

MM5V3 对东亚区域大气环流模拟能力的检测

赵得明¹ 符淙斌¹ 苏炳凯²

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, 北京 100029

2 南京大学大气科学系, 南京 210093

摘 要 为了检验参加亚洲区域气候模式国际比较计划 (RMIP) 的数值模式 MM5V3 模拟气候及其变化的能力, 对利用该模式完成的东亚区域 (包括大部分亚洲大陆、西太平洋、孟加拉湾和南海地区) 1989~1998 年 10 年模拟试验积分结果, 用奇异值分解 (SVD) 分析了模式模拟和观测 (NCEP/NCAR 再分析资料) 的 500 hPa 月平均高度场之间的关系, 得到检验数值模式模拟气候及其变化能力的两种有效指标: 模态相关系数和异性相关系数。对 500 hPa 月平均高度场及其距平场和冬、夏季的月平均高度距平场进行 SVD 分析, 由 North 检验显著的前两对模态都有很高的模态相关系数和异性相关系数分布。结果表明: MM5V3 对 500 hPa 月平均高度场气候态及其异常变化有一定的模拟能力, 模拟的冬季比模拟的夏季情况要更好。

关键词 奇异值分解 模拟能力 模态相关系数 异类相关系数

文章编号 1006-9585 (2008) 01-0001-09 **中图分类号** P435 **文献标识码** A

Testing the Ability of MM5V3 to Simulate Atmosphere Circulation in East Asia

ZHAO De-Ming¹, FU Cong-Bin¹, and SU Bing-Kai²

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

2 *Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093*

Abstract In order to test the ability of numerical model (MM5V3) to simulate climate and its change in Regional Climate Model Inter-comparison Project for East Asia (RMIP), SVD (Singular Value Decomposition) technique is adopted to express the relationship of 500 hPa geopotential height fields between observed values (NCEP/NCAR re-analysis data) and simulated results using MM5V3 in East Asia (including majority of Asia land, west Pacific, Bengal bay and South China Sea) from 1989 to 1998. Two effective indices, mode correlation coefficient and heterogeneous correlation coefficient, are accepted to test the ability of numerical model to simulate climate and its change. Monthly mean geopotential height fields and monthly mean geopotential height anomaly fields for 120 months, monthly mean anomaly geopotential height fields in winter and summer are analyzed respectively. North test shows that the two leading modes have the remarkable mode correlation coefficient and heterogeneous correlation coefficient. The comparisons show that MM5V3 can simulate 500 hPa geopotential height field and its anomaly field well in a certain degree, and the simulation in winter is much more satisfactory than that in summer.

Key words Singular Value Decomposition, simulation ability, mode correlation coefficient, heterogeneous correlation coefficient

收稿日期 2006-12-19 收到, 2007-09-02 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400500 和中国博士后科学基金资助项目 20060400492

作者简介 赵得明, 男, 1970 年出生, 在站博士后, 主要从事区域模式及土壤湿度研究。E-mail: Demizh@hotmail.com

1 引言

自区域气候模式引入国内后,利用区域气候模式对东亚地区有很多的模拟试验^[1~4]。随着中尺度模式的发展,在新一代的中尺度模式基础上建立区域气候模式成为可能。许多研究对改进的 MM5 进行了区域气候模拟的初步尝试^[5~7]。NCAR 的中尺度模式 MM5V3 包含了对区域气候模拟比较重要的辐射和陆面过程,同时有更详细的积云、边界层等参数化方案和先进的初、边界值处理,该模式已被广泛应用于区域气候模拟试验^[8~10]。

如何客观、有效地评估 MM5V3 模拟气候及其变化的能力是值得研讨的问题,随模拟目标不同所用检验方法也应有所不同。在亚洲区域气候模式国际比较计划 (Regional Climate Model Inter-comparison Project for Asia, RMIP) 第 I 阶段中,我们关注的是用数值模式模拟 1997 年 3 月~1998 年 8 月期间我国发生的特旱和特涝两个极端气候事件,采用 t 检验比较该期间模拟与观测月平均气候要素场是否相似,两个极端气候事件期间的异常是否存在显著的差异,如果模拟场和观测场的月平均气候场之间无显著性差异,但是两个极端事件间存在着显著性差异,我们可以判定模式在模拟这两个极端事件的能力较强。

东亚地区与世界其他地区相比有其独特的地形、植被和季风特征,是世界上气候变率较大的地区之一。西边是青藏高原,东面是西太平洋,而北边有复杂的地形和植被,南面又是赤道海洋。东亚区域季风气候变化直接影响经济的发展。因此开展东亚区域气候形成原因和变化机制的研究对中国国民经济的发展有重要意义。在 RMIP 第 II 阶段中,为了更好地检验各区域气候模式对东亚地区的模拟能力,利用不同的区域气候模式对东亚地区作 10 年连续的模拟积分试验,模拟区域包括东亚大部分地区。此时,用数值模式模拟 1989~1998 年我国气候变化规律和特征时,若仍用 t 检验只能评估模式模拟的总体效果。当然可以使用两场相关系数(对空间的)及其距平相关系数,但是,这样就有 120 个模拟场与观测场之间相关系数表示数值模式模拟月平均场的能力,

又有 120 个模拟场与观测场之间距平相关系数表示数值模式模拟异常变化的能力。注意到,这些相关统计特征量是对整个模拟区域而言的,如果认为分辨率太粗需分割成若干子区域,则统计特征量的总数随之成倍增加,不利于抓住主与次,难以做出客观而准确的评估。

本文试图用一种方法来抓住最主要的评估特征,浓缩更多的评估信息量,这个方法就是奇异值分解 (SVD)。Bretherton 等^[11]对 SVD 和一种常用的分析——两个同步场的孤单空间型方法作了比较,Wallace 等^[12]利用 SVD 研究了冬季海表面温度和 500 hPa 高度距平场之间的关系,丁裕国等^[13]认为 SVD 模型是一种普适性强的气象诊断工具。为了检测在 RMIP 第 II 阶段中 MM5V3 对 1989~1998 年的 10 年积分模拟效果,本文仅以 500 hPa 月平均高度场为例,用 SVD 分析模拟的 500 hPa 月平均高度场与对应同期观测的 500 hPa 月平均高度场之间的关系,分析检验 10 年间该数值模式模拟 500 hPa 月平均高度场的能力。

2 SVD 用于模拟效果检验的指标

奇异值分解方法是研究两个变量场相关结构的诊断方法^[11,12],它以两个场协方差最大为基础展开,分别计算交叉协方差矩阵的奇异值及正交的左、右奇异向量及时间系数,成对的奇异向量构成一对 SVD 空间模态。左(右)奇异向量的时间系数与右(左)观测场的时间序列之间的相关,称为异类相关^[13],异类相关表明,一个场的某一模态时间变化对另一个场的总影响状况(即异类相关场),其显著相关区则代表了另一个场受该模态影响最为关键的区域。左(右)奇异向量的时间系数与左(右)观测场的时间序列求相关,称为同类相关^[13],同类相关表明,一个场的某一模态时间变化对自身场的影响状况(即同类相关场),其显著相关区则代表了自身变化最为关键的区域。多数研究者都用异性相关系数来分析左场和右场的相关型。为用于模式检验,本文设定两个气候要素场分别是 500 hPa 高度场的观测场 $\mathbf{X}_{n \times q}$ (称为左场)和对应的模拟场 $\mathbf{Y}_{n \times p}$ (称为右场),其中 $n=120$ 为样本容量, q 和 p 为两场的格点数 ($p=q=4\ 941$)。对观测场和模拟场作

SVD 计算, 得到两种指标: 模态相关系数和异类相关系数。

3 模式模拟效果检验个例

RMIP 第 II 阶段, 模拟区域包括了大部分亚洲大陆、西太平洋、孟加拉湾和南海等地区。用 MM5V3^[14] 模式模拟积分 11.5 年 (1988 年 7 月~1999 年 12 月), 分析 10 年 (1989 年 1 月~1998 年 12 月)。模拟区域中心为 (35°N, 105°E), 格点范围 151 (EW) ×111 (SN), 格距 60 km, 用于分析的区域范围是 81 (EW) ×61 (SN)。动力框架为: 垂直方向 16 σ 层, 非静力动力过程, Grell 积云参数化过程, Dudhia 的短波参数化过程, OSU LSM 陆面参数化过程, MRF 的边界层方案, RRTM 长波辐射方案。模拟试验利用 NCEP/NCAR 的再分析资料^[15], 水平分辨率为 2.5°×2.5°, 边界条件 6 h 更新一次。

以 500 hPa 月平均高度场为检验个例, 则模式模拟的上述分析时段和范围的 500 hPa 月平均高度场为模拟场 Y , 而相同时段、相同范围的 NCEP 再分析资料的 500 hPa 月平均高度场为观测场 X 。

4 模式模拟效果检验分析

4.1 t 检验

我们先用 t 检验对 10 年逐月 500 hPa 月平均高度场作检验 (图 1), 可以看到 1 月和 7 月的 $t-t_{0.01}$ 差值图上均为正值 (其余月的 $t-t_{0.01}$ 差值

图略, $t_{0.01}=2.878$), 表明各月模拟场与观测场的平均值没有显著性差异, 也就是说 1989~1998 年 12 个月 500 hPa 月平均高度场的模拟效果都比较好。同时, 计算 10 年 120 个月的总体平均 (图 2a) 来表示模式模拟的总体效果, 模拟和观测的两个平均高度场的分布形式和强度大小都非常接近。

4.2 SVD 分析

4.2.1 500 hPa 月平均高度场

对模拟和观测的 500 hPa 月平均高度场作 SVD 计算, 经 North 检验得到前二对显著的模态 (表 1)。

第一对模态的方差贡献高达 99.99%, 其模态相关系数为 0.9921, 经检验是显著的 (置信度为 0.01 的相关系数置信值为 0.228)。观测场和模拟场的奇异向量分布极为相似 (图 2b), 并与 500 hPa 总的月平均高度场 (图 2a) 分布很相似; 同时, 异性相关系数分布显示 (图 2c) 观测场和模拟场的异性相关系数分布类似, 在中高纬度均可以达到 0.9 以上 (置信度超过 0.01)。因此, 第一对模态场显示模拟场和观测场相近, 同时与 10 年 120 个月的 500 hPa 月平均高度场分布一致, 表明

表 1 500 hPa 月平均高度场 SVD 分析的前二对模态的模态方差贡献 SCF、累积方差贡献 CSCF 和模态相关系数 r
Table 1 SCF, CSCF and r for the dominant two modes in SVD analysis to 500 hPa monthly mean geopotential height fields

模态	SCF/%	CSCF/%	r
1	99.99	99.99	0.9921
2	8×10^{-17}	99.99	0.9916

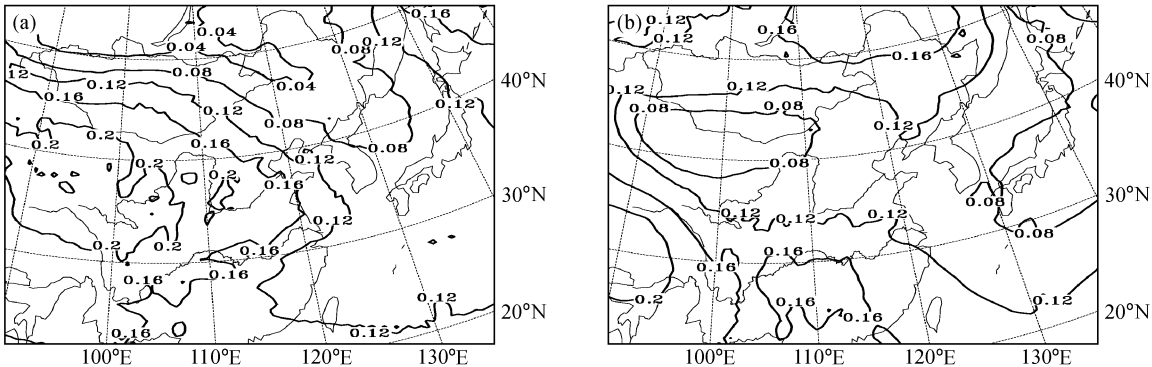


图 1 $t-t_{0.01}$ 差值: (a) 1 月; (b) 7 月
Fig. 1 Differences of $t-t_{0.01}$: (a) Jan; (b) Jul

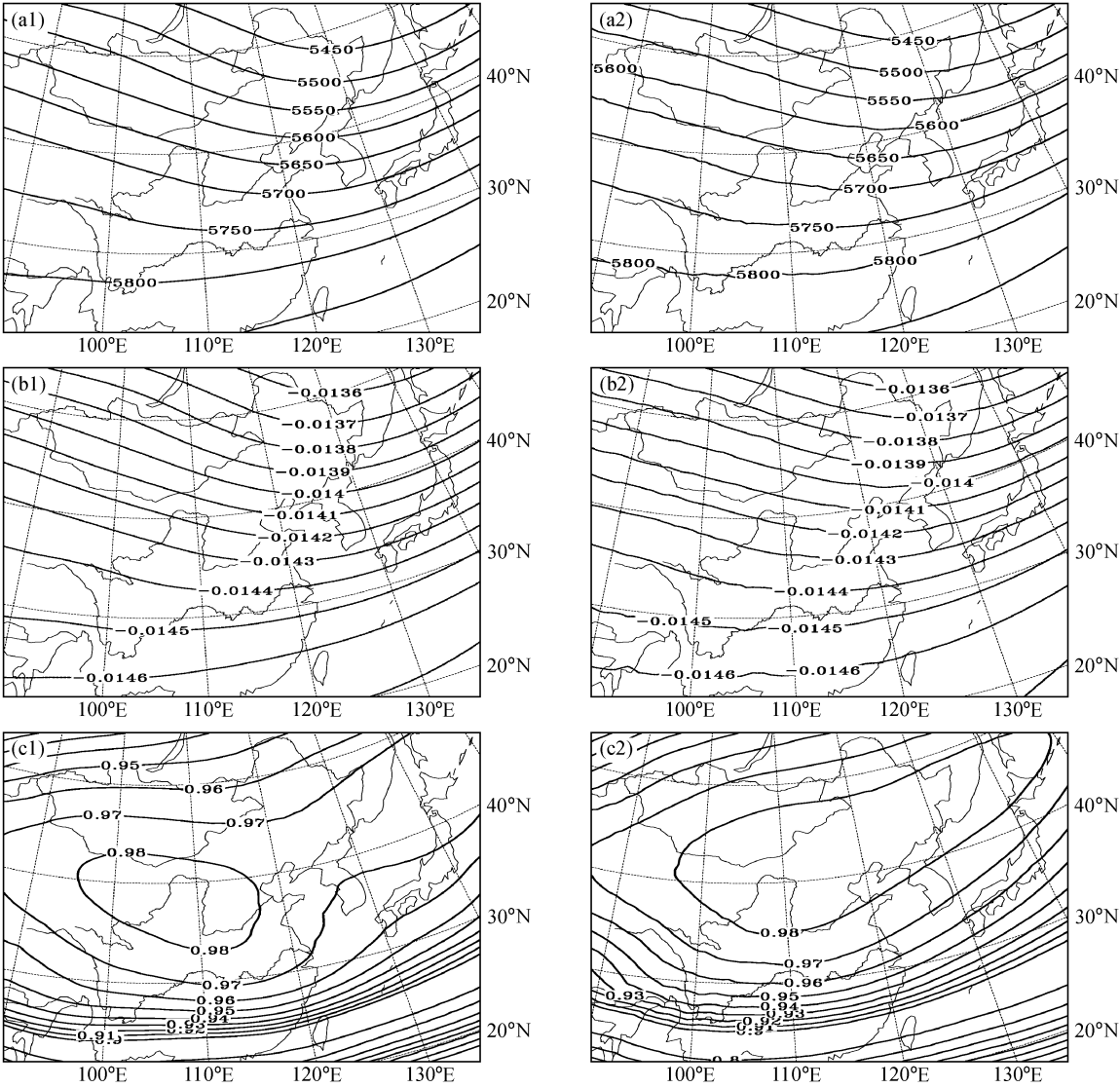


图2 500 hPa 月平均高度场 (a) 10 年总体平均以及 SVD 第一对模态的 (b) 奇异向量 (c) 异性相关系数分布 (1 为观测场, 2 为模拟场)

Fig. 2 Distributions of 500 hPa (a) ensemble mean geopotential height fields over 1989—1998, distributions of (b) SVD singular vectors and (c) heterogeneous correlation coefficients for the first mode (1: observed, 2: simulated)

第一模态场实际上反映的是一种气候平均态。第一模态的时间变化曲线分布基本一致 (图 3a), 表明模式能很好的模拟出平均气候态的季节变化特点 (冬夏反位相) 及其年际变化。

尽管检验显著的第二对模态场与第一对模态场一样, 模拟场和观测场时间变化曲线 (图 3b) 和异性相关系数 (图略) 分布相似, 模态相关系数也很高 (达到 0.9916), 但这对模态反映的是相对气候态的偏差情况, 特别是它的方差贡献几乎为 0。因此, 为了反映气候异常的特征, 下面对

500 hPa 月平均高度距平场做 SVD 来揭示。

4.2.2 500 hPa 月平均高度距平场

为了揭示模式对 500 hPa 月平均高度场异常的模拟, 我们对模拟和观测的 500 hPa 高度距平场也做 SVD 分析 (表 2)。

经 North 检验用前两对显著模态描述 500 hPa 月平均高度场异常的主要特征, 它们的方差贡献分别为 93.71% 和 5.96%, 其累积方差贡献高达 99.67%。前两个模态的时间变化曲线 (图 4) 显示观测场和模拟场的时间变化分布大体相似, 但幅

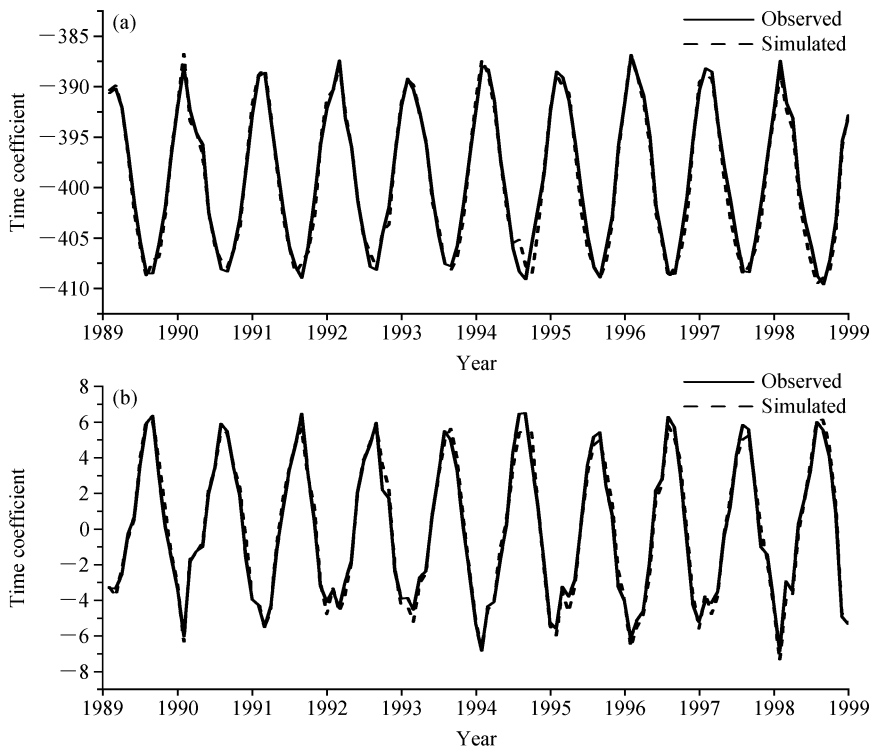


图 3 500 hPa 月平均高度场 (a) 第一和 (b) 第二对模态时间展开系数
Fig. 3 Time series of expansion coefficients for the (a) first and (b) second mode of 500 hPa monthly mean geopotential height fields

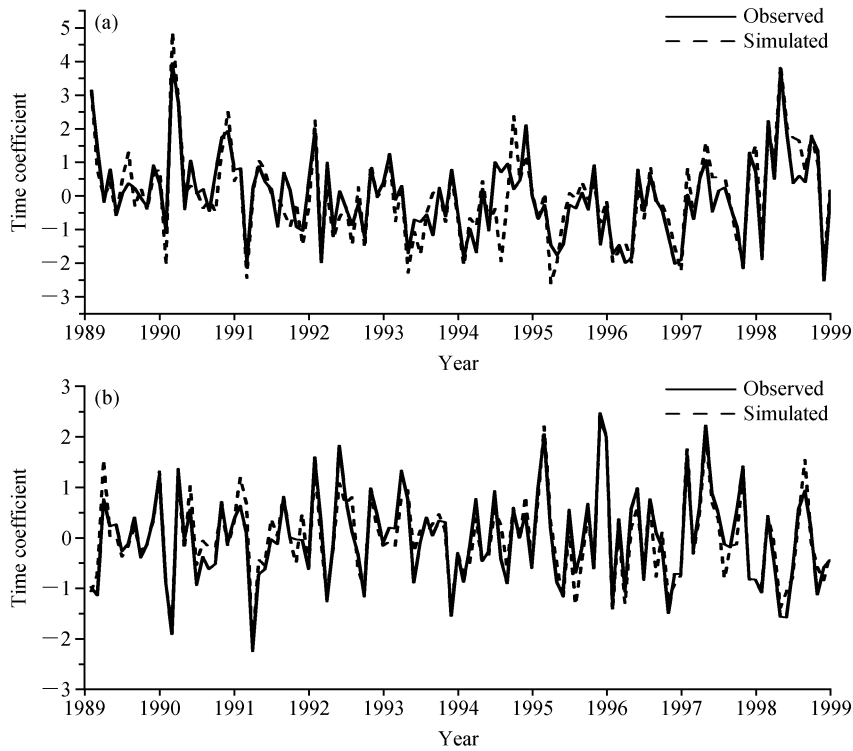


图 4 同图 3, 但为 500 hPa 月平均高度距平场
Fig. 4 Same as Fig. 3, but for 500 hPa monthly mean geopotential height anomaly fields

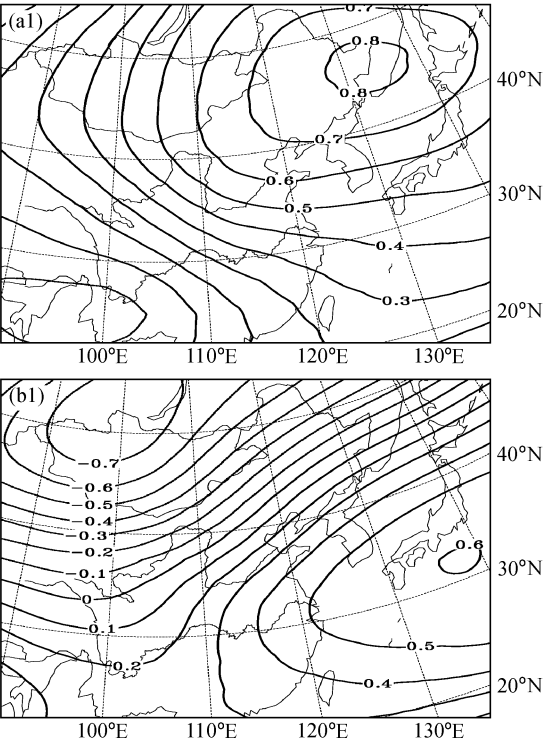
度不完全一致，由于使用距平形式已不存在冬夏反位相的年变程，而出现两模态时间曲线的值在 0 附近振动，存在明显的 2~3 个月高频振荡。这二对模态的异性相关系数分布（图 5）都很相似，其强度基本一致，其中第一对模态特点是异常变化集中在东北亚地区且全场基本为同位相，也许映射东亚大槽的异常；而第二对模态特点是异常变化呈一对分别位于贝加尔湖西和日本以东洋面上反位相的偶极子型。

经检验显著的前两个模态的模态相关系数分别达到 0.8815 和 0.9368，虽然第二模态的 SCF 只占 5.96%，但其模态相关系数可达 0.9368，表明该模态对应的贝加尔湖西和日本以东洋面上气候系统异常的相对重要性。

表 2 同表 1，但为距平场

Table 2 Same as Table 1 but for anomaly fields

模态	SCF/%	CSCF/%	<i>r</i>
1	93.71	93.71	0.8815
2	5.96	99.67	0.9368



4.2.3 冬夏季 500 hPa 月平均高度距平场

以上从 RMIP 第 II 阶段模拟的总体（120 个月）的 SVD 分析已揭露出：一对显著反映 500 hPa 高度场的气候态（年变程平均状态的基本模态），二对显著反映 500 hPa 高度场的气候异常变化模态（2~3 个月高频振荡的扰动模态），而且各模态模拟和观测的异性相关系数分布和时间变化曲线都很相似，相关程度也很高。但是，如果我们观察图 3 中时间变化曲线发现第一模态中模拟和观测的月际变化曲线在夏季有明显的偏差。因此，进一步分别对冬季（1 月）和夏季（7 月）的 500 hPa 月平均高度距平场做 SVD 分析（表 3），检验模式对冬夏季距平场的模拟能力。

经 North 检验仍有二对显著模态来描述冬夏

表 3 同表 2，但为冬季/夏季

Table 3 Same as Table 2 but for winter/summer

模态	SCF/%	CSCF/%	<i>r</i>
1	99.07/86.68	99.07/86.68	0.9837/0.8118
2	0.90/12.15	99.97/98.83	0.9775/0.8958

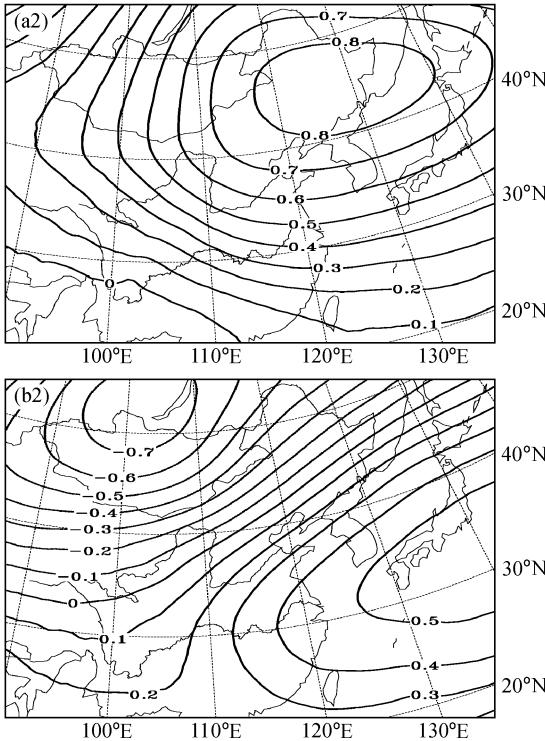


图 5 500 hPa 月平均高度距平场 (a) 第一和 (b) 第二对模态异性相关系数分布 (1 为观测场, 2 为模拟场)

Fig. 5 Distributions of heterogeneous correlation coefficients for the (a) first and (b) second mode of 500 hPa monthly mean geopotential height anomaly fields (1: observed, 2: simulated)

季 500 hPa 月平均高度距平异常的主要特征, 无论冬季还是夏季累积方差贡献都很高, 分别达到 99.77% 和 98.83%。但是, 第一对模态的方差贡献在冬季已高达 99.07%, 夏季降为 86.68%; 而第二对模态的方差贡献冬季只有 0.9%, 夏季由于副热带高压异常变化相对重要, 明显地增加为 12.15%。相应的二对模态相关系数虽然都显著, 但夏季不到 0.9, 而冬季的都达 0.98 以上。

经检验显著的前二个模态的年际变化分布显示: 冬季 (图 6), 观测场和模拟场的时间曲线变化大体相似; 夏季 (图 7), 第一模态模拟场的时间变化系数振幅大, 第二模态两场总体接近。

异性相关系数分布显示: 冬季 (图 8), 前二对模态模拟场和观测场分布都很相似, 第一对模态分布呈南北反位相的纬向型; 第二对模态分布呈东西反位相的经向型。夏季 (图 9), 模拟的情

况不如冬季的好, 第一对模态模拟场和观测场的分布除 45°N 以北基本相似外, 在河套以东、30°N 以北出现反位相的模拟; 第二对模态模拟场和观测场的分布大部分相似, 但在河套以西、30~45°N 间也出现反位相的模拟。

5 结论

通过对数值模式 MM5V3 模拟的 1989~1998 年 10 年积分结果与 NCEP/NCAR 再分析资料的 500 hPa 月平均高度场的 SVD 分析, 得到用来检验模式模拟能力的两种综合指标: 模态相关系数和异性相关系数分布。

500 hPa 月平均高度场的 SVD 第一模态揭示的是评估模式模拟要素场平均气候态的能力; 500 hPa 月平均高度距平场的 SVD 分析揭示的是评估

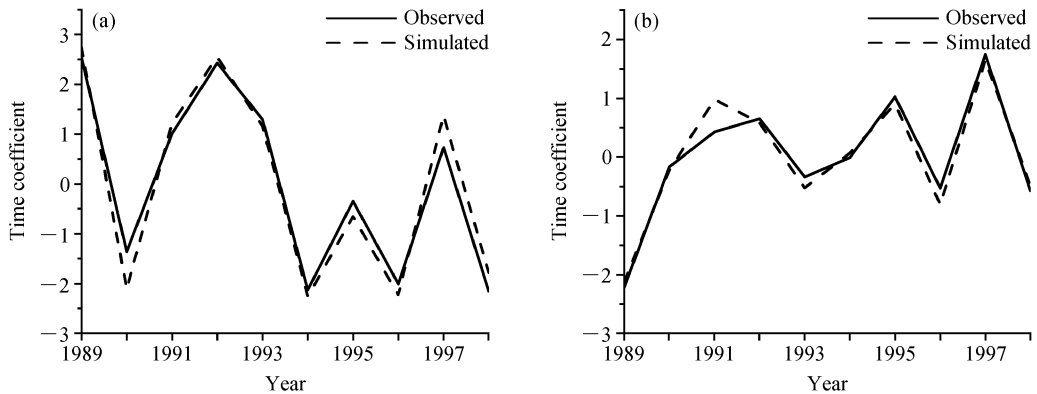


图 6 500 hPa 冬季月平均高度距平场 (a) 第一和 (b) 第二模态的年际变化特征
Fig. 6 Interannual variations of expansion coefficients for the (a) first and (b) second mode of 500 hPa monthly mean geopotential height anomaly fields in winter

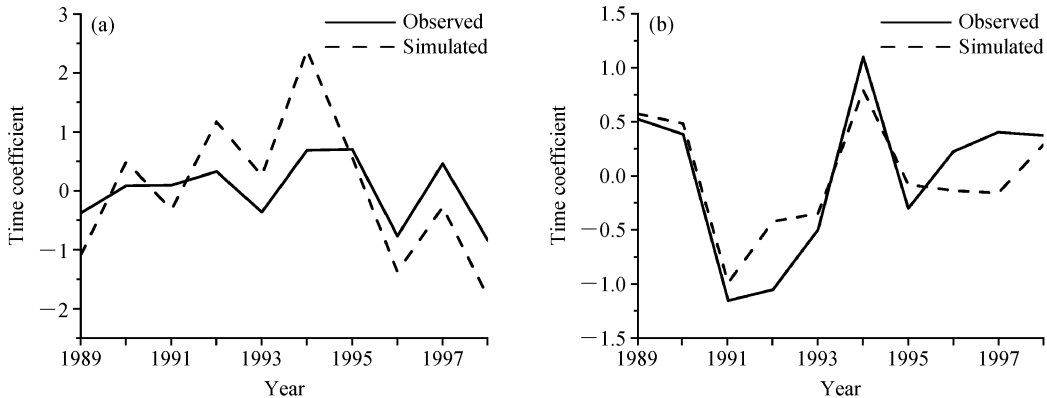


图 7 同图 6, 但为夏季
Fig. 7 Same as Fig. 6, but for summer

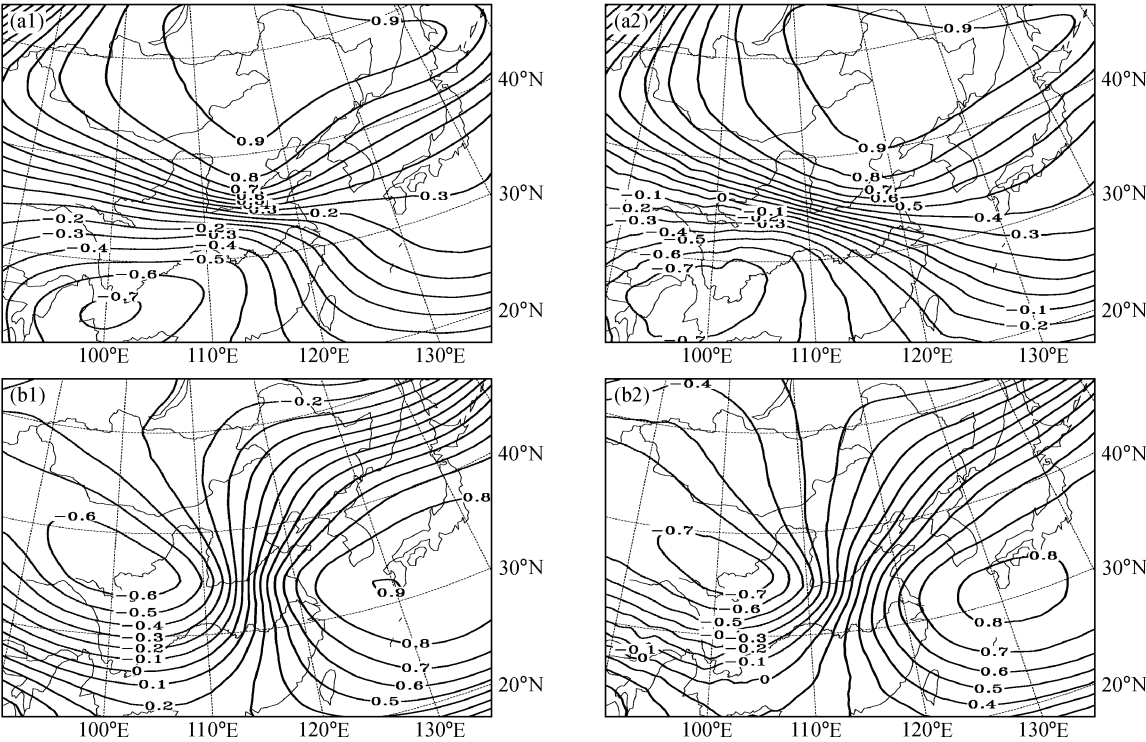


图 8 500 hPa 冬季月平均高度距平场 (a) 第一和 (b) 第二对模态异性相关系数分布 (1 为观测场, 2 为模拟场)
Fig. 8 Distributions of heterogeneous correlation coefficients for the (a) first and (b) second mode of 500 hPa monthly mean geopotential height anomaly fields in winter (1; observed, 2; simulated)

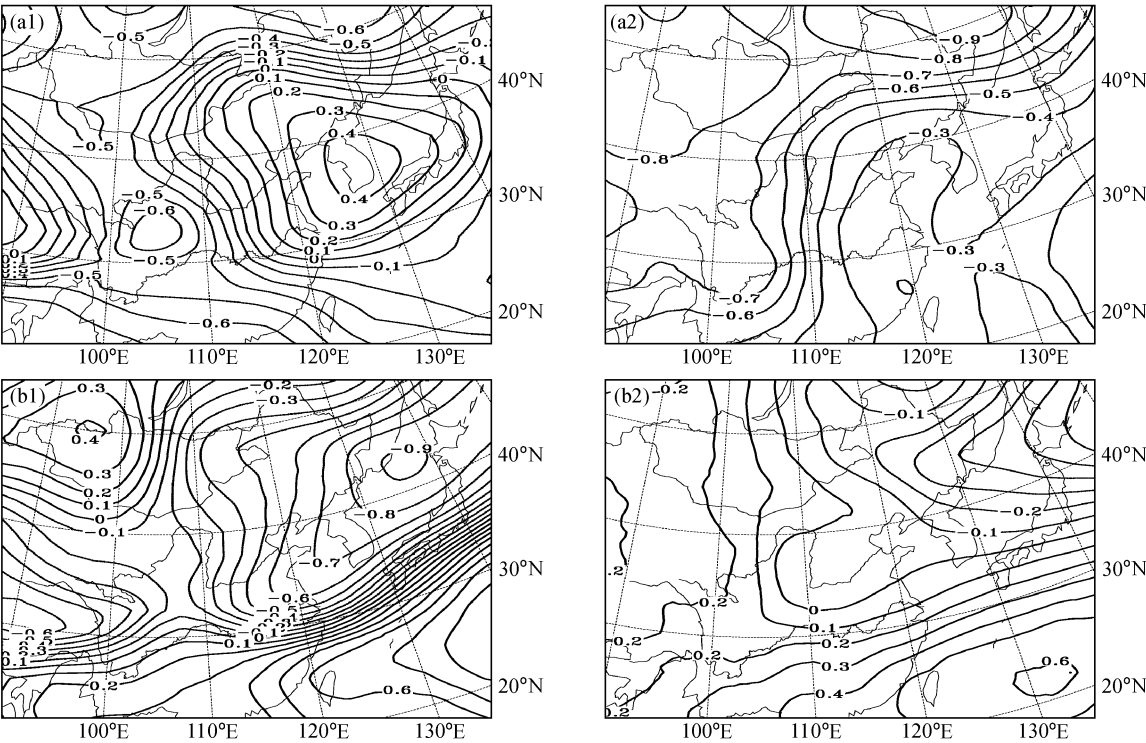


图 9 同图 8, 但为夏季
Fig. 9 Same as Fig. 8, but for summer

模式模拟要素场气候异常扰动态的能力, 其中, 第一对模态映射全场同位相的东亚大槽的异常扰动态, 而第二对模态映射贝加尔湖以西和日本以东洋面上气候系统反位相的异常扰动态。观测场与模拟场的前两对模态的模态相关系数达 0.88 以上, 同时其时间变化曲线和异性相关系数分布基本一致, 说明模式对 10 年 500 hPa 月平均高度场及其距平场有一定的模拟能力。对冬季和夏季 500 hPa 月平均高度距平场的 SVD 分析显示冬季模拟效果好于夏季。

因此, SVD 分布显示 MM5V3 模拟东亚区域的气候及其变化是成功的, 在 10 年尺度上有一定的模拟能力。

参考文献 (References)

[1] 赵宗慈, 罗勇. 区域气候模式在东亚地区的应用研究. 大气科学, 1999, **23** (5): 522~532
Zhao Zongci, Luo Yong. Investigations of application for the regional climate model over East Asia. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (5): 522~532

[2] 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

[3] Luo Yong, Zhao Zongci, Ding Yihui. Ability of NCAR RegCM2 in reproducing the dominant physical processes during the anomalous rainfall episodes in the summer of 1991 over the Yangtze Huaihe valley. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19** (2): 236~254

[4] Liu Yongqiang, Avissar R, Giorgi F. Simulation with the regional climate model RegCM2 of extremely anomalous precipitation during the 1991 East Asian flood: An evaluation study. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101** (D21): 26199~26215

[5] Crawford M, Stensrud D J, Mora F, et al. Value of incorporating satellite-derived land cover data in MM5/PLACE

for simulating surface temperatures. *J. Hydrometeor.*, 2001, **2** (5): 453~468

[6] Wei Helin, Gutowski W J, Vorosmarty C J, et al. Calibration and validation of a regional climate model for Pan-Arctic hydrologic simulation. *J. Climate*, 2002, **15** (22): 3222~3236

[7] Fu Congbin, Wei Helin, Qian Yun. Documentation on Regional Integrated Environmental Model System (RIEMS, version I). TEACOM Science Report, No. 11, START Regional Committee for Temperate East Asia, Beijing, China, 2000. 36pp

[8] Liang Xinzhong, Kunkel K E, Samel A N. Development of a regional climate model for U.S. midwest application. Part I: Sensitivity to buffer zone treatment. *J. Climate*, 2001, **14** (23): 4363~4378

[9] Leung L R, Qian Y, Bian X, et al. Hydroclimate of the western United States based on observations and regional climate simulation of 1981—2000. Part I: Seasonal statistics. *J. Climate*, 2003, **16** (12): 1892~1911

[10] Leung L R, Qian Y, Bian X, et al. Hydroclimate of the western United States based on observations and regional climate simulation of 1981—2000. Part II: Mesoscale ENSO anomalies. *J. Climate*, 2003, **16** (2): 1912~1928

[11] Bretherton C S, Smith C, Wallace J M. An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data. *J. Climate*, 1992, **5** (6): 541~560

[12] Wallace J M, Smith C, Bretherton C S. Singular value decomposition of wintertime sea surface temperature and 500-mb height anomalies. *J. Climate*, 1992, **5** (6): 561~576

[13] 丁裕国, 江志红. SVD 方法在气象诊断分析中的普适性. 气象学报, 1996, **54** (3): 365~372
Ding Yuguo, Jiang Zhihong. Generality of singular value decomposition in diagnostic analysis of meteorological field. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1996, **54** (3): 365~372

[14] Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). NCAR Technical Note, 1994, NCAR/TN-398+STR, 122pp

[15] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77** (3): 437~471