

区域气候模式 REMO 对东亚季风 季节变化的模拟研究

张英娟^{1, 2} 高会旺³ Gerhard LAMMEL⁴

1 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100039

3 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266003

4 Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany 20146

摘要 将欧洲区域气候模式 REMO 首次应用于东亚区域, 利用该模式对 1980 年和 1990 年东亚季风季节变化进行了模拟研究, 并将模拟结果与 NCEP 再分析资料进行比较, 以检验该模式对东亚季风的模拟能力。研究表明, 区域气候模式 REMO 能够较好地模拟出东亚地区高、低空的大气环流特征, 模拟的高度场、流场和温度场与 NCEP 再分析资料场都比较一致。模拟结果显示了东亚季风的月变化和季节转换特征。模拟的降水场与 GPCC 降水资料的对比结果表明, REMO 能较为成功地模拟出东亚地区降水的空间分布, 并能较好地反映降水的季节变化及主要降水趋势, 夏季降水模拟偏大, 整个区域平均的降水量偏差约为 18% 左右。

关键词 区域气候模式 东亚季风 季节变化

文章编号 1006-9585 (2005) 01-0041-15 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

Simulation of Monsoon Seasonal Variation of Regional Climate Model REMO in East Asia

ZHANG Ying-Juan^{1, 2}, GAO Hui-Wang³, and Gerhard LAMMEL⁴

1 Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences; START Regional Center for Temperate East Asia, Beijing 100029

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

3 College of Environmental Science & Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003

4 Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany 20146

Abstract For the first time, the regional climate model REMO developed in Europe was used in East Asia. By using this model the regional numerical simulation for the seasonal variation of monsoon over East Asia in 1980 and 1990 was made. Also compared the simulation results for high and low air levels with NCEP re-analysis data to check the simulation ability of REMO for East Asia monsoon. It is found that the features of atmospheric circulation were simulated pretty well by the model. The simulated geopotential height, wind and temperature fields are very close to the observation. It is also successful to simulate the trend of precipitation compared the simulation with the observation data from GPCC, the precipitation simulated is larger than observation in summer and the bias of regional average is about 18%.

Key words regional climate model, East Asia monsoon, seasonal variation

收稿日期 2003-06-16 收到, 2005-01-11 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2002CB412402

作者简介 张英娟, 女, 1977 年 4 月出生, 博士生, 主要从事区域气候变化与气候观测方面的工作。E-mail: zhangyj@tea.ac.cn

1 引言

数值模式是研究气候变化的一种有力工具,全球大气环流模式已被广泛地应用于气候变化和机制的研究中,得出了许多有意义的结论^[1~4]。但在区域气候变化的模拟和预测中,性能并不良好^[5]。其原因主要是全球大气环流模式水平分辨率低,难以细致地描述区域内中小尺度的地形、地表特征和其他因子对区域气候变化的强迫和影响。区域气候模拟是近年发展起来的研究有限区域气候及气候变化的方法,它能够较好地表示出地形和地表状况,能够捕获许多全球大气环流模式难以分辨的区域尺度温度、降水分布和土壤水分变化特征。美国国家大气研究中心(NCAR)在20世纪90年代初开始研究区域气候模式^[6,7],比较著名的区域气候模式RegCM2已经在世界各地用于研究区域气候变化问题。此外,澳大利亚、英国、德国、日本等对区域气候变化也做了模拟研究。我国也相继开展了区域气候模拟的研究^[8],早在20世纪70年代,钱永甫等^[9]已设计出 $\rho\sigma$ 混合坐标系原始方程模式,用于青藏高原对东亚大气环流影响的研究。

20世纪90年代以来随着计算机的发展,国内在区域气候模拟研究方面有了较大发展^[10~18],通过近几年来对区域气候的形成、异常和变化的模拟与预测研究结果表明,区域气候模式具有模拟与预测气候变化区域特征的潜力,因而有较好的发展前景。

现在所用的区域气候模式主要包括美国国家大气研究中心(NCAR)的区域气候模式RegCM;美国国家大气研究中心与宾州大学(NCAR/PENN)联合的中期预报模式MM5;美国科罗拉多州立大学(CUS)的区域天气模式RAMS;中国科学院大气物理研究所东亚中心的区域气候模式RIEMS;德国马普气象研究所的区域气候模式REMO;日本的MRI以及澳大利亚的DARLAM等。本文采用的区域气候模式REMO是由德国马普气象研究所与德国气候计算中心(DKRZ)和德国格斯赫特研究中心(GKSS)联合开发而成的,用于气候模拟与天气预报。在欧洲及其他一些国家REMO已得到广泛的应

用^[19~22]。

本文将区域气候模式REMO首次应用于东亚地区,对1980年和1990年东亚季风季节变化进行了数值模拟,目的是检验该模式对东亚季风及降水的模拟能力,为我们进一步建立、改进和发展区域气候模式提供参考依据。

2 模式简介及试验设计

本文所采用的区域气候模式REMO是在德国气候中心的数值天气预报模式EM(Europe-Model)/DM(Deutschland-Model)基础上发展而成的。模式水平网格采用可旋转的球面经纬网格。在该水平网格上变量采用Arakawa C跳点分布,动量、温度及湿度水平扩散方程采用4阶线性方式。垂直坐标为 η - p 混合坐标,垂直方向上采用能量与角动量守恒的有限差分机制,垂直对流与垂直湍流通量采用隐式的差分机制,避免了数值计算的不稳定性^[23]。模式采用Tiedtke的质量通量对流方案^[24];对于长-短波通量,整个云辐射反馈采用的是Ritter和Geleyn^[25]的Delta双流辐射方案;时间上采用半隐式的蛙跳格式及Asselin滤波;侧边界采用松弛边界条件,缓冲区宽度设为8个格点^[26]。

区域气候模式REMO的水平分辨率从 0.1° 到 1° 不等,垂直方向从地面到10 hPa分成不等距的20层。本研究试验区的范围为($7.3\sim 50.6^\circ\text{N}$, $64.5\sim 155.5^\circ\text{E}$),共有 73×49 个网格点。图1所示为模拟区域和地形分布。在旋转坐标系下所选

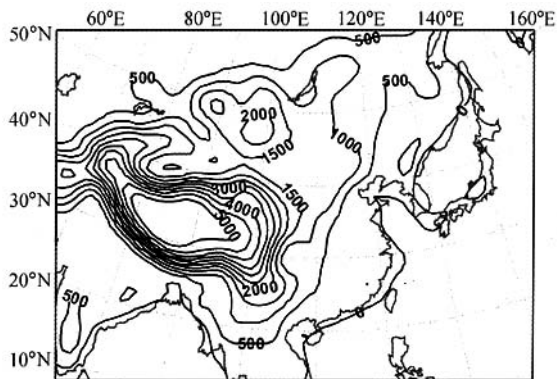


图1 模拟区域地形(单位:m)

Fig. 1 Terrain of the model (units: m)

用的水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 积分时间步长 450 s, 北极经过旋转坐标系的旋转后在地理坐标系的坐标为 (52.5°N , 70.0°W), 预报变量包括地面气压、温度、水平风矢量、水汽含量和云水含量。边界条件由欧洲中心 (ECMWF) 每 6 h 一次的全局客观分析资料给出, 松弛侧边界每 6 h 对模式驱动一次。

3 模拟结果分析

利用 REMO 模式对 1980 年和 1990 年两个个例进行了模拟研究, 数值模拟分别从 1980 年 1 月 1 日世界时 00 时和 1990 年 1 月 1 日世界时 00 时开始, 积分到 1980 年 12 月 31 日及 1990 年 12 月 31 日, 将每 6 h 一次的模拟结果进行处理得到 1980 和 1990 年月平均资料。为了研究东亚季风的季节变化, 选取 1 月、4 月、7 月和 10 月分别代表冬季、春季、夏季和秋季, 将模拟结果与 NCEP 再分析资料对比。为了便于比较, 本文将 NCEP 再分析资料场插值到模式网格。限于篇幅, 我们主要对 1980 年的结果进行分析讨论。

3.1 气压场

图 2 是 REMO 模拟的 1980 年冬季、春季、夏季和秋季 500 hPa 高度场以及 NCEP 再分析资料场对应月份的 500 hPa 高度场。可以看出, 两者的形势非常相似, 空间相关系数均达到 0.99。冬季 (图 2 左图 1 月) 东亚大槽的位置和强度模拟都很好, 平均大槽位于 140°E 斯塔诺夫山脉附近, 中心强度为 5 082.71 gpm; 从 5 880 gpm 线可以看出对夏季影响中国天气的重要天气系统——副热带高压的位置和强度的模拟也较成功。整体上 REMO 能够模拟出夏季风爆发时副高北上西伸和冬季风爆发时南退减弱的趋势, 只是在季风转换时期副高西伸的位置较 NCEP 偏西 (图 2 的 4 月和 10 月)。

近地面层 1 000 hPa (图 3) 显示, 冬季蒙古高压中心位于 (40°N , $100^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$) 附近, 冷高的范围可达整个东亚地区, 相当稳定; 在日本东北-鄂霍次克海东北洋面上为一低压区。REMO 模拟结果与 NCEP 再分析资料基本一致, 另外 REMO 在华北地区模拟出一小高压。

随着夏季风的爆发, 由于地面增暖较快, 蒙古冷性高压减弱并西移到 75°E 附近, 位于鄂霍次克海洋面上的低压也向东北方移去。我国东北地区开始出现一个低压中心, 西太平洋开始形成副热带高压并向西伸展。7 月, 夏季风已经爆发, 印度低压大大加深, 蒙古高压完全破坏, 副热带高压在我国东北势力增强。我国西部则受性质不同的大陆副热带高压影响, 范围很小 (图 3 左图 7 月), 模拟的强度较弱。秋季在由夏季风向冬季风过渡时期, 地面热低压逐渐消失, 蒙古高压又活动在蒙古一带, 鄂霍次克海附近的低压逐渐形成。

总的看来, REMO 模拟的各系统的位置与 NCEP 再分析资料基本一致, 空间相关性比较好, 只是强度有一定差异。

3.2 流场

1980 年春、夏、秋、冬四季 250 hPa 风矢量分布如图 4, 其中左图为 REMO 的模拟结果, 右图为 NCEP 再分析场。

冬季 250 hPa 高空天气图上 (图 4 的 1 月), 整个中国大陆都在西风环流控制之下, 西风带的平均大槽位于 140°E 附近, REMO 的模拟结果与 NCEP 再分析资料场结果较一致。随着夏季风的爆发, 西风带逐渐减弱, 在 25°N 以南出现了东风气流, REMO 模拟结果显示东亚沿岸为一弱反气旋气流, 而在 NCEP 再分析资料场中, 东风急流一直控制在整个东亚南部。模式基本上能够模拟出季风转变, 但流场模拟偏强, 尤其是对夏季西风急流的模拟。

从低空 850 hPa 模拟场可以看出, 冬季 (图 5 的 1 月) 陆地上风速明显小于日本-东亚沿岸-西太平洋上的风速。我国北部盛行西北气流, REMO 模拟的西太平洋副热带辐合带位于 22.5°N 附近, 其两侧分别为东北和东南信风, 与 NCEP 再分析场相比能够模拟出基本的气流走向, 但对应蒙古高压的反气旋流场模拟的较弱。夏季 REMO 模拟的低空急流从孟加拉湾向东北伸向长江流域、朝鲜半岛和日本一线 (图 5 左图 7 月), 强度较 NCEP 再分析资料场强。整体上流场的季节转换模拟得较好, 但仍存在着差异, REMO 没能模拟出由于青藏高原特殊地形造成的其周围区域的风速异常。

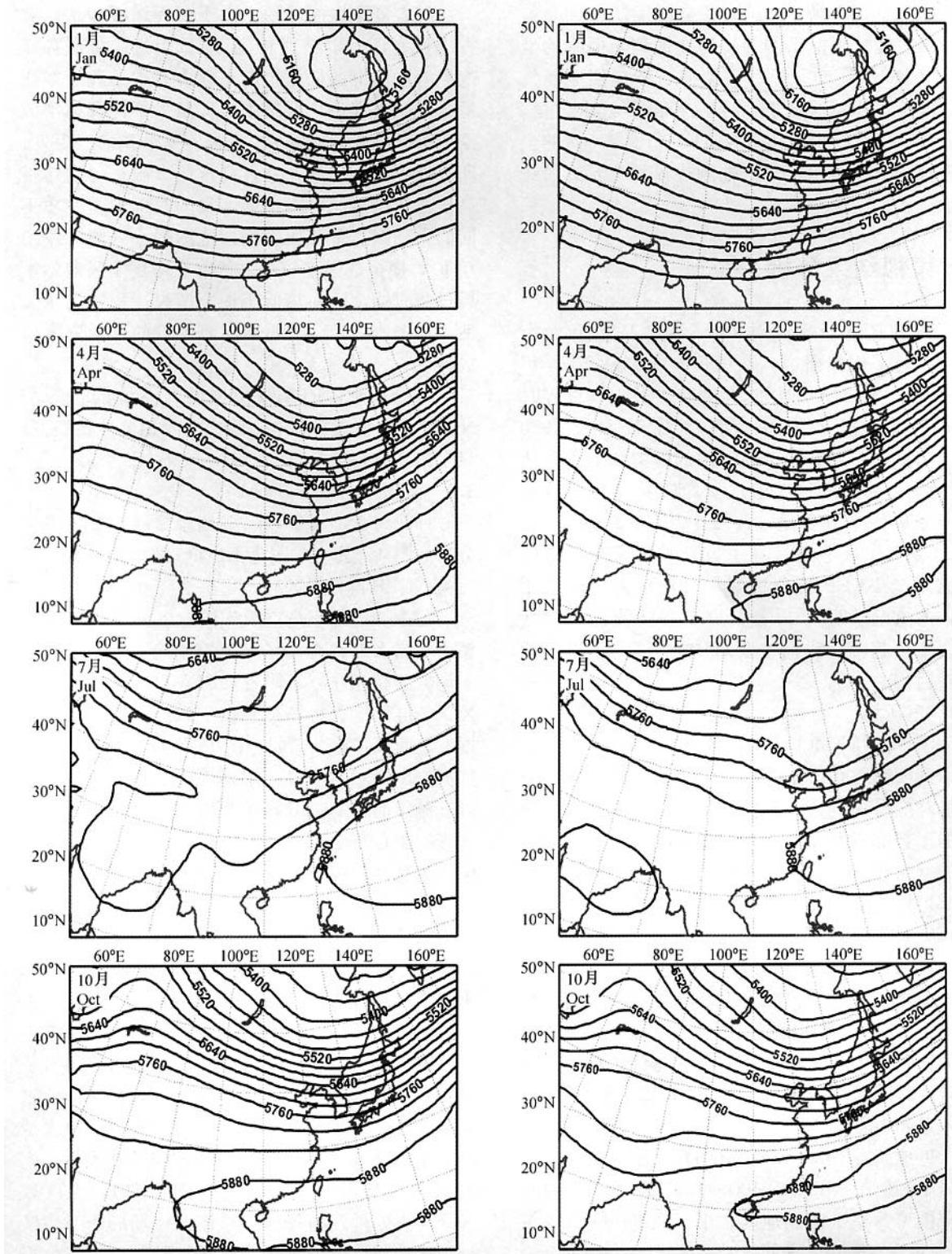


图 2 REMO 模拟 (左图) 与 NCEP 再分析资料 (右图) 1980 年不同季节的 500 hPa 高度场 (单位: gpm)
Fig. 2 Mean geopotential height fields of different seasons at 500 hPa in 1980, REMO (left), NCEP re-analysis (right) (units: gpm)

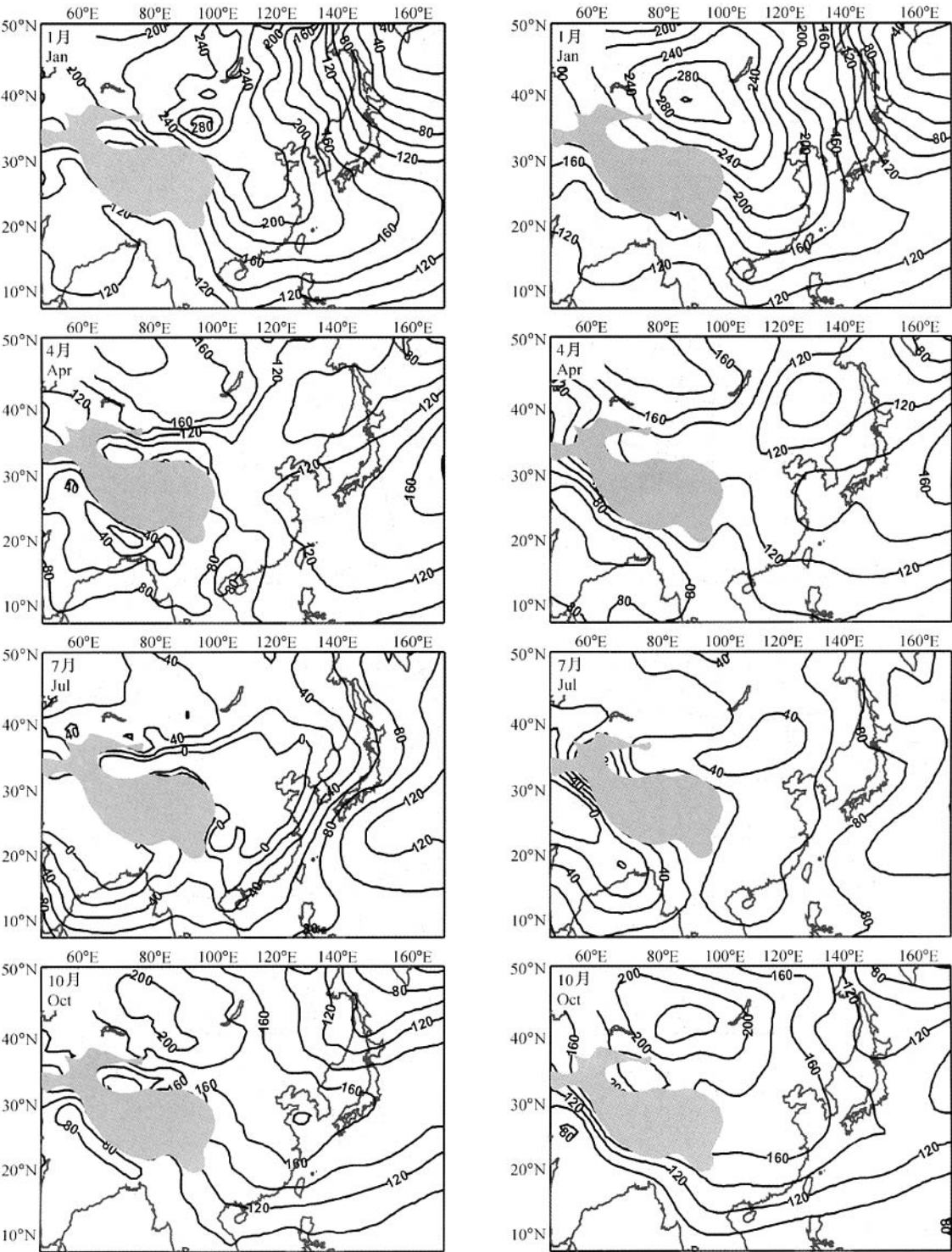


图3 REMO 模拟(左图)与 NCEP 再分析资料(右图)1980 年不同季节的 1 000 hPa 高度场(阴影代表地形高度大于 2 300 m 的地区,单位: gpm)

Fig. 3 Mean geopotential height fields of different seasons at 1000 hPa in 1980, REMO (left), NCEP re-analysis (right) (the shaded represents the areas which topography larger than 2 300 m, units: gpm)

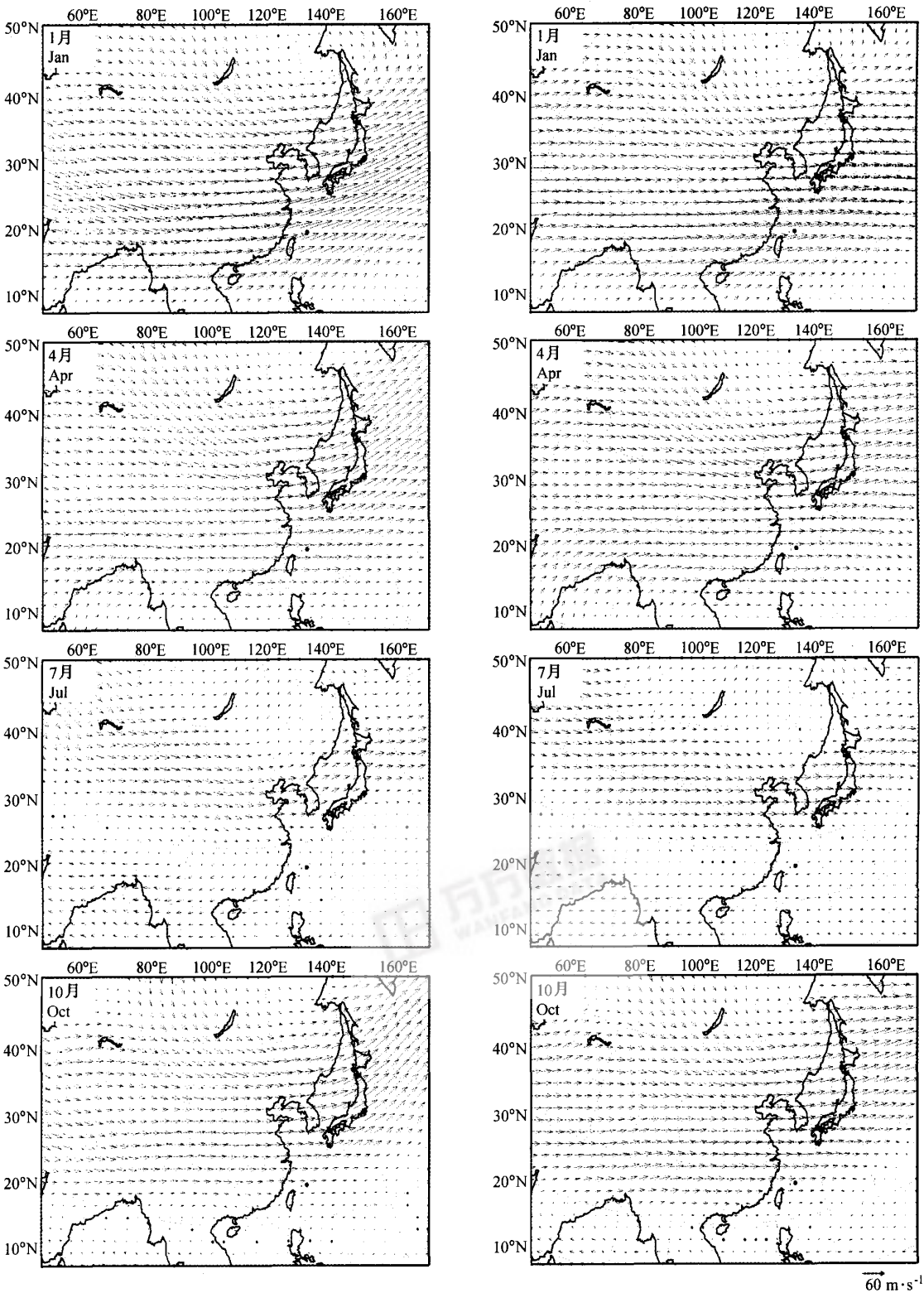


图4 REMO模拟(左图)与NCEP再分析资料(右图)1980年不同季节的250 hPa 流场
Fig.4 Mean streamline fields of different seasons at 250 hPa in 1980, REMO (left), NCEP re-analysis (right)

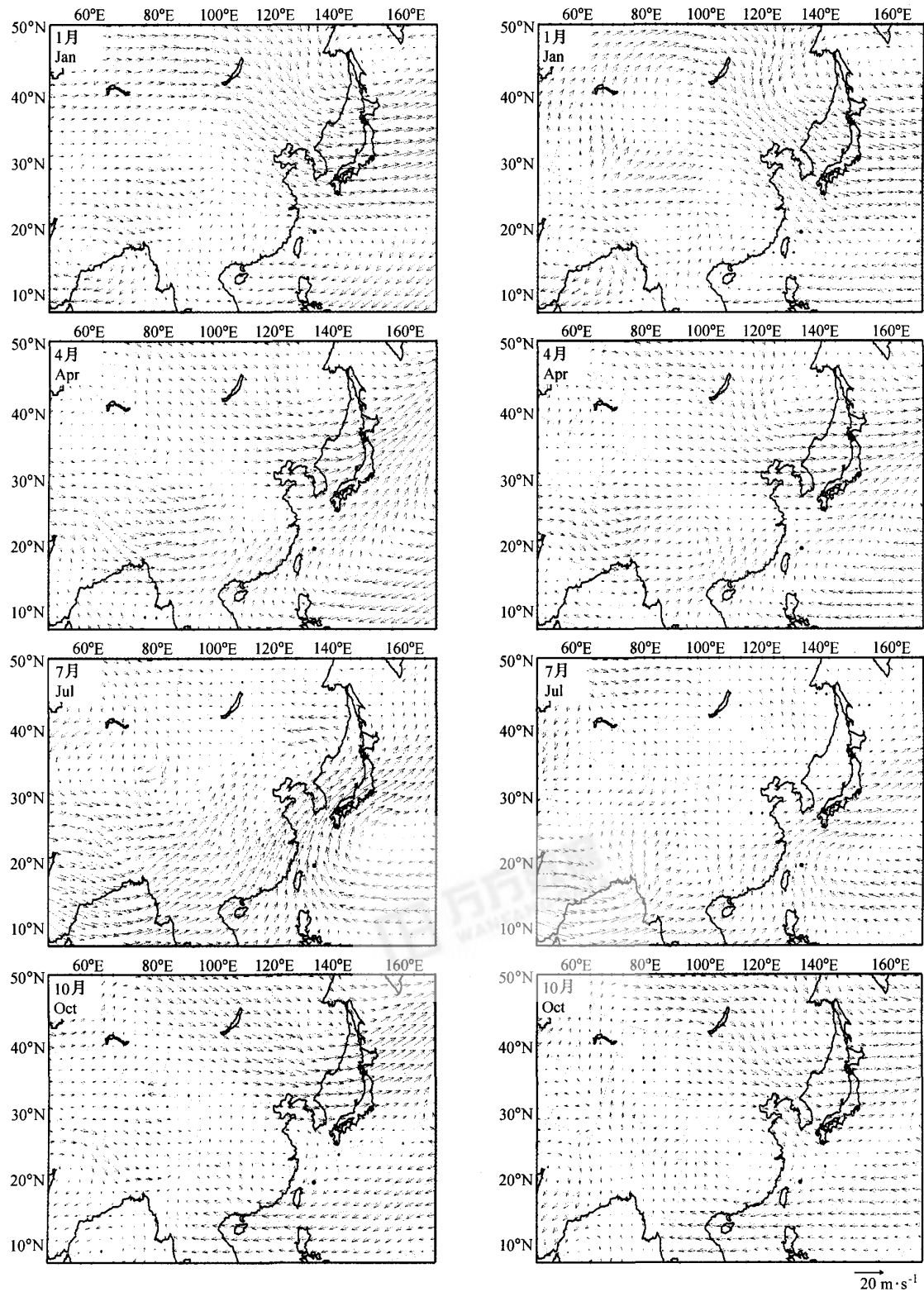


图 5 REMO 模拟 (左图) 与 NCEP 再分析资料 (右图) 1980 年不同季节的 850 hPa 流场
Fig. 5 Mean streamline fields of different seasons at 850 hPa in 1980, REMO (left), NCEP re-analysis (right)

图 6 给出了 REMO 模拟场和 NCEP 再分析资料场的 250 hPa 纬向风分布。在冬季, 模式很好地模拟出了高空西风带, 其中心轴线位于日本南部—我国长江流域—青藏高原南侧, 在 $25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 中纬度地区, 中心位于日本东南侧的洋面上, 强度达 $69\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 6 左图 1 月), 较再分析场强度偏低。7 月夏季风爆发, 西风带强度较冬季弱的多, 虽然分析场和模拟场两者西风带轴线均位于 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 的区域, 但 REMO 模拟的中心位置位于青藏高原北侧, 而 NCEP 再分析场的中心位置位于日本上空, 因此 REMO 模拟的位置较偏西。随着冬季风的爆发, REMO 模拟的中心位置位于朝鲜半岛上空, 再分析场中心位置离开日本位于日本东北部, 逐渐南退加强。总体上, REMO 模拟场能反映西风带在夏季风爆发时北上减弱, 冬季风爆发时南退增强, 具有明显的季节变化; 另外模拟结果与 NCEP 的空间相关系数夏季较冬季略低。

在近地面层 (1 000 hPa), 除了冬季 REMO 模拟位于日本附近的西风带比 NCEP 再分析场的位置略偏西外, 主要的风系分布、急流位置两者基本一致, 但 REMO 模拟的强度略偏强。

总之, REMO 基本上能模拟出高、低层风系明显的季节变化特征。在高层 (250 hPa), 季节变化的明显表现是中纬度西风急流中心强度的变化及中心位置的东西移动; 在低层 (1 000 hPa), 东亚季风区的季节转换表现在冬季盛行偏北风而夏季则吹偏南风。

3.3 温度场

图 7 为 1980 年 250 hPa REMO 模拟场和 NCEP 再分析资料的温度场分布。在冬季 250 hPa 上空 (图 7a 左图) 中纬度的亚洲中部贝加尔湖西部为低温槽区, 槽线为略偏西北-东南走向。在中国东北-鄂霍次克海以南的大陆上存在着一个高温脊, 温度梯度在日本-青藏高原一带为最大。这一基本特征与 NCEP 再分析场 (图 7 右图 1 月) 十分相似。夏季, 在 REMO 模拟场中, 青藏高原上空为一暖中心, 强度为 241 K, 沿贝加尔湖东南方向有一低温槽, 模拟场比再分析场偏深, 其东侧位于我国东北部的高温脊也比再分析场偏强。总体上整个东亚大陆受高温控制。

在低层 (1 000 hPa) REMO 模拟出了冬季东

亚地区的基本温度特征, 即在东亚大陆沿岸为一明显的冷槽, 青藏高原北部及日本海附近温度梯度非常大, 这些特征与 NCEP 再分析场结果均十分相似 (图 8 的 1 月)。夏季, REMO 模拟出了大陆热低压与日本东北西太平洋上低温区的对比 (图 8 左图 7 月)。从青藏高原以北直到蒙古一带 1 000 hPa 的温度为 300 K 到 308 K, 而副热带太平洋上的温度在 292 K 到 300 K 之间。这一明显的温度差异决定了东亚地区夏季盛行西南季风。对比 NCEP 再分析场结果 (图 8 右图 7 月), 可以看出 REMO 对大陆热低压范围模拟的偏小, 中心位置偏东北。在由夏季向冬季的过渡阶段, 热低压减弱, 冷温槽在东亚沿岸形成。

综上所述, REMO 模式能够模拟出东亚季风温度场的季节变化, 冬季低温区在东亚沿岸增强、加深; 随着夏季的来临, 低温槽减弱、消失, 逐渐在东亚大陆形成热低压系统, 控制整个东亚大陆。

3.4 降水场

降水是人们最关心的气象要素之一, 由于东亚处于季风区, 降水有很大的季节变化。用区域气候模式 REMO 对 1980 年和 1990 年的降水进行了模拟, 由于在这一区域没有足够的站点观测降水资料进行比较, 因此本文利用全球降水气候中心 (GPCC) 水平分辨率为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 的降水资料与模拟结果进行对比, 以此来检验区域气候模式对东亚降水的模拟能力。由于 GPCC 降水资料是一种同化的网格资料, 便于利用, 虽然它与实际站点观测资料有一定的偏差, 但经过大量的比较检验仍具有相当高的可靠性。

图 9 左图是 REMO 模拟的 1980 年冬季、春季、夏季和秋季月平均降水场。右图是 GPCC 1980 年月平均降水场。从东亚地区 GPCC 的月平均降水空间分布形势来看, 春季降水较少, 主要降水集中在夏季, 夏季主要降水带在孟加拉湾至长江流域、日本一带, 其中孟加拉湾北部大陆降水强度最强, 7 月总降水量超过 800 mm。模拟的降水量整体上较 GPCC 偏大, 对孟加拉湾附近降水量的模拟比实测大 2~3 倍, 模拟的菲律宾附近的降水也较大。夏季整个区域平均的降水量偏大约 18%, 对于降水的模拟结果与 NCEP 之间的空间相关性, 冬季最高, 为 0.73, 春秋季节次之, 而夏季最低, 为 0.67。因此, REMO 模式对我国降

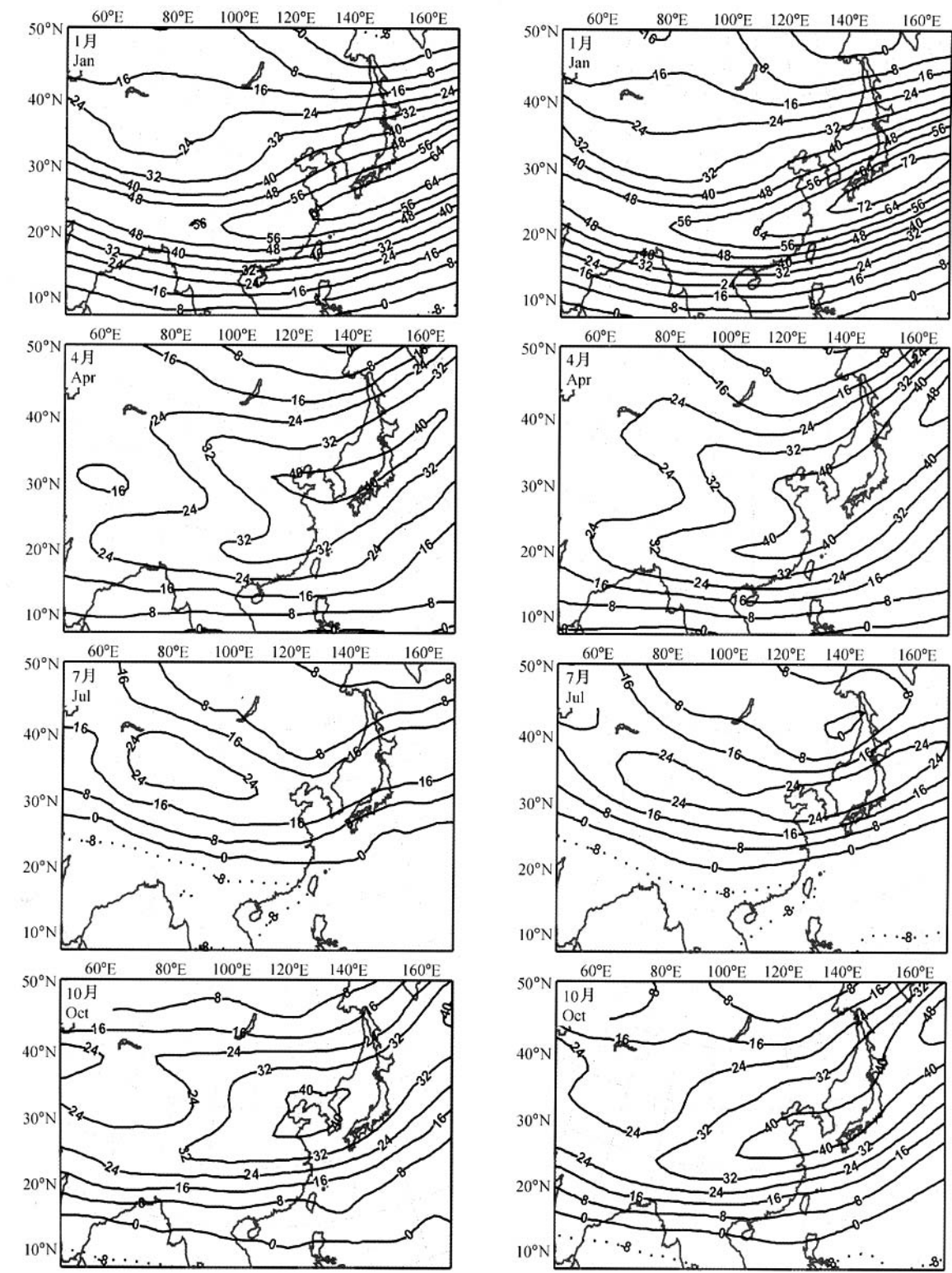


图 6 REMO 模拟 (左图) 与 NCEP 再分析资料 (右图) 1980 年不同季节的 250 hPa 纬向风速 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 Mean zonal wind of different seasons at 250 hPa in 1980, REMO (left), NCEP re-analysis (right) (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

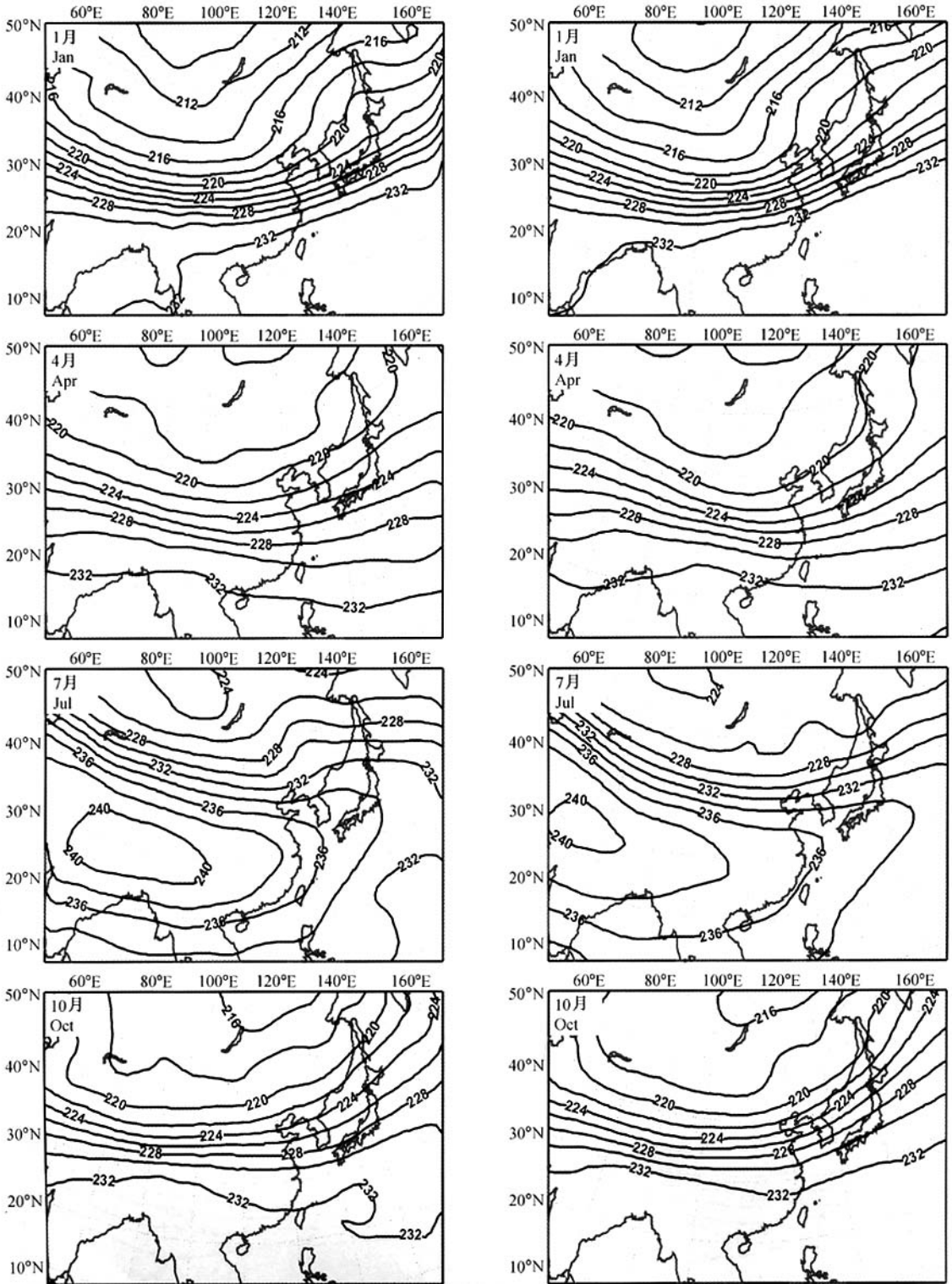


图 7 REMO 模拟 (左图) 与 NCEP 再分析资料 (右图) 1980 年不同季节的 250 hPa 温度场 (单位: K)

Fig. 7 Mean temperature fields of different seasons at 250 hPa in 1980, REMO (left), NCEP re-analysis (right) (units: K)

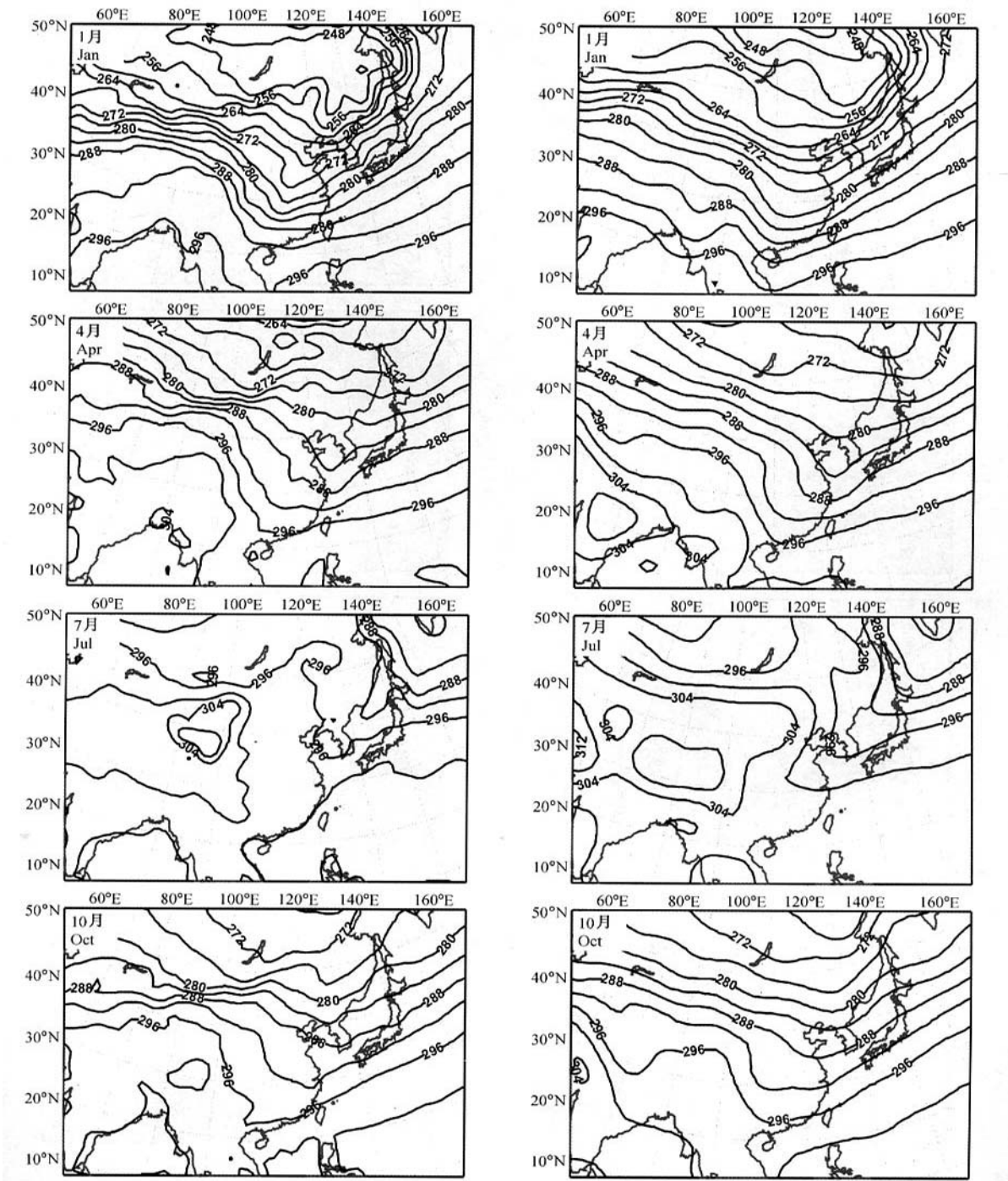


图 8 REMO 模拟 (左图) 与 NCEP 再分析资料 (右图) 1980 年不同季节的 1 000 hPa 温度场 (单位: K)
Fig. 8 Mean temperature field of different seasons at 1 000 hPa in 1980, REMO (left), NCEP re-analysis (right) (units: K)

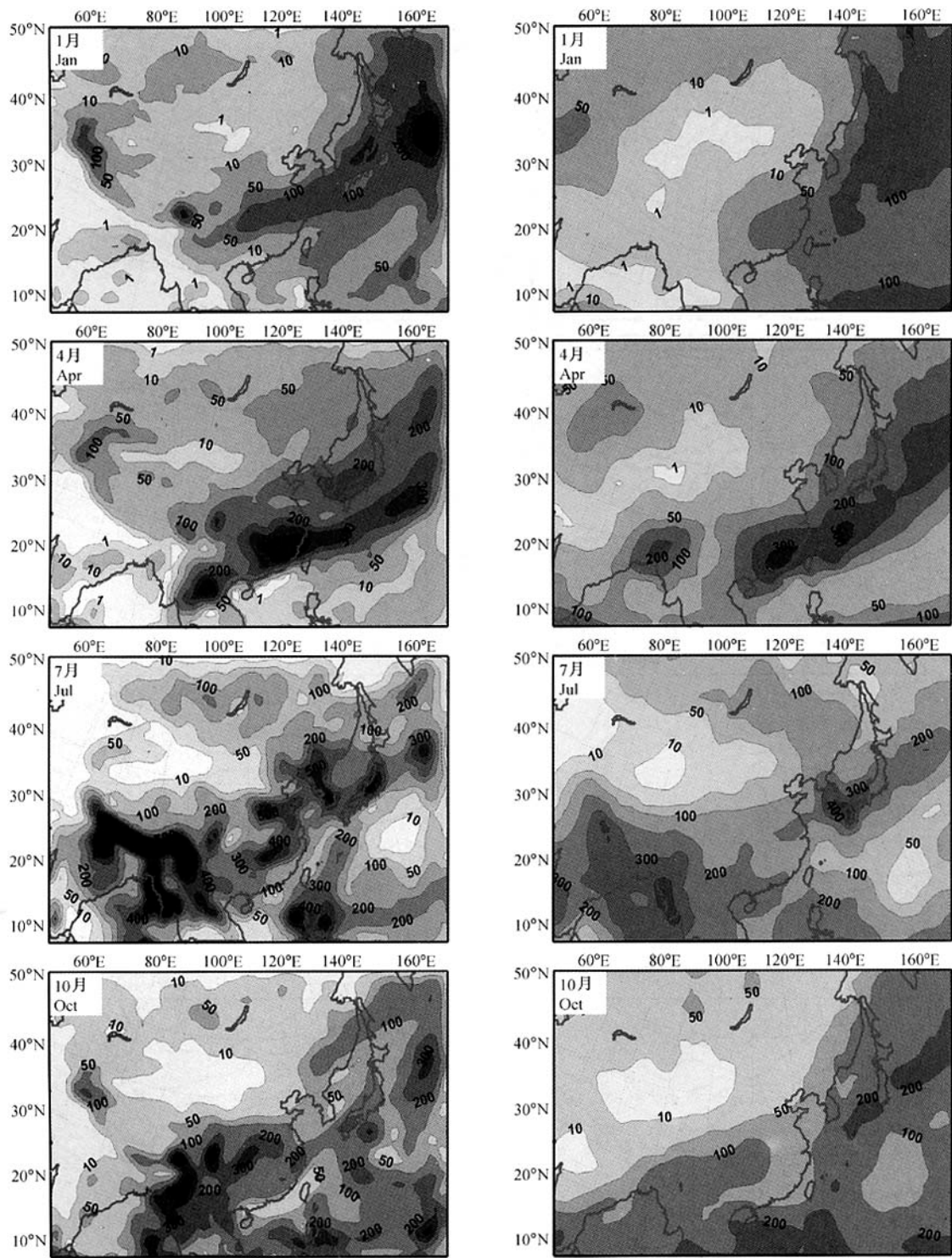


图 9 REMO 模拟 (左图) 与 NCEP 再分析资料 (右图) 1980 年不同季节的降水场 (单位: mm / 月)
Fig. 9 The distribution of total precipitation of different seasons in 1980, REMO (left), NCEP re-analysis (right)
(units: mm · month⁻¹)

水有一定的模拟能力，能够反映出降水的季节变化及主要降水趋势。但是模拟的降水范围较观测偏大，量值较高，因此需要作进一步的改进。

3.5 季风指数

为了研究东亚季风强度的变化，郭其蕴^[27]设计了东亚夏季风指数即用陆地（以 110°E 来表示）和海洋（以 160°E 来表示）之间的气压差来表示夏季风的强度。根据这一方法，本文定义一副热带季风指数来反映东亚季风爆发时间及强弱程度。具体计算方法是：从 10°N 到 50°N 分别取 110°E 与 160°E 的月平均海平面气压，将两条经线上的海平面气压分别取平均然后相减得到海平面气压差作为各月季风指数，具体表示如下：

$$I_{SM} = \frac{1}{n_1} \sum_{\varphi_1} p_{\varphi_1}(110^\circ\text{E}) - \frac{1}{n_2} \sum_{\varphi_2} p_{\varphi_2}(160^\circ\text{E}),$$

其中， $\varphi_1=10^\circ\text{N}$ ， $\varphi_2=50^\circ\text{N}$ ， n_1 为 110°E 经线上所包含的具有海平面气压值的格点数， n_2 为 160°E 经线上所包含的具有海平面气压值的格点数。图 10、11 为区域气候模式 REMO 及 NCEP 再分析资料

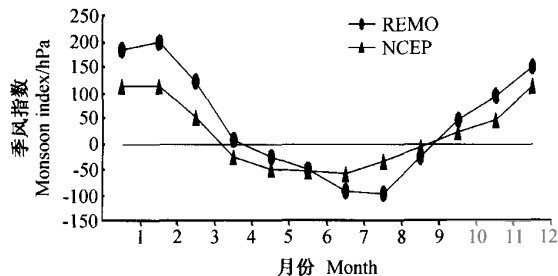


图 10 1980 年 REMO 及 NCEP 再分析资料的季风指数的时间序列

Fig. 10 Monsoon index with REMO and NCEP re-analysis in 1980

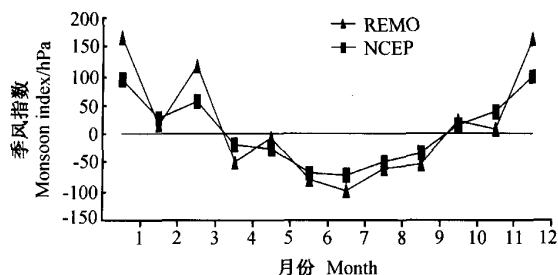


图 11 1990 年 REMO 及 NCEP 再分析资料的季风指数的时间序列

Fig. 11 Monsoon index with REMO and NCEP re-analysis in 1990

所描绘的 1980 年和 1990 年季风指数的时间序列。

夏季风盛行时，海上气压比陆地高，因此季风指数为负值，负值越大夏季风越强；反之，冬季风盛行时，陆地气压比海上高，因此季风指数为正值，正值越大冬季风越强。从图 10 中可以看出 REMO 模拟的季风指数在月变化趋势上同 NCEP 再分析资料非常一致，1980 年模拟场与 NCEP 资料的季风指数线性相关系数为 0.97，已经达到 99% 信度检验。模拟场表明，夏季风爆发时间大约在 4 月份，与上面对气象场的分析结果一致。1980 年模拟的夏季风爆发时间较 NCEP 再分析场晚，但在 7、8 和 9 月强度较强，在 8 月份 REMO 模拟的夏季风强度达到最强。随着时间的推移，夏季风消退，冬季风逐渐爆发，两者得到的冬季风爆发时间较一致，REMO 模拟的冬季风较 NCEP 再分析资料强。1990 年 3 月份模拟的冬季风强度较 NCEP 强，从 4 月份到 9 月份盛行夏季风，10 月为过渡时期，而后又爆发冬季风。从整个过程来看，REMO 模拟的季风强度较 NCEP 再分析场强。比较 1980 年和 1990 年季风指数的时间序列图，1990 年季风时强时弱，但总体上可以反映出季风的季节变化。

因此，区域气候模式 REMO 能够较好地模拟出东亚地区夏季风与冬季风爆发与消退过程，成功地模拟了东亚季风的季节变化。

4 结论

本研究将欧洲区域气候模式 REMO 首次应用于东亚区域，对东亚地区进行区域气候的模拟研究。为了检验此模式在东亚地区的模拟性能，进行了 1980 年和 1990 年的模拟研究，分析了气压场、流场、温度场以及降水场，给出了季风指数的月变化并将模拟结果与 NCEP 再分析资料和 GPCC 的降水资料进行了对比，得到以下初步结论：

(1) REMO 模式较好地模拟出东亚地区 1980 年和 1990 年季风季节变化的主要气候特征，通过定义的季风指数也可以看出 REMO 能够较好地模拟出东亚地区夏季风与冬季风爆发与消退过程，成功地模拟东亚季风的环流特征和季节变化，对东亚区域气候季风季节变化具有一定的模拟能力。

从模式模拟结果与 NCEP 资料的空间相关性来看, 模式对东亚季风冬季的模拟效果优于夏季。

(2) 对东亚地区降水趋势的模拟较好, 反映出降水的季节变化, 但在强度上较观测值偏大, 孟加拉湾附近模拟的降水强度较实测大 2~3 倍, 有待于做进一步的研究改进。

致谢 在德国马普气象研究所工作期间, Ralf Podzun 博士、Baerbel Langmann 博士和 Tido Semmler 博士等在模式方面给予了一定的帮助; 中国海洋大学黄菲博士提供了 NCEP 再分析资料, 在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] Gates W L. The atmospheric model intercomparison project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1992, **73**: 1962~1970
- [2] IPCC. *Climate Change, The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge. UK, Cambridge University Press, 1990, 365pp
- [3] IPCC. *Climate Change, The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 1992, 198pp
- [4] IPCC. *Climate Change, The Science of Climate Change*. Cambridge. UK, Cambridge University Press, 1996, 572pp
- [5] Groth S L, MacCracken M C. The use of general circulation models to predict regional climate change. *J. Climate*, 1991, **4**: 286~303
- [6] Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T. Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary layer and radiation transfer process. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**: 2794~2813
- [7] Giorgi F, Marinucci M R, Canio G De, et al. Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**: 2814~2832
- [8] 刘永强, 丁一汇. 区域气候模拟研究. *应用气象学报*, 1995, **6** (2): 28~239
Liu Yongqiang, Ding Yihui. A review of the study on simulation of regional climate. *Quart. Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1995, **6** (2): 28~239
- [9] 钱永甫, 颜宏, 骆启仁, 王谦谦. 一个有大地形影响的初始方程数值模式. *大气科学*, 1978, **2** (2): 91~102
Qian Yongfu, Yan Hong, Luo Qiren, Wang Qianqian. A primary equation model with the effect of topography. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1978, **2** (2): 91~102
- [10] Liu Y, Giorgi F, Washington W. Simulation of summer monsoon climate over East Asia with an NCAR regional climate model. *Mon. Wea. Rev.*, 1994, **122**: 2331~2348
- [11] 沈桐立, 丁一汇, 王永青, 李骥. 区域气候模拟的可行性研究. 见: 赵宗慈主编, 中国短期气候预测的模式研究, 北京: 气象出版社, 1996, 178~185
Shen Tongli, Ding Yihui, Wang Yongqing, Li Ji. Feasible study on the regional climate simulation. In: *The Simulation Study on the Short-Term Climate Prediction in China* (in Chinese), Zhao Zongci, Ed. Beijing: China Meteorological Press, 1996, 178~185
- [12] 万齐林. 区域气候数值模式研究及试验. 见: 赵宗慈主编, 中国短期气候预测的模式研究, 北京: 气象出版社, 1996, 121~132
Wan Qilin. The study on the regional climate model and its experiments. In: *The Simulation Study on the Short-Term Climate Prediction in China* (in Chinese), Zhao Zongci, Ed. Beijing: China Meteorological Press, 1996, 121~132
- [13] 龚威, 李维亮, 周秀骥. 用改进的 NCAR 区域气候模式模拟中国夏季降水. 见: 曹鸿兴、李月洪、魏凤英主编, 中国短期气候变化及成因研究, 北京: 气象出版社, 1996, 110~116
Gong Wei, Li Weiliang, Zhou Xiuji. The simulation on summer precipitation in China using the improved NCAR regional climate model. In: *The Short-Term Climate Change in China and Its Origin* (in Chinese), Cao Hongxing, Li Yuehong, Wei Fengying, Eds. Beijing: China Meteorological Press, 1996, 110~116
- [14] 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
Luo Yong, Zhao Zongci. Numerical simulation of East Asian regional climate with NCAR RegCM2. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1997, **8** (Suppl.): 124~133
- [15] 赵宗慈, 罗勇. 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*, 1997, **8** (增刊): 116~123
Zhao Zongci, Luo Yong. Simulations of summer monsoon over East Asia: intercomparisons of three regional climate models. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1997, **8** (Suppl.): 116~123
- [16] 陈明, 符添斌. 区域和全球模式的嵌套技术及其在区域气候和气候变化研究中的应用. 博士后研究报告, 中国科学院大气物理研究所, 1997
Chen Ming, Fu Congbin. Regional and Global Model Nest Technique and Its Application in Regional Climate and Climate Change Study. Post-Ph. D report, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 1997

- [17] 魏和林. 区域气候模式及其对东亚气候模拟的研究. 博士学位论文, 中国科学院大气物理研究所, 1997
Wei Helin. Regional Climate Model and Its Simulation to Climate Change over East Asia. Ph. D dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 1997
- [18] 史学丽, 丁一汇, 刘一鸣. 区域气候模式对中国东部夏季气候的模拟试验. 气候与环境研究, 2001, 6 (2): 249~254
Shi Xueli, Ding Yihui, Liu Yiming. Simulation experiments of summer rainbelt in China with the regional climate model. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, 6 (2): 249~254
- [19] Jacob D, Podzun R. Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteor. Atmos. Phys.*, 1997, 63: 119~128
- [20] Renssen H, Isarin R F B, Jacob D, Podzun R, Vandenberghe J. Simulation of the Younger Dryas climate in Europe using a regional climate model nested in an AGCM: Preliminary results. *Global and Planetary Change*, 2001, 30: 41~57
- [21] Hauke Berndt. The mesoscale model REMO: A Study on Precipitation and Surface Runoff in Polar Regions. Ph. D Thesis, Kiel, February 2002
- [22] Anne Chevillar, Karstens U, Ciais P, Lafont S, Heimann M. Simulation of Atmospheric CO₂ over Europe and Siberia using the regional scale model REMO. *Tellus* (B), 2002, 54 (5): 872~894
- [23] Simmons A J, Burridge D M. An energy and angular-momentum conserving vertical finite-difference scheme and hybrid vertical coordinates. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, 109: 758~766
- [24] Tiedtke M. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Monthly Weather Review*, 1989, 117: 1779~1800
- [25] Ritter B, Geleyn J F. A comprehensive radiation scheme for numerical weather prediction models with potential applications in climate simulations. *Mon. Wea. Rev.*, 1992, 120: 303~325
- [26] Davies H C. A lateral boundary formulation for multi-level prediction models. *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, 1976, 102: 405~418
- [27] 郭其蕴. 东亚夏季风指数及其分析. 地理学报, 1983, 38 (3): 207~217
Guo Qiyun. An East Asian summer monsoon index and its analysis. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1983, 38 (3): 207~217