区域气候模式对中国夏季平均气温和降水的评估分析

孙林海　刘一鸣

(国家气候中心, 北京 100081)

提　要: 使用国家气候中心全球海气耦合模式嵌套区域气候模式(RegCM-NCC)对1983—2002 年中国夏季平均气温和降水进行了数值回报试验,并对 2003—2007 年夏季进行实时预报。从模式 20 年回报的平均状况来看,模式基本上能够反映出中国夏季气候的平均状况。使用国家气候中心气候预测室的业务预报评分(P)和距平相关系数(ACC)等五个评估参数对模式的回报和预报进行了评估分析,结果表明:该模式对我国夏季平均气温和降水具有一定的跨季度预报能力,部分地区有较好的预报效果。区域气候模式 20 年夏季平均气温的回报与实况在分布形态上较为相似,回报夏季降水量的分布形态与实况有一定的差异。近 25 年区域气候模式夏季平均气温预报 P 评分为 67.9 分,降水为 67.6 分。

关键词: 区域气候模式　回报　预报　评估分析

Assessment Analysis of Summer Temperature and Rainfall over China from Regional Climate Model

Sun linhai　Liu Yiming

(National Climate Center, Beijing 100081)

Abstract: 20-year hindcast experiments (1983－2002) and 5-year forecasts of summer average temperature and rainfall over China are presented by using regional climate model (RegCM_NCC) that is a nested global atmosphere ocean coupled model (CGCM_NCC). The RegCM_NCC can reproduce the averaged pattern of average temperature and precipitation during the 20-year hindcast summer. From the whole analysis of the forecast score (P) and anomaly correlation coefficient (ACC), the RegCM_NCC has some capabilities in predicting the major seasonal average temperature and rain belt, especially in some areas. The pattern of hindcasted 20-year average temperature is very close to that of observed temperature, while there is some extent of difference between

收稿日期: 2008 年 5 月 5 日;　修定稿日期: 2008 年 9 月 23 日

the patterns of hindcasted and observed precipitation. The forecast scores (P) of the hindcasted and forecasted 25-year averaged summer temperature and precipitation are 67.9 and 67.6, respectively.

Key Words: regional climate model hindcast forecast assessment

引 言

全球环流模式是模拟全球气候和气候变化的一种有力工具,在模拟区域气候上也具有一定的模拟能力,但仍存在较大的不确定性。目前受到计算能力的限制,现有的全球模式分辨率一般较粗,无法较好地刻画区域气候变化的特征。为了得到高分辨率区域气候变化的信息,一般有3种解决方法:第一是发展高分辨率或可变分辨率的耦合模式;第二是在全球模式中嵌套一个区域模式;第三是利用统计或者经验的降尺度方法把全球模式低分辨率的输出结果转换成高分辨率的区域气候信息。这三种方法各有特色,可以互为补充。由于区域气候模式具有较高的水平分辨率,可以更好地反映下垫面与大气的相互作用,模拟和预测结果可以提供更多的区域气候信息,因而越来越受到了人们的重视,如IPCC 2001年第三次评估报告[1]就使用了近80个区域气候模式来模拟和预测不同区域的气候变化,其水平分辨率在20～125km之间,模式运行的时间长度从数月到140年。国家气候中心区域气候模式(RegCM-NCC)已经稳定运行几年,目前仍为准业务预报,每年11月提供的年度预测中包含有对未来冬、春、夏季的气候趋势预测,每年4月提供未来夏季气候趋势预测,每年6月提供汛期滚动预测。为了考察区域气候模式的预测能力,本文使用国家气候中心全球海气耦合模式(CGCM-NCC)嵌套区域气候模式(RegCM-NCC)对1983—2002年中国夏季平均气温和降水进行了数值回报试验,并对2003—2007年夏季进行实时预报。本文首先对区域气候模式和回报试验方案进行介绍,然后给出区域模式的回报总体评估和预报检验。

1 区域气候模式和回报试验方法介绍

国家气候中心区域气候模式[2-3]是从美国国家大气研究中心(NCAR)的第二代区域气候模式(RegCM2)[4-5]发展来的。表1列出了RegCM2和RegCM-NCC模式在物理过程参数化方案上的差别。在RegCM2中,陆面过程使用的是BATS方案[6],积云对流方案有Kuo方案[7-8]和Grell方案[9],辐射方案是CCM2辐射传输方案,边界层用的是Hotslag方案。在模拟试验与参数化方案对比分析的基础上,引入一些新的方案,如改进的陆面模式LPM-I[10-11],LPM-II[12];修正的质量通量方案(MFS)[13-16]和Betts-Miller方案[17-18];CCM3中的辐射方案;气压梯度力的误差扣除法、包络地形和重力波拖曳作用;湍流动能闭合方案(TKE)[19]和三维嵌套方法。

表1 RegCM2和RegCM-NCC模式物理过程参数化方案对比

	RegCM2	RegCM_NCC
陆面过程	BATS	LPM-I,L PM-II
积云对流	Kuo,Grell	Betts-Miller,MFS
辐射传输	CCM2	CCM3
行星边界层	Hotslag	TKE

RegCM-NCC模式的水平分辨率为60km,中心点的位置是35°N,110°E。经、纬格点数为151×79,基本覆盖了东亚的大部分地区,垂直方向是16层,顶层气压是100hPa。模式的边界缓冲区有15圈。模式

使用的初始和侧边界条件来自于与之相嵌套的国家气候中心全球海气耦合模式对1983—2002 年夏季的回报试验所做出的全球预测场。它的大气模式(T63L16 AGCM)是以国家气象中心中期数值预测模式(T63版本)的动力框架为基础,参考国内外一些先进的气候模式进行综合和改进,形成一个有完整物理过程,能描写全球大气运动变化的三维大气环流模式。目前该模式已经用于东亚季节雨带,尤其是梅雨季节的业务预报。分析结果表明,该模式具有较好的积分性质,能够模拟全球气候的基本特征。它的海洋环流模式(T63L30 OGCM)的水平分辨率与大气环流模式相同,水平方向采用与 T63 三角谱截断一致的网格系统,以便于与 T63 大气模式耦合。垂直方向分为 30 层,其中 20 层位于 1000m 以上,以求较好地模拟主温跃层。模式采用了自由海面,而不是刚盖近似。该模式已经稳定积分 1100 年以上。全球大气模式与海洋模式以日通量距平耦合方案进行了耦合,该耦合模式已经积分 200 年。该耦合模式对 1983—2002 年夏季进行了回报试验,初始日期是每年的 3 月 1 日,向后连续积分 11 个月。然后将每年 6—8 月的回报场提供给与之相嵌套的区域气候模式,侧边界条件每隔 12 小时更新一次,采用指数松弛强迫法进行嵌套。

2　模式回报和预报的评估分析

2.1　20 年(1983—2002 年)回报的平均状况和系统误差

图 1 给出了区域气候模式 20 年夏季回报的平均气温和降水量的分布、实况(国家气候中心 160 站月平均气温和降水量资料)及其误差。从 20 年夏季平均气温实况(图 1a)来看,夏季中国东部大范围地区的平均气温在 20℃以上,东部地区自北向南平均气温逐步升高,高值中心位于华南地区。西部地区呈西高东低的分布形态,即新疆和西藏西北部平均气温在 20℃以上,而西北地区中东部和青藏高原大部地区平均气温在 20℃以下。区域气候模式 20 年平均气温的回报(图 1b)与实况在分布形态上较为相似,东部地区自北向南平均气温逐步升高,西部地区呈西高东低的分布型。与平均气温实况差异较大的是模式回报的平均气温的高值中心位于长江中下游中部沿江地区(湖北、湖南、安徽和江西四省交界)。从夏季平均气温的误差(图 1e)来看,中国大部地区夏季平均气温预报与实况接近,其误差在±2℃以内,仅在西部的部分地区有 4℃以上的误差。总体上看 RegCM_NCC 模式夏季平均气温预报在中国长江以北大部地区偏高,而长江以南和西部地区的平均气温比实况低。

从 1983—2002 年平均夏季中国季降水量实况分布(图 1c)来看,中国夏季降水量从西北向东南方向逐渐增加,黄河以北地区的降水量不足 400 毫米,长江以南大部地区降水量在 500 毫米以上,降水量高值中心位于江南南部和华南地区。模式回报的平均夏季降水量的分布形态(图 1d)与实况有一定的差异,但黄河以南的东部地区在降水量级上较为接近。

模式在东北、内蒙古东部和西部、青藏高原南部和西南地区西南部有强降水中心,降水量均超过 800 毫米,这与地形有很大的关系。从降水量级来看,模式预测的降水量明显偏大,这与模式的物理过程参数化方案有关,主要是积云对流参数化方案。从降水量的误差来看(图 1f),模式在新疆、河套南部、江淮、长江中下游、江南和华南大部地区降水量的误差较小。模式预报在长江以北以及中国西部地区比实况偏多,而在江南中西部和华南地区降水量预报比实况偏少。

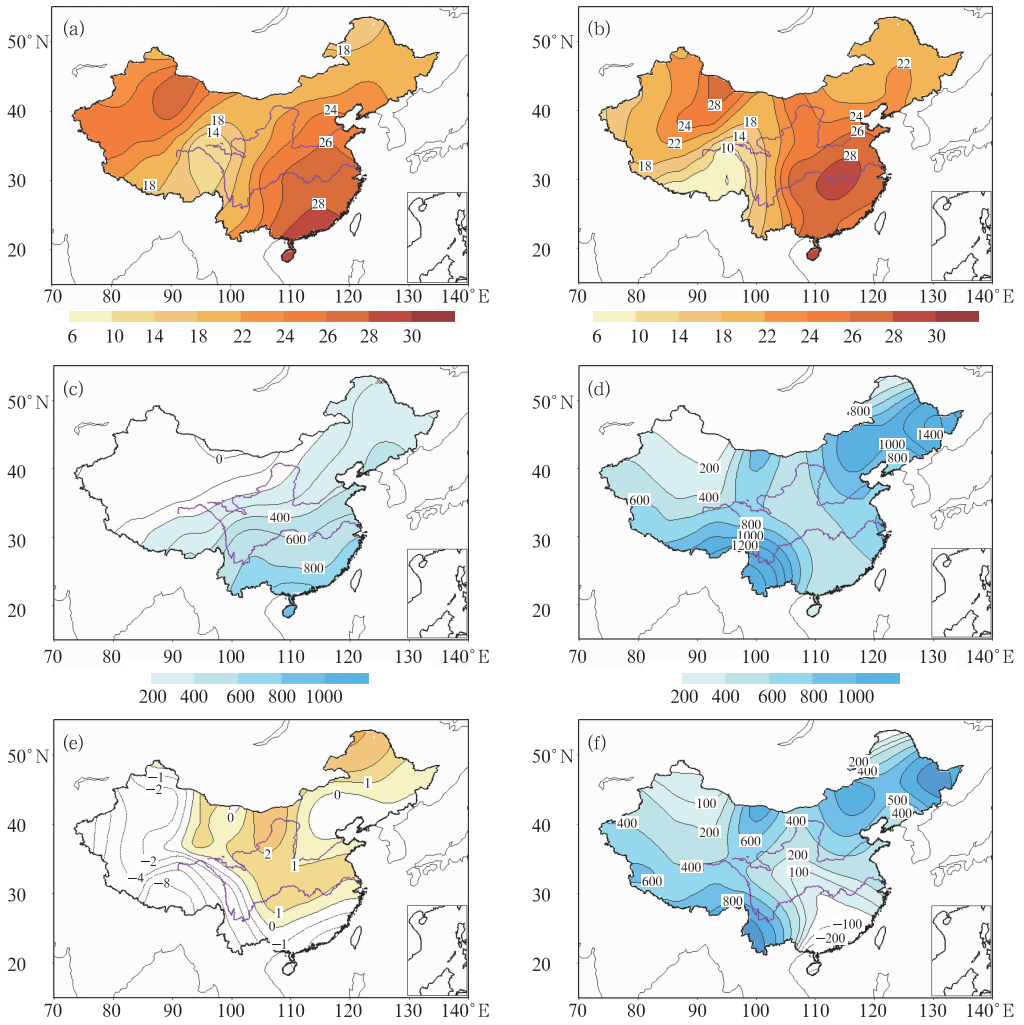

图 1 1983—2002 年夏季(6—8 月)平均气温和降水量及其误差分布
(a) 平均气温实况,(b) RegCM-NCC 模式平均气温回报,(c) 降水量实况,
(d) RegCM-NCC 模式降水量回报,(e) 平均气温误差,(f) 降水量误差

2.2 回报与实况的相关分析

为了分析模式预报对我国各地区预测的准确率,我们将中国 160 站 1983—2002 年的回报结果与同期的实况作了相关分析(图 2)。从平均气温的相关图 2a 来看,中国大部地区呈正相关分布,负相关出现在内蒙古东北部、淮河流域、长江中游沿江、江南中西部、华南东部和青藏高原南部等地,仅在内蒙古西部、新疆东部和青藏高原部分地区通过 90%信度检验。160 个站点中相关系数绝对值大于或等于 0.20 的有 60 个,占总站数的 37.50%。

降水的相关图 2b 中显示,全国大范围以正相关为主,出现负相关的区域有东北南部、长江上中游部分地区、西北地区中东部部分地区和青藏高原大部地区。通过 90%信度检验的区域相对较少,仅有河套北部以及黄

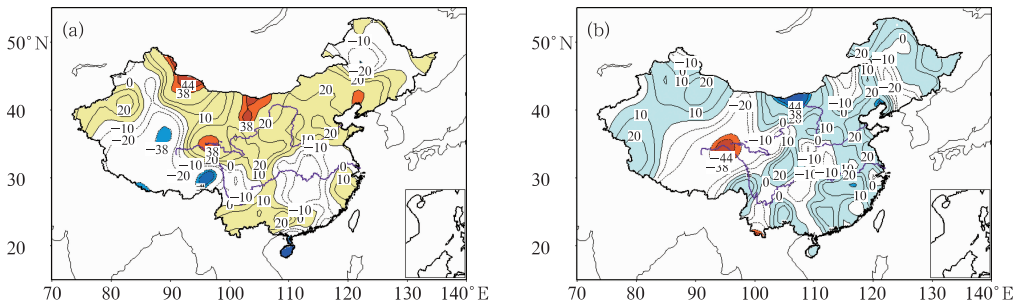

图 2　1983—2002 年夏季(6—8 月)实况(a)平均气温距平与 RegCM-NCC 模式回报(b)降水距平百分率的相关系数分布

浅色阴影区代表正相关区域,深色阴影区为相关系数通过 90%信度检验的区域

河和长江的源头。160 个站点中相关系数绝对值大于或等于 0.20 的有 58 个,约占 36.25%。

2.3　平均气温的评估分析

使用国家气候中心气候预测室的评估方法对区域气候模式结果进行评估,评估参数包括预报评分(P)、随机技巧评分(RATc)、气候技巧评分(CLTc)、距平相关系数(ACC)和异常级预报评分(Ts)5 个[20]。模式气候场为 20 年(1983—2002 年),观测气候场为 30 年(1971—2000 年)。

图 3 给出了区域气候模式 20 年回报(1983—2002 年)和 5 年实时预报(2003—2007 年)的夏季平均气温的 P 评分和相关系数,由图可以看出,大多年份的P评分在

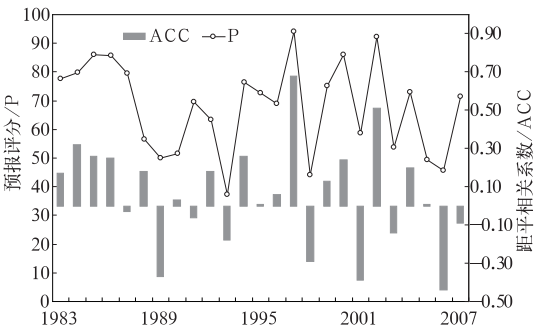

图 3　1983—2007 年夏季(6—8 月)RegCM-NCC 模式平均气温的预报评分 P 和相关系数 ACC

50—80 分之间,25 年评分中有 15 年超过整个时段的平均水平,P 评分在 80 分以上的有 5 年,低于 50 分的有 4 年。评分最高的是 1997 年,为 93.98。最低的是 1993 年。

相关系数在−0.5～0.7 之间,其中正相关有 16 年,正相关最高的是 1997 年,为 0.68。相关系数最低的是 2006 年,对应的 P 评分也较低。随机技巧评分、气候技巧评分和异常级预报评分均与 P 评分有较大联系(图略),一般当 P 评分较高时对应的 RATc、CLTc 和 Ts 都相对较大。有一半年份的预报相对于随机预报和气候预报具有正技巧,最高分别达到 56%和 52%;一半的年份的异常级预报评分超过平均水平,大多数年份在 5～20%之间,最高达到 53%。

表 2 给出了区域气候模式回报和预报以及整个时段平均的夏季平均气温的 5 个评估参数,5 个评估参数不同程度反映出实际预报时段(2003—2007 年)的平均预报效果比回报(1983—2002 年)差。其主要原因是 2005 和 2006 年预报效果较差,因而致使实际预报时段的平均预报效果降低。造成 2005 和 2006 年预报效果偏差主要反映在这两年夏季平均气温预报全国大部地区气温偏低,而这两年夏季平均气温的实况是全国大部地区偏高。这种大范围距平符号预报错误导致 P 评分较低。作者认为造成区域模式

结果较差的原因主要来自于其初始边界条件，即嵌套区域模式的全球模式，作者仔细查看了CGCM-NCC模式2005和2006年预报结果，发现：2005和2006年国家气候中心全球海气耦合模式夏季平均气温的预报效果也较差，没有反映出全国大范围平均气温偏高的趋势。造成全球模式夏季平均气温预报差的原因很复杂，有模式本身物理框架和参数的问题，也有全球模式初始条件对其的影响。

从近25年区域气候模式平均气温预报的整体效果来看，平均P评分为67.90，平均相关系数为0.06，平均异常级预报评分为0.15，相对于随机预报基本无技巧，相对于气候预报而言为负技巧。

表2 RegCM-NCC模式夏季平均气温的评估参数

平均时段	P	RATc	CLTc	ACC	Ts
1983—2002	70.24	0.04	−0.04	0.10	0.15
2003—2007	58.54	−0.13	−0.22	−0.09	0.13
1983—2007	67.90	0.01	−0.08	0.06	0.15

中国幅员辽阔，为了更好地了解模式的预报效果，我们进行了更为细致的分区评估。将中国分为6个区域，定义105°E以东为东部地区，105°E以西为西部地区，东部地区又细分出4个子区域，自北向南分别为：42°N以北为东北和内蒙古中东部；34～42°N为黄河中下游和华北地区；26～34°N为长江中下游地区，26°N以南为华南地区。

表3给出了1983—2007年RegCM-NCC模式对中国不同地区夏季平均气温的评估参数。从这5项评估参数可以看出，模式在中国西部地区的预报评分、随即技巧和气候技巧评分优于东部地区，距平相关系数和异常气候评分效果与东部相当。而在中国东部地区的各子区域，评估结果的各项指标不完全一致，就P评分而言，华南地区的预报效果较好，长江中下游地区的预报评分最低；东北和内蒙古中东部地区有一定的随机预报技巧，其它区域基本无随机技巧或负技巧；四个区域相对于气候预报均为负技巧；相关系数显示东北、内蒙古中东部和长江中下游的预报效果较好，而华南地区的预报效果较差；黄河中下游和华北地区的异常级预报评分最高。

表3 RegCM-NCC模式对中国不同地区夏季平均气温的评估(1983—2007年平均)

地区	Pc	RATc	CLTc	ACC	Ts
东部地区	66.80	0.00	−0.16	0.07	0.16
西部地区	70.01	0.03	−0.13	0.06	0.12
东北、内蒙古中东部	63.06	0.10	−0.05	0.11	0.16
黄河中下游、华北	65.80	0.01	−0.15	0.06	0.21
长江中下游	58.87	−0.07	−0.24	0.10	0.15
华南	72.10	0.01	−0.15	−0.02	0.09

2.4 降水的评估分析

图4给出了近25年(1983—2007年)区域气候模式夏季降水的P评分和相关系数，绝大多数年份的评分在60～70分之间，评分最高的是2004年，为81.89。最低的是1993年。25年评分中有13年超过整个时段的平均水平，P评分在70分以上的有6年，低于60分的仅有1年。相关系数在−0.2～0.3之间，其中正相关有17年，正相关最高的是2004年，为0.29。相关系数最低的是1993年。有一半年份的预报相对于随机预报而言有正技巧，最高可达32%；绝大多数年份相对于气候预报具有一定的预报技巧，最高达

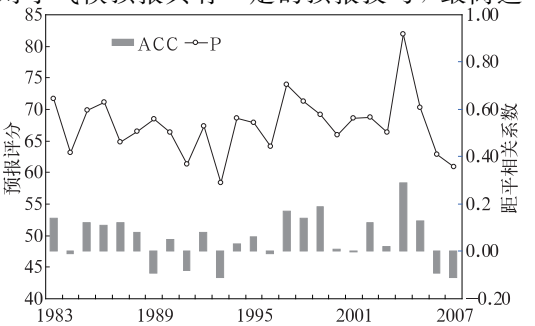

图4 1983—2007年夏季(6—8月)RegCM-NCC模式降水的P评分和相关系数ACC

到 25%;一半年份的异常级预报评分超过平均水平,大多数年份在 10～20%之间,最高达到 34%。

表 4 给出了区域气候模式回报和预报以及整个时段平均的夏季降水的 5 个评估参数,5 个评估参数不同程度反映出实时预报时段(2003—2007 年)的平均预报效果比回报(1983—2002 年)好。从近 25 年区域气候模式预报的整体效果来看,平均 P 评分为 67.57,平均相关系数为 0.05,平均异常级预报评分为 0.17,预报基本无随机技巧,相对于气候预报而言具有正技巧。

表 4　RegCM-NCC 模式夏季降水的评估参数

平均时段	P	RATc	CLTc	ACC	Ts
1983—2002	67.35	0.00	0.11	0.06	0.17
2003—2007	68.48	0.03	0.13	0.05	0.19
1983—2007	67.57	0.01	0.12	0.05	0.17

表 5 给出了 1983—2007 年 RegCM-NCC 模式对中国不同地区夏季降水的评估参数。从这 5 项评估参数可以看出,模式在中国东部地区的各项评估参数均优于西部地区,预报效果也优于全国整体水平。中国东部地区的各子区域评估结果的各项指标不完全一致,就 P 评分而言,黄河中下游和华北地区预报效果较好,而华南地区的预报评分最低;除华南地区外,其它 3 个区域相对于随机预报均为正技巧;4 个区域相对于气候预报均为正技巧,最高的是东北和内蒙古中东部地区;除华南地区外,其它 3 个区域均为正相关,相关最好的是东北和内蒙古中东部;4 个区域均有较好的异常级预报评分。

表 5　RegCM-NCC 模式对中国不同地区夏季降水的评估(1983—2007 年平均)

地区	P	RATc	CLTc	ACC	Ts
东部地区	68.10	0.02	0.13	0.06	0.18
西部地区	65.22	−0.02	0.09	0.00	0.14
东北、内蒙古中东部	66.66	0.04	0.15	0.06	0.17
黄河中下游、华北	68.70	0.02	0.12	0.14	0.20
长江中下游	66.84	0.04	0.14	0.03	0.17
华南	64.26	−0.06	0.05	−0.04	0.20

3　结论和讨论

本文使用国家气候中心全球海气耦合模式嵌套区域气候模式对 1983—2002 年中国夏季平均气温和降水进行了数值回报试验,并对 2003—2007 年进行实时预报。使用国家气候中心气候预测室的 5 个业务评估参数对该模式的回报和预报进行评估分析,得出如下结论:

(1) 区域气候模式 20 年(1983—2002 年)夏季平均气温的回报与实况在分布形态上较为相似,东部地区自北向南平均气温逐步升高,西部地区呈西高东低的分布型。中国大部地区夏季平均气温预报与实况接近。模式夏季平均气温预报在中国长江以北大部地区偏高,而长江以南和西部地区比实况低。模式回报的中国 20 年平均夏季降水量的分布形态与实况有一定的差异,模式在东北、内蒙古东部和西部、青藏高原南部和西南地区西南部有强降水中心,这与地形有很大的关系。从降水量级来看,模式预测的降水量明显偏大,这与模式的物理过程参数化方案有关。模式夏季降水量的预报在长江以北以及中国西部地区比实况偏多,而在江南中西部和华南地区降水量预报比实况偏少。

(2) 中国大部地区夏季平均气温预报与实况呈正相关分布,负相关出现在内蒙古东北部、淮河流域、长江中游沿江、江南中西部、华南东部和青藏高原南部等地,仅在内蒙古西部、新疆东部和青藏高原部分地区通过 90%信度检验。降水的相关图显示,全国大范围以正相关为主,出现负相关的区域有东北南部、长江上中游部分地区、西北地区中东部部分地区和青藏高原大部地区。通过

90%信度检验的区域相对较少，仅有河套北部以及黄河和长江的源头。

（3）近25年（1983—2007年）区域气候模式夏季平均气温的P评分大多在50～70分之间，平均为67.90，最高是1997年，最低是1993年。相关系数在－0.5～0.7之间，平均为0.06，其中正相关有16年，正相关最高的是1997年，最低的是2006年。有一半年份的预报相对于随机预报和气候预报具有正技巧；一半的年份的异常级预报评分超过平均水平。模式在中国西部地区的预报评分、随即技巧和气候技巧评分优于东部地区，距平相关系数和异常气候评分效果与东部地区相当。而在中国东部各子区域，评估结果的各项指标不完全一致，就P评分而言，华南预报效果较好，长江中下游地区的预报评分最低。

（4）近25年区域气候模式夏季降水的P评分绝大多数在60～70分之间，平均为67.57，评分最高是2004年，最低是1993年。相关系数在－0.2～0.3之间，平均为0.05，其中正相关有17年，正相关最高的是2004年，相关系数最低的是1993年。有一半年份的预报相对于随机预报而言有正技巧；绝大多数年份的预报相对于气候预报具有正技巧；一半年份的异常级预报评分超过平均水平。模式在中国东部地区的各项评估参数均优于西部地区，预报效果也优于全国整体水平。在中国东部各子区域，评估结果的各项指标不完全一致，就P评分而言，黄河中下游和华北地区预报效果较好，而华南地区的预报评分最低。

（5）区域气候模式的回报和预报表明该模式对我国夏季平均气温和降水具有一定的跨季度预报能力，对部分地区有较好的预报效果。但从多年平均的预报评分和相关系数来看，预报水平还有待于进一步的提高。

参考文献

[1] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change In: Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. (eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001. 881.

[2] Ding Yihui, Shi Xueli, Liu Yiming, et al. Multi-year simulations and experimental seasonal predictions for rainy seasons in China by using a nested regional climate model (RegCM_NCC) Part I: Sensitivity study[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2006, 23(3): 323-341.

[3] Ding Yihui, Liu Yiming, Shi Xueli, et al. Multi-year simulations and experimental seasonal predictions for rainy seasons in China by using a nested regional climate model (RegCM_NCC) Part II: The experimental seasonal prediction[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2006, 23(4): 487-503.

[4] Giorgi F. Development of a Second-Generation Regional Climate Model (RegCM2). Part I: Boundary-layer and radiative transfer processes[J]. Mon Wea Rev, 1993, 121: 2794-2813.

[5] Giorgi F. Development of a Second-Generation Regional Climate Model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions[J]. Mon Wea Rev, 1993, 121: 2814-2832.

[6] Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model, NCAR/TN-387+STR, 1993. 72.

[7] Anthes R A. A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model[J]. Mon Wea Rev, 1977, 105: 270-286.

[8] Anthes R A, Hsie E Y, Kuo Y H. Description of the Penn State/NCAR Mesoscale Model Version4 (MM4). Tech. Note NCAR/TN-282+STR, 1987. 66.

[9] Grell G A. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations[J]. Mon Wea Rev, 1993, 121: 764-787.

[10] 张晶，丁一汇. 一个改进的陆面过程模式及其模拟

试验研究第一部分:陆面过程模式及其"独立(off-line)"模拟试验和模式性能分析[J]. 气象学报,1998,56(1):1-19.

[11] 丁一汇,张晶,赵宗慈. 一个改进的陆面过程模式及其模拟试验研究第二部分:陆面过程模式与区域气候模式的耦合模拟试验[J]. 气象学报,1998,56:385-400.

[12] 史学丽. 一个改进的陆面过程模式及其与区域气候模式的耦合试验[D]:[博士学位论文]. 南京:南京气象学院,2000.

[13] Tiedtke M. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale schemes[J]. Mon Wea Rev,1989,117:1779-1800.

[14] 陈伯民,陈玉春,苏志侠,等. 修正的 ECMWF 质量通量积云参数化方案的预报试验[J]. 高原气象,1996,15(1):37-47.

[15] Liu Yiming,Ding Yihui. Modified mass flux cumulus parameterization scheme and its simulation experiment I: Mass flux scheme and its simulation of the flooding in 1991[J]. Acta Meteo Sinica,2002,16(1):37-49.

[16] LiuYiming,DingYihui. Modified mass flux cumulus parameterization scheme and its simulation experiment II: Cumulus convection of three schemes and the sensitivity experiments of MFS[J]. Acta Meteo Sinica,2002,16(2):165-179.

[17] Betts A K. A new convective adjustment scheme, Part I: Observational and theoretical basis [J]. Quart J R Met Soc,1986,112:677-691.

[18] Betts A K, Miller M J. A new convective adjustment scheme, Part II: Single column tests using GATE wave,BOMEX,and arctic air-mass data sets [J]. Quart J R Met Soc,1986,112:693-709.

[19] Mellor C L , Yamada T. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers[J]. J Atmos Sci,1974,31:1791-1806.

[20] 陈桂英,赵振国. 短期气候预测评估方法和业务初估[J]. 应用气象学报,1998,9(2):178-185.