenario over Europe generated using a limited area model nested in a general circulation model, II: climate change scenario, *J. Geophys. Res.*, **97**, 10011~10028.

- 6 Giorgi, F. M., R. Marinucci and G. T. Bates, 1993a, Development of a second-generation regional climate model (RegCM2), Part I: boundary-layer and radiative transfer processes, *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2794~2813.
- 7 Giorgi, F. M., R. Marinucci and G. T. Bates, 1993b, Development of a second-generation regional climate model (RegCM2), Part II: convective processes and assimilation of lateral boundary conditions, *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2814~2832.
- 8 Giorgi, F., L. O. Mearns, C. Shields and L. Mayer, 1996, A regional model study of the importance of local versus remote controls of the 1988 drought and the 1993 flood over the central United States, *J. Climate*, **9**, 1150~1162.
- 9 Liu, Y., F. Giorgi and W. Washington, 1994, Simulation of summer monsoon climate over East Asia with an NCAR regional climate model, *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 2331~348.
- 10 Liu Y., R. Avissar and F. Giorgi, 1996, A simulation with the regional climate model RegCM2 of extremely anomalous precipitation during the 1991 East-Asian flood: An evaluation study, *J. Geophys. Res.*, **101**, 26199~26215.
- 11 郑维忠、苏炳凯、潘益龙、符淙斌, 1996, 中尺度大气模式用于我国东部区域气候模拟的长期积分试验, 全球变化与我国未来的生存环境, 符淙斌、严中伟主编, 北京: 气象出版社, 242~247.
- 12 龚威、李维亮, 1996, 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), 北京: 气象出版社, 110~116.
- 13 赵宗慈、罗勇, R. Leung, S. Ghan, W. C. Wang 和 H. Wei, 1997, 东亚夏季风的模拟研究——3个区域气候模式的对比, 应用气象学报, 增刊, 116~123.
- 14 张晶、丁一汇、赵宗慈, 1996, 区域气候模式及其对陆面水文过程的模拟, 水科学进展, 7(增刊), 18~31.
- 15 罗勇、赵宗慈, 1997, NCAR RegCM2对东亚区域气候的模拟试验, 应用气象学报, 8(增刊), 124~133.
- 16 Anthes, R. A., E.-Y. Hsie and Y.-H. Kuo, 1987, Description of the Penn State/NCAR mesoscale model version 4 (MM4), Tech. Note, NCAR/TN-282+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 66pp.
- 17 Dickinson, R. E., P. J. Kennedy, A. Henderson-Sellers and M. Wilson, 1986, Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model, Tech. Note, NCAR/TN-275+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 69pp.
- 18 Holtslag, A. A. M., E. I. F. de Bruijn and H. L. Pan, 1990, A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting, *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 1561~1575.
- 19 王绍武、赵宗慈, 1987, 长期天气预报基础, 上海: 上海科学技术出版社, 201.

Investigations of Application for the Regional Climate Model over East Asia

Zhao Zongci and Luo Yong

(National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract A regional climate model over East Asia and the western Pacific Ocean (denoted as RegCM2/EA) has been set up based on the NCAR RegCM2 (1996 version). Several key issues of regional climate models over East Asia have been studied by using the RegCM2/EA, such as the effects of vertical resolutions; the actions of lateral boundary conditions (such as nesting methods, width of buffer zones and the different large-scale circulations). It is shown after a series of numerical experiments that the pattern of rainfall as simulated by the model with a fine vertical resolution was better than the coarse one; the different simulations of precipitation by the model nesting to the different large-scale lateral boundary fields were noticed; a large domain over East Asia needs a wider buffer zone of the model; the exponential relaxation is the best among six nesting methods. These results are useful to develop and improve the model in future for the predictions of summer monsoon rainfall. It is necessary to verify the results after the further numerical experiments.

Key words regional climate model East Asia rainfall simulation resolution lateral boundary condition