

区域气候模式对东亚气候时空 演变特征的模拟研究*

熊 喆

(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)

摘 要 利用区域环境集成模式系统对东亚地区进行了1987年1月到1996年12月的长期积分试验, 重点采用经验正交函数分析方法分析和比较模式模拟及观测气候主分量时空特征, 从而考察区域气候模式对东亚地区的区域气候模拟能力。结果表明: (1) RIEMS能够较好地抓住地面气温年平均状况及其年变化和年际变率的主要特征; (2) 尽管模式对降水的模拟能力没有对地面气温模拟的强, 但 RIEMS 模式基本上能够模拟出降水的空间分布以及降水的季节变化特征, 同时能够抓住降水的年际变率。

关键词: 区域气候模式; 经验正交函数; 时空演变特征

文章编号 1006-9585 (2004) 02-0295-08 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

1 引言

数值模拟是研究区域气候及变化的重要手段。目前大量的全球气候模式正在广泛应用于气候变化的研究, 并在全球温度、降水趋势的变化等方面取得了一系列成果。由于大气海洋耦合模式水平分辨率较低, 通常为300~500 km, 无法直接用于分析区域气候特征^[1]。为了更好地了解全球气候变化中区域的影响和提高区域气候的模拟能力, 许多科学家已经或者正在发展高分辨率的区域气候模式, 并且得到广泛的应用。区域气候模式首先是由美国大气研究中心的 Dickinson 等^[2]以及 Giorgi 和 Bates^[3]研究小组完成。到目前为止, 区域气候模式已得到广泛应用, 不仅用于目前条件下的气候模拟、古气候模拟以及二氧化碳加倍等试验, 而且被成功地应用于许多不同地区, 如美国大陆、欧洲、东亚、澳大利亚以及非洲等地区。一些研究^[4~13]利用 NCAR RegCM 或其他区域气候模式对东亚地区季风气候进行了模拟。随着区域气候模式在区域气候变化研究中的重要性被认识后, 中国科学家也开始研究发展适合东亚地区的区域气候模式。

20世纪90年代以来, 国内外对区域气候模式的研究工作大致集中在以下2个方面, 即对现代气候和气候变化的模拟。对于气候变化的研究主要集中于用 GCM (General Climate Model) 结果来驱动区域气候模式, 主要考察模式对平均气候态变化、极端事件和气候变率的模拟能力; 对现代气候的研究主要是考察和评估区域气候模式对平均气候态和极端事件的模拟能力, 一般采用观测资料或 GCM 输出的结果来驱动区域

2004-04-14 收到, 2004-04-15 收到修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目 G1990403403、中国科学院知识创新工程重点方向项目 KZ CX3-SW-218 和国家自然科学基金项目 40231006 共同资助

气候模式。观测资料主要来自于数值天气预报 (NWP) 分析数据^[14,15]。这些数据不仅可以用于驱动区域气候模式进行个别时段短期气候模拟比较,而且可以用于更长时间的积分模拟。许多研究表明:区域气候模式比 GCMs 能够更好地模拟出区域气候变化特征;采用观测分析资料作为驱动场来驱动区域气候模式,对于现代气候模拟时,模拟的季节或月平均地面气温和降水存在差别;现在的区域气候模式能够较好地模拟出空间尺度为 $10^5 \sim 10^6$ km 观测气候,一般温度偏差在 2°C ,降水偏差为观测降水的 $5\% \sim 50\%$ 。

尽管利用区域气候模式对于现代气候的模拟研究取得了令人鼓舞的成果,但是它仍然存在许多问题,其中应该指出的主要问题:(1) 试验积分时间较短,仅为几个月或几个季度,最长也只有 3~5 年,不能反映区域气候模式对气候特征的模拟能力;(2) 大多数研究仅限于个例研究,缺乏对模式模拟统计行为的认识。本文利用中国科学院大气物理研究所全球变化东亚区域研究中心发展的区域环境系统集成模式 (简称 RIEMS) 对东亚地区进行连续 10 年积分,其主要目的是分析和考察模式模拟能力的统计行为,特别是考察 RIEMS 模式能否抓住东亚地区平均状态的空间分布特征及其年变化和年际变率的主要空间特征。

2 实验设计及资料处理

2.1 模式介绍以及实验设计

本文所用的区域环境系统集成模式是中国科学院全球变化东亚区域研究中心于 1998 年建立的^[16]。该模式以美国大气研究中心和美国宾夕法尼亚大学发展的中尺度模式 (MM5) 为动力框架,耦合了一些研究气候所需的物理过程方案,包括生物圈-大气圈输送方案^[17]、Kuo-Anthes 积云对流参数化、Holtzlag 行星边界条件和修改的 CCM3 辐射方案等。

模式模拟区域的网格中心位于 (30°N , 117°E),水平分辨率为 60 km,模式的模拟网格点数为 75 (经向) $\times$ 65 (纬向),垂直方向为 16 层,模式层顶气压为 100 hPa。积分的时间为 1987 年 1 月 1 日到 1996 年 12 月 31 日,用美国环境预报中心 (NCEP) 每天 00 时和 12 时 (世界时) 分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的再分析资料作为 RIEMS 的驱动场。采用线性松弛侧边界方案,缓冲区的大小为 10 层。模式中地形来自于 PSU/NCAR $30'$ 地形资料 (图 1);地表覆盖植被类型资料来自于水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的国际卫星陆地气候计划 (ISLSCP) 数据,并将地表覆盖植被类型资料 15 类转化为 BATS (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme) 中的 18 类,然后将地形和地表覆盖植被类型插值到模式网格点上。

2.2 资料处理

用于模式检验的资料包括:(1) 1987~1996 年 160 个观测站点的月平均地面气温、月降水;(2) 1987~1996 年全球观测月降水格点资料^[18];(3) NCEP 再分析资料中的月平均地面气温。

对于表面大气温度来说,首先对观测月平均地面气温数据采用客观分析方法插值到分析控制区的网格上;然后,对于海洋和没有观测报告的控制区网格,用全球高斯

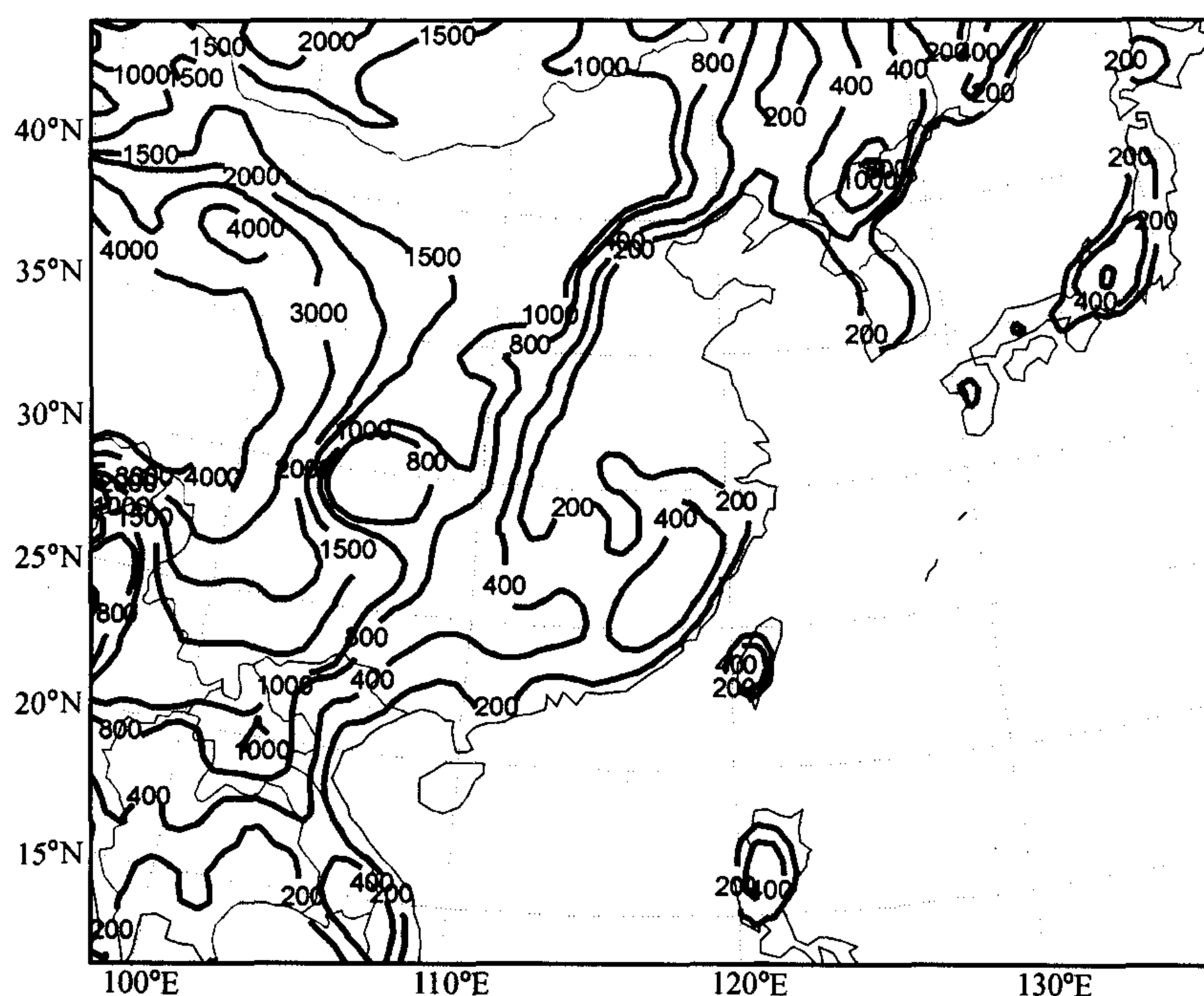


图 1 模式模拟的区域范围及其地形 (单位: m)

网格 NCEP 再分析资料的月平均地面气温进行双线型插值得到的网格点上的数据代替, 最终形成观测的月平均地面气温。

对于降水来说, 首先对观测的月降水量数据, 采用客观分析方法插值, 将其插值到分析控制区网格点上; 然后, 对于海洋和没有观测报告的分析控制区网格点, 用全球观测的月降水网格点资料进行双线型插值得到的网格点上的数据代替, 最后形成观测月总降水量。

本文将 RIEMS 模式和观测的 1987 年到 1996 年逐年月平均地面气温、降水场连结起来, 建立 1987~1996 年地面气温、降水场数据集。为了分离出年际变化信号, 对于数据进行以下处理: 首先, 对 10 年的平均地面气温、降水进行时间平均计算, 建立平均意义上的平均年数据集; 然后, 对应每年 12 月, 以 10 年平均意义上数据集连接逐年的差值序列, 这个差值序列描述了 10 年观测和 RIEMS 模式模拟的地面气温、降水的年际变化; 最后, 对差值序列进行时间标准化处理, 建立 1987~1996 年观测和 RIEMS 模式模拟的地面气温和降水标准化年际变化数据集。本文将对地面气温和降水的原始和标准化数据集进行经验正交函数分析 (简称 EOF)^[19], 以提取模式气候和观测气候的主要信息, 考察 RIEMS 是否能抓住东亚地区气候的时空变化特征。

3 地面气温的时空特征分析

第 1 种方案是对地面气温场作 EOF 分析。直接对地面气温进行展开, 典型场的天气学意义明显, 第 1 特征向量表示多年平均场和季节变化的特征。对实际观测场和模式模拟场前两者的累计方差达 100%, 说明模式能够较好地抓住其控制因子。观测的地

面气温第 1 特征方差贡献占总方差的 99.99%，而模式模拟的第 1 特征向量方差贡献占总方差的 99.98%，从图 2 可以清楚地看到，观测和模式模拟的第 1 特征向量的空间分布特征非常相似，即整个分析控制区等温线的分布趋于纬向分布并且由南向北逐渐递减。相应的时间序列反映了这种平均气候状态逐月演变的情况，模式模拟和实际观测表现出一致的趋势。这说明 RIEMS 模式能够较好地模拟出地面气温的平均气候态和季节变化。

观测的地面气温第 2 特征向量的方差贡献占总方差 0.01%，而模式模拟的地面气温第 2 特征向量的方差贡献占总方差 0.02%。图 3、图 4 分别为地面气温作 EOF 分析的第 2 特征向量的空间分布和对应的时间序列，其中第 1、2 特征向量对应时间序列的数值为实际计算值对于实际计算值中绝对值最大的比值，因此变化区间为 $[-1, 1]$ 。从观测图上可以清楚地反映近 10 年来，地面气温在南北方面变化呈相反趋势，并以 26°N 为界。模式能够模拟出这种趋势，但零线位置较观测偏南 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 。从对应的时间序列曲线上可以看出，无论模式还是实际观测，在每年 4 月份左右都出现由正到负再到正的转变，转变小的符号一直持续到 10 月左右，再返回原来的状态，表现出冬夏转换的特点。

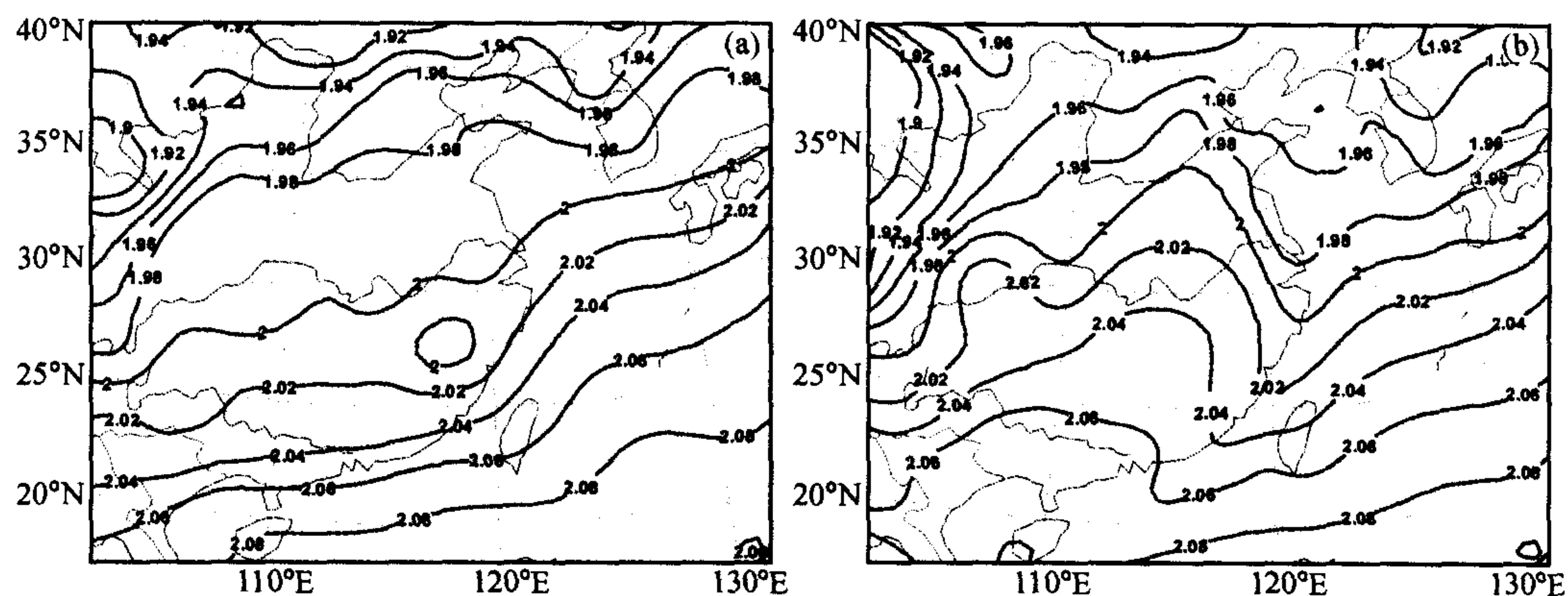


图 2 地面气温作 EOF 分析的第 1 特征向量

(a) 观测; (b) RIEMS 模拟

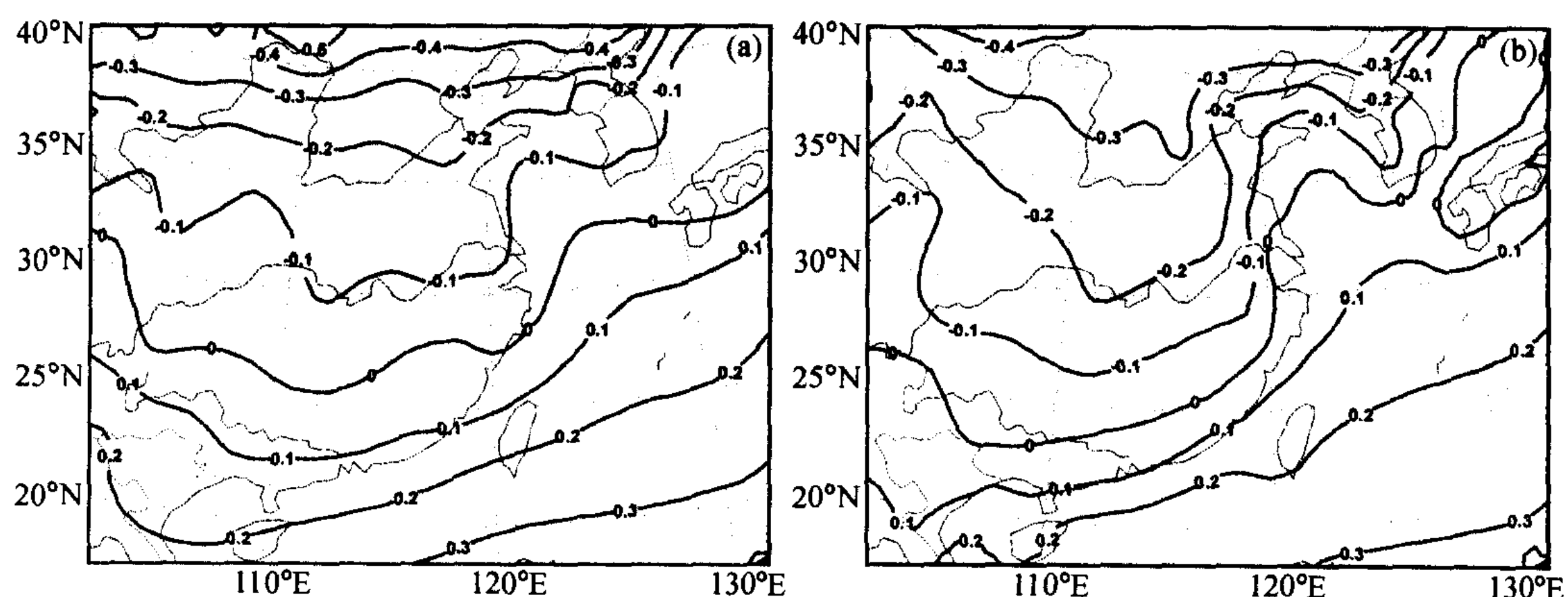


图 3 地面气温作 EOF 分析的第 2 特征向量

(a) 观测; (b) RIEMS 模拟

第 2 种计算方案是对标准化年际变化的地面气温数据作 EOF 分析, 这种方案可以消除地理位置引起的平均值变化及变异的差异, 标准化后去掉年变化, 即季节变化, 只保留年际以上的变化, 所以典型场的天气学意义应该代表年际变率。观测的前 4 个主分量的方差贡献占总方差的 65.24%, 而模式模拟的前 4 个主分量的方差贡献占总方差的 75.58%。观测的第 1 主分量空间分布特征表明, 地面温度在整个分析控制区内具有相同的变化趋势, 极大值中心位于 110°E 以西的地区; 而模式能够较好地模拟出这种趋势, 但中心位置位

于 $(30^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\text{E})$ 。第 2 主分量的空间分布特征表明, 中国东部变化呈南北相反趋势, 即南热北冷或南冷北热, 观测以 23°N 为界, 而模式模拟以 21°N 为界, 模式模拟较观测偏南 $1^{\circ}\sim 2^{\circ}$; 观测的第 3 主分量的空间分布特征是西南-东北方向递减, 并且分界线位于 35°N , 这与模式的第 4 特征向量相似, 但呈东南-西北向递减。观测的第 4 特征主分量的空间分布特征是控制区长江以北东部地区与其他地区呈相反趋势, 即长江以北东部地区暖而其他地区冷或长江以北东部地区冷而其他地区暖, 其与模式第 4 特征向量相似; 模式较好地模拟出这种趋势, 但低值中心较观测偏东, 对于高值中心来说, 模拟较观测偏北大约 $1^{\circ}\sim 2^{\circ}$ 。

通过以上分析可见, RIEMS 模式基本上能够抓住地面气温多年平均状态的空间分布特征和季节变化以及年际变率的主要空间分布。

4 降水的时空特征分析

第 1 种计算方案是直接对降水场作 EOF 分析。观测的前 4 个主分量累积方差达 91.5%, 而模式的前 4 个主分量累积方差达 85.9%, 但和地面气温相比明显偏小, 说明降水的次网格尺度特征比地面气温更明显, 由此可预见降水的模拟效果没有地面气温好。观测的第 1 特征向量的主要分布特征是降水大致呈纬向分布, 由东南向北递减, 反映了多年年平均降水的空间分布特征, 而模式模拟的降水的第 1 特征向量亦呈纬向分布, 但最大值中心位置较观测偏北。

图 5、图 6 分别为降水作 EOF 分析的第 2 特征向量空间分布和对应的时间序列。观测降水的第 2 特征向量的空间分布型主要特征是: 将中国东部分为 3 个带状区域, 依次为长江以北、长江以南、华南以南。长江以南地区与其他两个区域呈相反的趋势。将其空间分布与其时间序列结合起来可以看出, 1~6 月份降水主要位于长江以南, 7~12 月雨区跳到我国北方, 这正好反映东亚地区降水季节变化的特征。对比观测与模拟的时间系数, 可以清楚地看出二者之间非常相似, 也就是说, 模式能够模拟出降水的季节变化趋势。

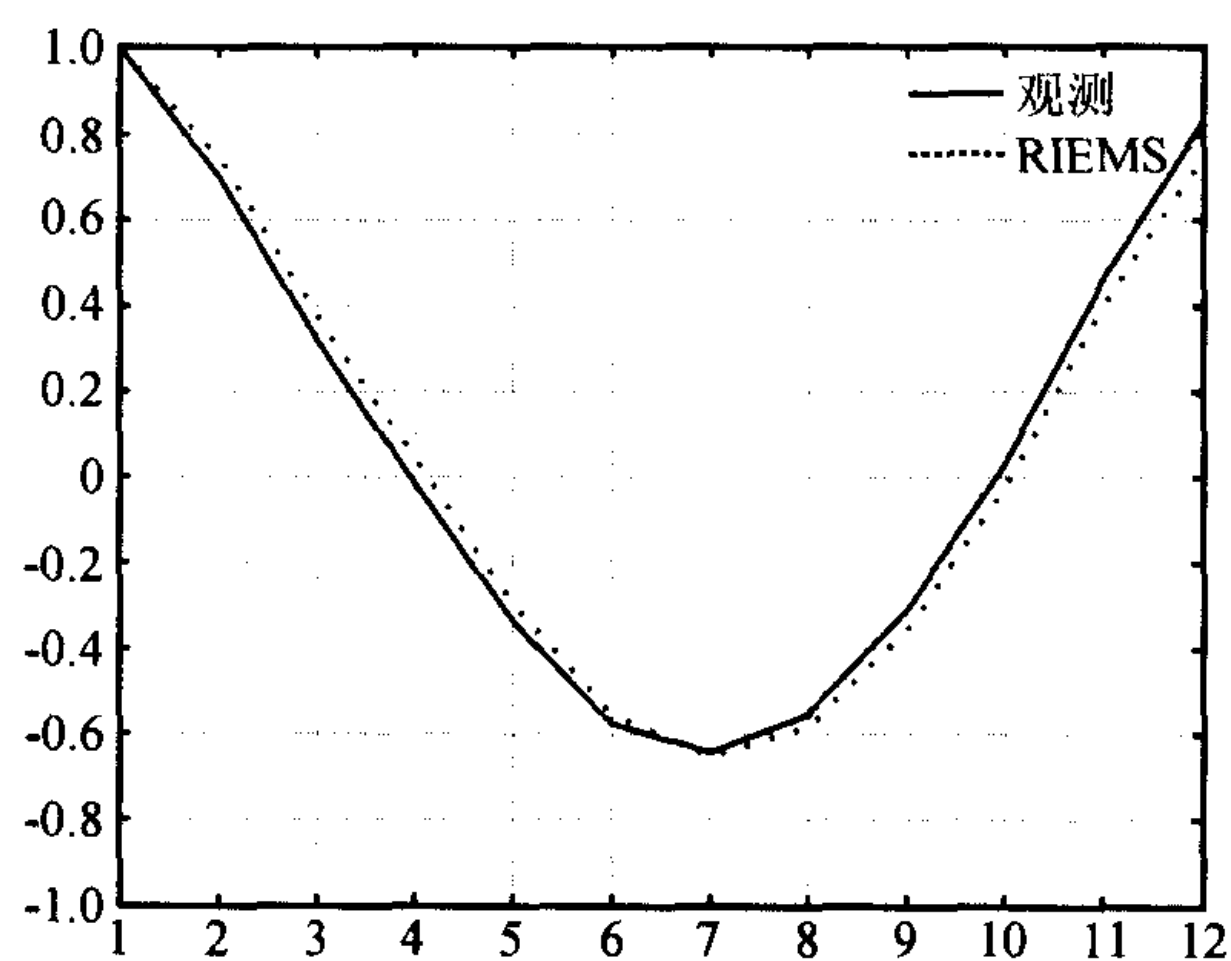


图 4 地面气温作 EOF 分析的第 2 特征向量对应的时间序列

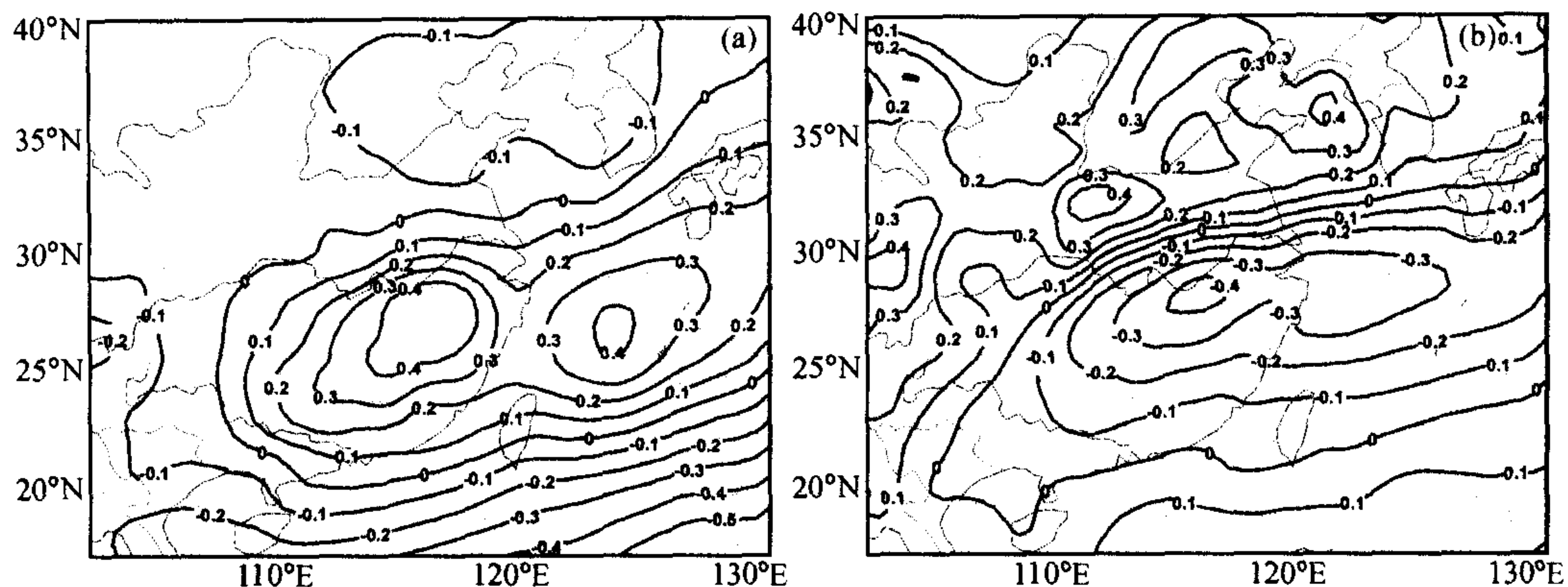


图5 降水作 EOF 分析的第 2 特征向量
(a) 观测; (b) RIEMS 模拟

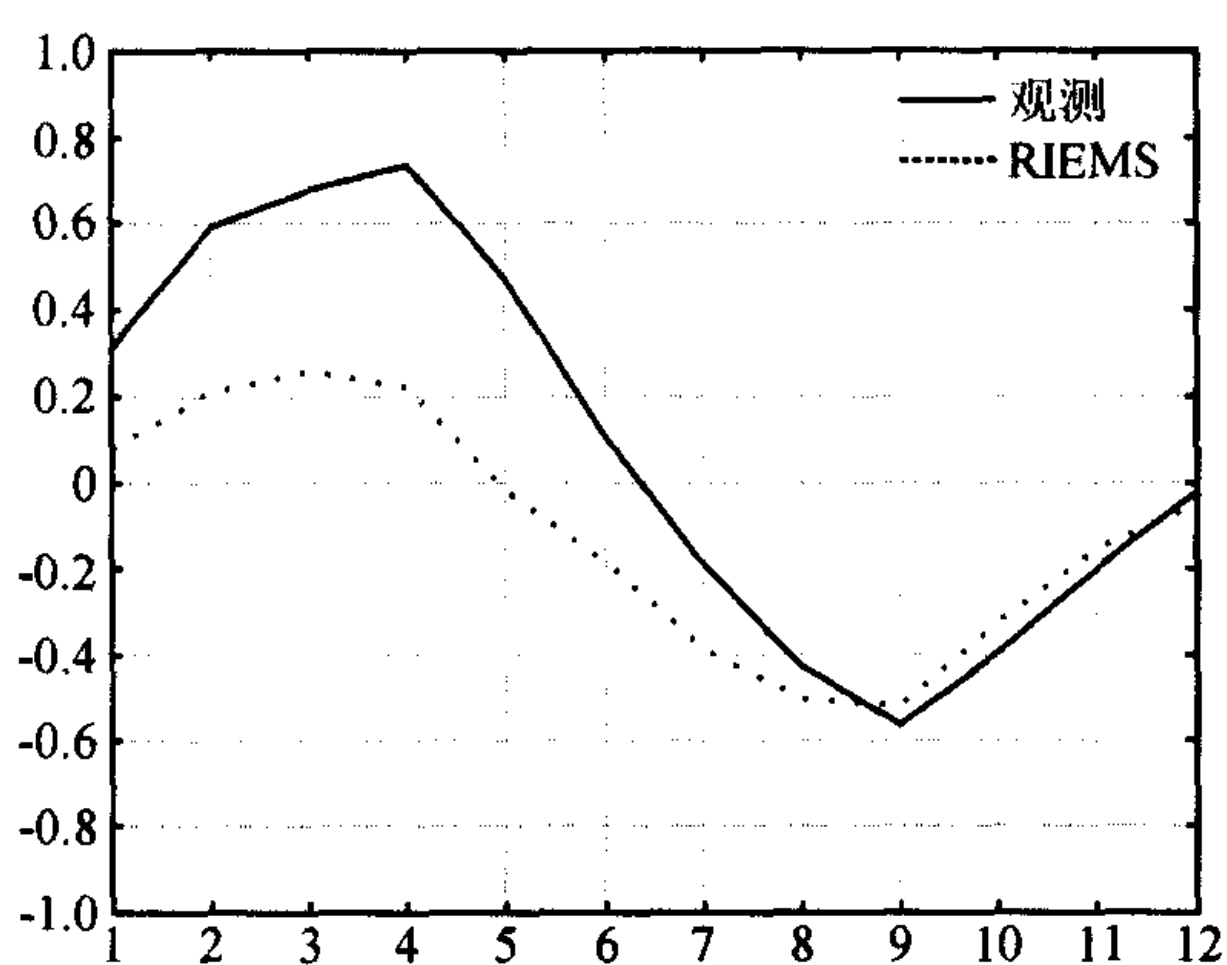


图6 降水作 EOF 分析的第 2 特征向量对应的时间序列

采用第 2 种方案时, 观测降水前 4 个主分量的解释方差占总方差的 42.91%, 而模式模拟占总方差 50.2%。观测的第 1 主分量体现了东亚地区降水具有相同的变化趋势; 第 2 主分量的主要空间分布特征是: 南旱北涝或北旱南涝, 即以 28°N 为界, 南北两边变化趋势相反; 第 3 个主分量的空间分布特征主要是将中国东部分为 3 个带状区域依次为 34°N 以北、 28°N 以南。当江淮旱 (涝) 时, 则其他两个带状区域涝 (旱); 第 4 个主分量的空间分布特征主要是以 30°N 为界

呈现相反趋势, 呈东南-西北向, 并且由东南向西北递增。对比模式的结果, 模式第 1 主分量与观测第 1 主分量较相似, 即东亚地区降水具有相同的变化趋势; 第 2 主分量与观测较相似, 体现南旱北涝或北涝南旱的空间分布特征, 只是模式模拟分界线较观测偏南大约 1° ; 第 3 主分量与观测第 4 主分量较为相似, 但分界线较观测明显偏北 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$, 同时呈现西南-东北向, 而不是东南-西北向; 第 4 主分量与观测的第 3 主分量较为相似, 但整个带明显南移, 大约为 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 。从观测和模拟的第 1 主分量和第 2 主分量来看, RIEMS 模式基本上能够模拟出东亚地区降水的年际变率, 但模式模拟分界线的位置较观测偏南。

经过上面分析可以看出, RIEMS 模式能够大致模拟出降水多年平均的空间分布和季节变化, 同时对降水年际变率模拟有一定能力。

5 结论

通过采用经验正交函数分析方法分析和比较模式模拟及观测的气候主分量时空特

征, 可以得出以下结论:

(1) RIEMS 模式能够较好地模拟出地面气温平均气候态的空间特征和季节变化, 同时能够模拟出地面气温年际变率的主要空间特征。

(2) RIEMS 模式能够较好地模拟出降水的空间分布以及降水的季节变化特征, 同时能够抓住观测降水年际变率。

参 考 文 献

- 1 Groth, S. L., and M. C. MacCracken, The use of general circulation models to predict regional climate change, *J. Climate*, 1991, **4**, 286~303.
- 2 Diskinson, R. E., M. Errico, F. Giorgi, and G. T. Bates, A regional climate model for the western U. S. A., *Climate Change*, 1989, **15**, 383~422.
- 3 Giorgi, F., and G. T. Bates, The climatological skill of a regional model over complex terrain, *Mon. Wea. Rev.*, 1989, **117**, 2325~2347.
- 4 符淙斌、魏和林、陈明等, 区域气候模式对中国东部季风雨带改变的模拟, *大气科学*, 1998, **22**, 522~534.
- 5 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), 246~254.
- 6 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拟研究*, 赵宗慈主编, 北京: 气象出版社, 1996, 106~120.
- 7 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.
- 8 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) 116~122.
- 9 郑维忠、苏炳凯、潘益龙、符淙斌, 中尺度大气模式用于我国东部区域气候模式的长期积分试验, *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, 1996, 242~247.
- 10 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季风降水影响研究, *大气科学*, 1999, **23** (5), 522~532.
- 11 Xiong Zhe, Wang shuyu, Zeng Zhaomei, and Fu Congbin, Analysis of simulated heavy rain over the Yangtze River valley during 11–30 June 1998 using RIEMS, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20** (5), 815~824.
- 12 Wei Helin, Fu Congbin, and Wang Weichyung, the effect of lateral boundary treatment of regional climate model on the East Asian summer monsoon rainfall simulation, *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1998, **22** (3), 231~243.
- 13 Wei Helin, and Wang Weichyung, A regional climate model simulation of summer monsoon over East Asia: A case study of 1991 flood in Yangtze-Huaihe valley, *Advances in Atmospheric Sciences*, 1998, **15** (4), 489~509.
- 14 Gibson J. K., P. Kallberg, S. Uppala et al., ERA description, ECMWF Reanalysis Project Report Series1, ECMWF, Reading, 1997, 66pp.
- 15 Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins et al., The NCEPNCAR 40-year Reanalysis Project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**, 437~471.
- 16 Fu Congbin, Wei Helin, and Qian Yun, Documentation on Regional Integrated Environmental Model System (RIEMS, Version I), TEACOM Science Report, No. 1, START Regional Committee for Temperate East Asia, Beijing, China, 2000, 36pp
- 17 Dickinson, R. E., P. J. Kennedy, A. Henderson-sellers, and M. Wilson, Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model. Tech. Note, NCAR/TN-275+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 1986, 69pp.
- 18 Xie, P., and P. A. Arkin, A 17-year monthly analysis based on gauge observation, satellite estimate and nu-

merical model output, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **78**, 2539~2558

19 黄嘉佑编著, 气象统计分析与预报方法, 北京: 气象出版社, 1990.

Evolutionary Character of Climatology over East Asia by RIEMS

Xiong Zhe

(*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*)

Abstract RIEMS' ability to simulate over East Asia climate is examined by using continue 10-year (from January 1987 to December 1996) integrated results. The EOF analysis is applied for subtracting the main component of both the model climate and observed climate of East Asia to examine the capacity of RIEMS. The results show that: (1) RIEMS can well capture the regional scale patterns, and annual variation and inter-annual variability of the multi-year mean climate of temperature over East Asia; (2) Although capacity of RIEMS to temperature is better than that of precipitation, RIEMS can reproduce pattern, and annual variation and inter-annual variability of precipitation over East Asia. Maximum center of simulated annual precipitation shifts northward.

Key words: regional climate model; empirical orthogonal function; evolutionary character