

仅引入质量守恒律的 T63 模式对全球大气环流和中国气候的模拟*

高学杰¹⁾ 周广庆²⁾ 陈嘉滨²⁾

1) (中国气象局国家气候中心, 北京 100081)

2) (中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要 对引入参考大气和质量守恒律的 T63 谱模式 10 年气候积分的结果进行了分析。结果表明, 模式对全球大气环流有较好的模拟效果, 对中国地区地面气温和中国东部地区的降水也有一定的模拟能力, 其中对气温的模拟效果好于降水。模拟存在着一些误差, 对地面气温, 主要是模拟的温度场系统性偏低, 不能模拟出小地形波动引起的温度变化; 对降水的模拟, 为在我国中西部模拟出了一个大的虚假中心。

关键词: 谱模式; 参考大气; 质量守恒; 气候模拟

1 引言

我国国家气候中心谱模式 T63/NCC, 是在国家气象中心 T63 中期数值预报模式基础上发展而来。直接使用国家气象中心 T63 模式进行气候积分, 由于大气模式质量不守恒, 会导致严重的气候漂移和计算不稳定^[1]。所以由此中期天气预报模式向气候模式发展的第一步, 是引入参考大气和质量守恒方案, 以消除这种现象^[2~5]。

为考察模式在引入参考大气和质量守恒方案后能够进行稳定积分的情况下对气候的模拟能力, 我们对使用气候海温模式 10 年气候积分试验结果进行了分析。限于篇幅, 文中对全球环流场的分析集中在 500 hPa, 对中国气候模拟能力集中在地面气温和降水两个要素上。

2 模式对 500 hPa 高度场的模拟

一般的大气谱模式由于使用地面气压对数 $\ln p_s$ 作为预报变量, 使得地面气压倾向方程在全球积分不为零, 从而导致大气总质量不守恒。在原始的 T63 模式中, 如图 1 中虚线所示, 当模式使用气候海温进行 10 年积分时, 由于其总质量不守恒, 导致全球平均 500 hPa 高度场出现了单调上升的误差。

将地面气压 p_s 本身作为一个预报变量, 地面气压倾向方程在全球上积分为零, 能

2002-07-18 收到, 2003-06-09 收到再改稿

* 国家杰出青年基金项目 4012501444、中国科学院知识创新工程重大项目 KZCX1-SW-01-16 及中国气象局 IPCC 专项经费共同资助

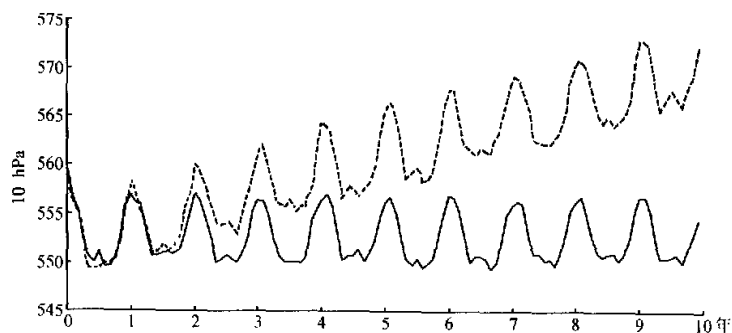


图1 质量守恒方案使用前(虚线)、后(实线)模式10年积分全球500 hPa高度场的变化

够保持大气总质量守恒;同时为克服由此引起的气压梯度力计算的混淆误差,引进了参考大气谱模式计算格式^[2~5]。图1中实线即给出采用此方案后模式10年积分的结果,可见原高度场单调上升的误差得到了明显克服。

由于原始T63模式存在的系统性计算误差(如上述高度场和温度场的不断增加等),对它的结果不再进行分析。以下主要对采用质量守恒方案后模式的10年积分结果进行简要介绍。

以1979~1995年17年的NCEP/NCAR再分析资料作为实况场,将模式模拟的500 hPa月平均高度场与之进行了对比分析。首先计算得到两者间的相关系数(表1),可以看出,各月模式模拟与实况的相关系数一般都在0.99左右,全年平均值达到0.992,表明模式对全球环流场有较好的模拟能力。

表1 T63/NCC模式模拟的500 hPa全球环流与实况的相关系数

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
相关系数	0.985	0.985	0.987	0.990	0.993	0.995	0.996	0.996	0.995	0.995	0.992	0.990

以冬天1月和夏天7月为例,对模式的模拟进行简要分析。图2a、b中分别给出1月份500 hPa高度场的实况和模式的模拟。由实况和模拟的对比,可见模式对北半球的主要天气系统,如东亚大槽、北美大槽、欧洲东部槽及位于阿拉斯加、欧洲西岸和青藏高原北部的脊等均有较好的模拟;对低纬度地区的副热带高压等也有一定的模拟能力;同时也较好地描述了南半球较平直的环流。模式对北半球冬季500 hPa高度场模拟的主要误差为东亚大槽位置偏东、偏北,强度也偏大;北美沿岸脊偏弱;南半球中纬度高度场有系统性偏高现象。

夏季7月500 hPa高度场实况(图3a),主要特点为北半球中高纬度等高线变稀,槽脊分布由3槽脊型变为4槽脊型;低纬度副热带地区的高压大大加强并北移,在北太平洋、北大西洋和非洲大陆西部形成闭合中心。模式基本上模拟(图3b)出了上述特点。模式对夏季北半球高度场模拟的误差,在高纬度和低纬度以数值偏低为主,在中纬度则一般偏高。具体在东亚及以东地区,模式模拟的中高纬地区东亚槽强度偏弱;副热带高压强度也不够,没有出现闭合的5880 m等值线。模式对东亚地区高度场模拟的误差相应会使其对中国气候要素(如气温、降水)的模拟产生一定偏差。

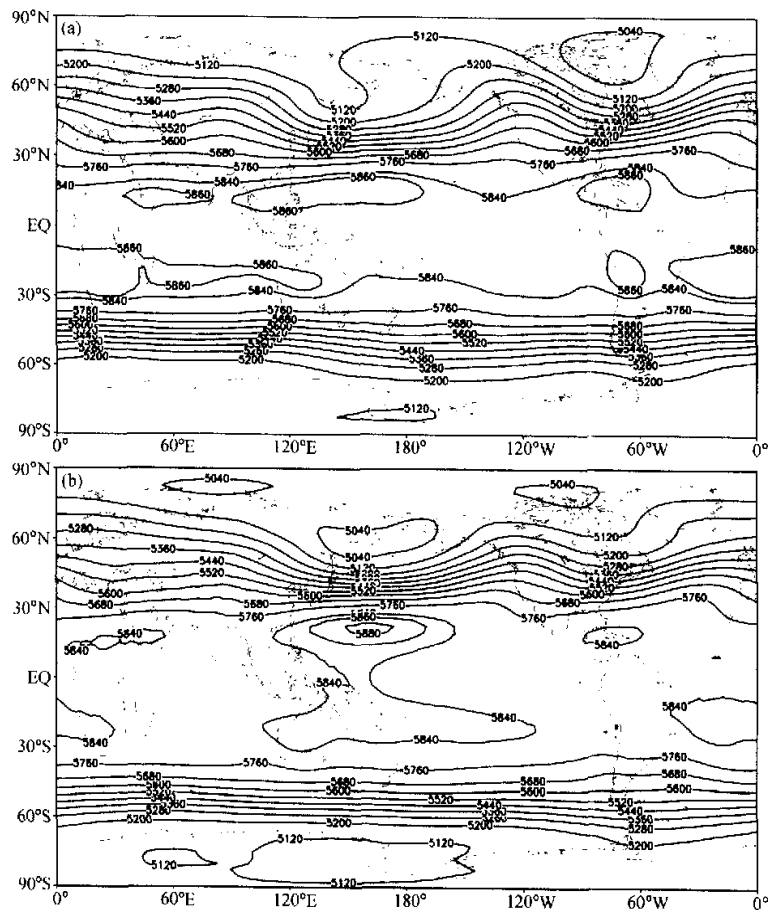


图2 1月500 hPa高度场(单位:m)
(a) 实况; (b) 模拟

3 模式对中国地区地面气温的模拟

取中国160个标准站1956~1990年35年观测资料的平均作为中国当代气候状况。将模式地面气温场和降水场10年积分的平均结果插值到上述站点上,与实况进行比较。

计算得到模式模拟的中国1~12月各月地面气温和实况场的相关系数如表2。可以看出,模式对我国地面气温的模拟效果较好,各月模拟与实况的相关系数,在冬季的12月、1月,达到0.90以上;夏季模式模拟的结果稍差,其中处于季节转换期的6月相关系数仅为0.36,是全年中最低的。

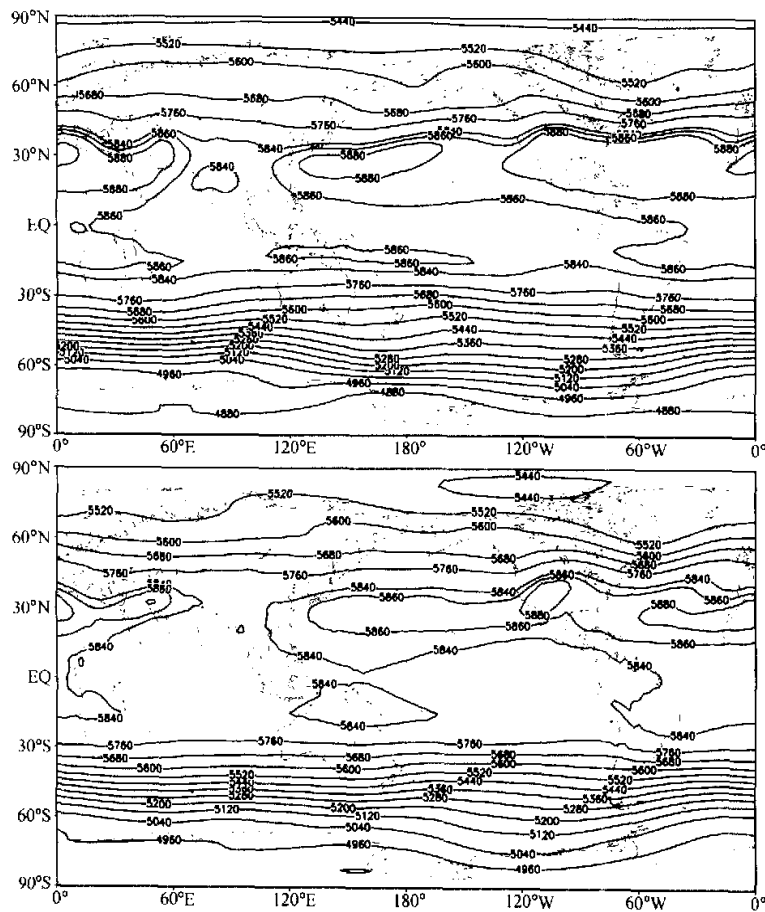


图3 7月500 hPa高度场(单位:m)
(a) 实况;(b) 的模拟

表2 T63/NCC模式模拟的中国区域地面气温与实况的相关系数

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
相关系数	0.94	0.93	0.90	0.81	0.68	0.35	0.57	0.67	0.76	0.87	0.90	0.92

模式模拟的年平均中国地面气温与实况的相关系数为0.85。徐影等^[6]对最近IPCC提供的5个全球环流模式(ECHAM4、HADCM2、GFDL-R15、CGCM1和CSIRO-MK2)对东亚近30年气候的模拟情况进行了分析,这5个模式在只考虑温室气体作用下,对东亚年平均气温模拟的相关系数分别为0.93、0.94、0.87、0.89和0.90。从相关系数看出,此版本T63模式对中国气温的模拟与世界先进模式相比差距不是很大。

图4给出我国年平均温度的实况和模式模拟的值。从图4a和4b的比较可以看出,模式基本上模拟出了我国地面气温由南向北逐渐递减的变化;对位于黄河上游的低温

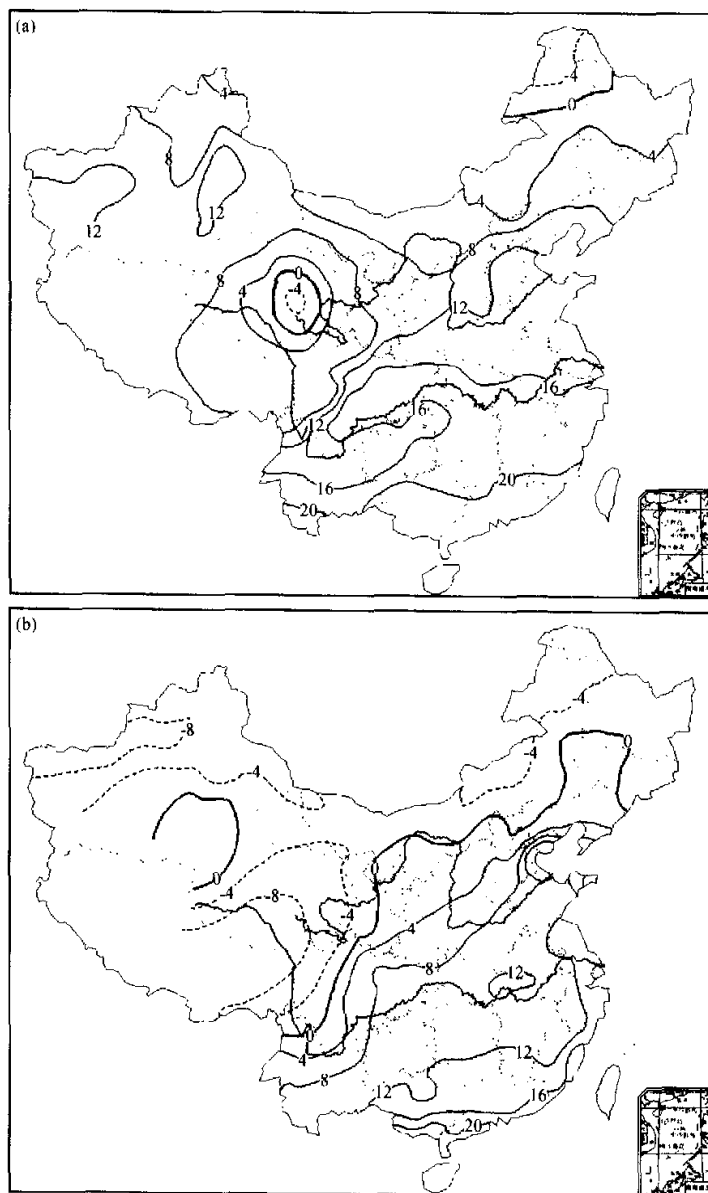


图4 中国年平均地面气温(单位: $^{\circ}\text{C}$)

(a) 实况; (b) 模拟

中心模拟的也较好。

但模式对我国气温的模拟,也存在一定的误差,其中较大的问题是模拟的气温数值呈系统性偏低趋势,偏低的幅度在东部一般为 $-4\sim-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间;西部更大一些,一般

在 -8°C 以上。全国各站点平均的偏差为 -6.7°C 。总体上看,模式模拟与实况偏差最大的地方位于地形波动较大的地区,如四川盆地、河西走廊、新疆(尤其是其中的吐鲁番)地区等,其形成的原因应该这是由于模式的分辨率不够,不能描述这些小尺度的地形波动而引起的。另外,测站一般主要位于地势较低的城市地带,地形和热岛效应同时都加大了这种误差。IPCC 几个模式也存在着模拟的数值普遍偏低以及这种偏低在中国西部更大的问题^[6]。

图 5 给出我国东部几个有代表性的单站多年平均各月的模拟与实况值,并进行一些简要分析。由图 5a 可以看出,模式对广州地面气温的模拟总体较好,模拟不足之处为冬季的温度较实况偏高,夏季偏低,但数值都不大,误差最大的 1 月份两者之差为 2.1°C 。上海气温的模拟(图 5b)在 5~6 月份有较大的误差,其他各月的模拟较好。模式模拟的北京地面气温(图 5c)变化趋势与实况非常一致,但模拟的数值在全年都系统性偏低。哈尔滨气温的模拟(图 5d),除夏季与实况相差不大外,其他月份存在的主要问题也是模拟值较实况偏低。

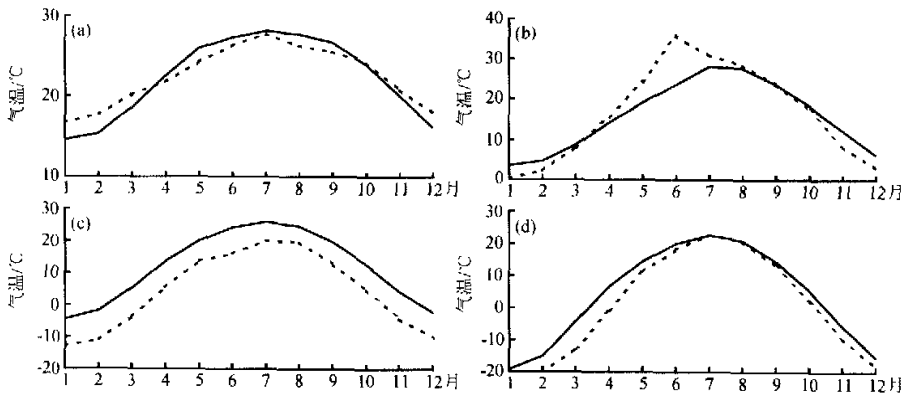


图 5 广州 (a)、上海 (b)、北京 (c)、哈尔滨 (d) 气温的实况与模拟

实线:观测值,虚线:模拟值

4 模式对中国地区降水的模拟

同样将模式模拟的降水场插值到中国 160 站上,并与这些站点 1956~1990 年的实况进行比较。

首先对模式模拟的年平均降水量与实况场进行了对比分析(图 6)。由图可以看出,模式对我国降水北方多、南方少及东部多、西部少的基本特点有较好的模拟;但与实况相比也还有较大的误差,较明显的是模式在我国中西部地区、青藏高原东侧模拟出了一个虚假的大降水区,其中心位于甘肃南部至四川北部地区。类似现象在其他许多 GCM 的模拟中也有出现,如文献 [6] 给出的 IPCC 5 个模式模拟的平均结果,在那一地区也出现了很大的降水区,与实况的差最大也达到近 1 000 mm 之多;但同时也有一些模式的结果没有这种现象^[7],其形成的原因有待于进一步探讨。另外模式对我国北

方和西北干旱少雨地区降水量的模拟还是偏大,这也是同类模式中普遍存在的问题^[6]。T63模式对中国年平均降水模拟与实况的相关系数为0.16,与上述IPCC 5个模式(分别为0.71、0.63、0.51、0.53和0.61)相比有较大差距。

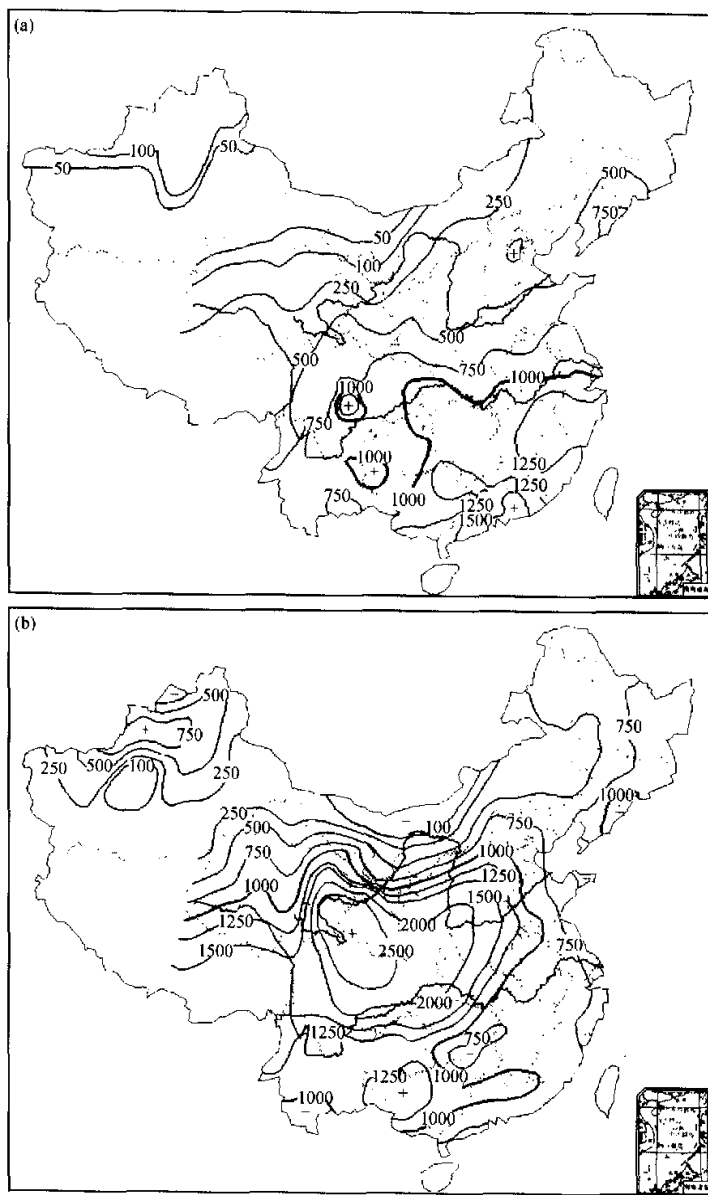


图6 中国年平均降水(单位: mm)

(a) 实况; (b) 模拟

给出模式模拟的我国 1~12 月各月降水与同期实况的相关系数如表 3。可以看出, 与对地面气温的模拟相比, 模式对我国降水的模拟较温度差很多。其中相关系数较高的月为 1 月和 7~9 月, 数值一般在 0.30 以上; 其次为 2 月和 12 月, 数值在 0.20 左右。相关系数最低的为 3 月、6 月和 11 月, 数值在 -0.10 至 0.00 左右, 这些月一般处于季节转换阶段, 表明模式对东亚季风区季节转换的模拟有一定的偏差。

表 3 T63/NCC 模式模拟的中国区域降水与实况的相关系数

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
相关系数	0.38	0.22	0.08	0.12	0.08	-0.04	0.32	0.34	0.38	0.13	-0.13	0.20

但如果仅考察中国东部地区, 模式对我国典型的季风降水特征(明显的季节性迁移等)还是具有一定模拟能力的, 图 7 给出我国东部几个代表性测站各月的模拟和实况。由图 7a、b 可以看出, 模式对上海和广州地区降水的模拟, 总体来说数值偏低, 但从冬季到夏季的季节变化还是能够模拟出来的。两者模拟与实况的相关系数分别为 0.69 和 0.50。同样模式基本模拟出了北京和哈尔滨(图 7c、d)降水的季节变化。模式对北京地区降水模拟的误差, 具体为春季和 10 月份降水有些偏大; 对哈尔滨地区, 误差主要为 3~4 月降水模拟偏大。两者模拟与实况的相关系数分别为 0.90 和 0.65。

关于模式在我国中部模拟出一个虚假降水中心的问题, 我们对经向风场(风速的 v 分量)进行了简要分析, 试图对这种误差形成的部分原因进行一些初步探讨。我国降水主要是由于南方暖湿空气北上, 与北方南下的冷空气相遇形成的, v 风速场可以作为暖湿空气输送的代表。为避免地形影响及篇幅所限, 分析主要集中在夏季 7 月中高层 500 hPa 的情况上(图 8)。

图 8a 为实况场(1979~1995 平均的 NCEP/NCAR 再分析资料)。从图上可以看出, 实况中经向风的 0 风速线位于我国东北西部至西南地区一带, 大的南风区位于我国东部长江流域及以南地区; 0 风速线和强南风区的“轴线”均呈东北西南向, 基本对应了我国降水主要集中在东部及雨带呈东北—西南向的分布类型。

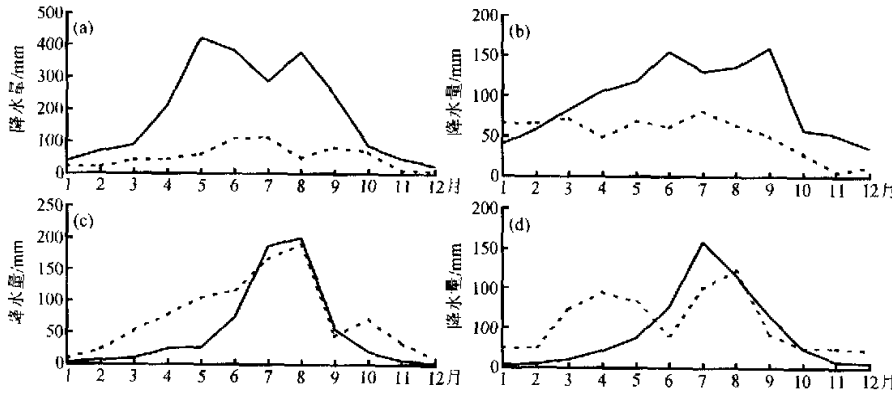


图 7 广州 (a)、上海 (b)、北京 (c)、哈尔滨 (d) 降水的实况与模拟
实线: 观测值, 虚线: 模拟值

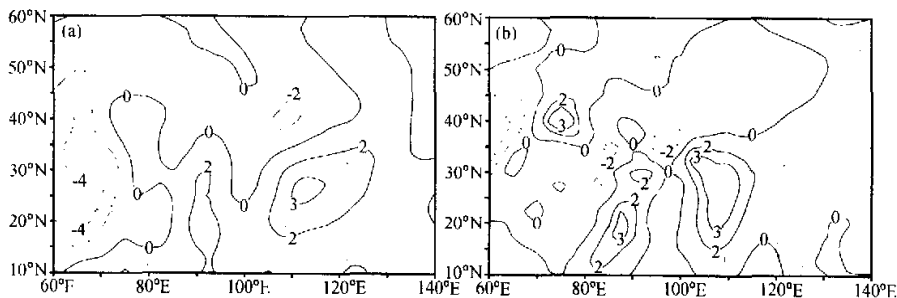


图8 东亚地区7月份500 hPa北风分量(单位: m s^{-1} , 向北为正值)

(a) 实况; (b) 模拟

而模式模拟的经向风的0风速线和强南风区位置则与实况有较大的不同(图8b);其中强南风区的轴线呈首先为南北向最后偏向西并指向我国中部的特点。与这种分布型相对应的暖湿气流输送,相应会在我国中部地区产生较大降水和虚假降水中心的现象。

上述误差同样存在于低层大气中。模式对经向风场模拟的这种偏差,一方面可能是模式对高原地形处理得不当(如因分辨率不够而不能准确描述地形等)引起的,因为在高原东侧的低层气流为由西南至东北向的绕流,地形处理不好会导致这种南风偏西偏北,致使那里的水汽输送加大,从而产生大的降水;另一方面,也可能是由于物理过程等方面的不足,导致模式对东亚槽和西太平洋副高位置及强度模拟的误差引起的。这有待于进一步的数值试验证明。

5 小结

(1) 国家气象中心 T63 中短期数值预报天气模式,在改造成气候模式 T63/NCC 过程中,第一步引进了参考大气和质量守恒方案后,消除了原模式高度场计算的误差,使得模式在长期积分中依然能够保持计算稳定。

(2) 对引进上述方案的模式 10 年平均气候态中 500 hPa 高度的分析表明,模式对全球和东亚地区的大尺度大气环流均有较好的模拟能力。

(3) 对模式模拟的中国地面气温和降水的分析结果表明,模式对中国区域气候具有一定的模拟能力,能够模拟出我国主要季风气候特征。但同时模式表现出对区域尺度气候模拟的一些不足。如模式模拟的中国地区地面气温场数值普遍偏低,同时由于模式分辨率不够,而不能模拟出由于小的地形起伏引起的温度波动;模式对中国降水的模拟也有一些偏差,主要表现为模式在我国中西部地区模拟出了一个虚假的降水中心,这个虚假降水中心可能是由于模式对南北风的模拟误差引起的。

(4) 东亚季风的数值模拟是气候模拟中一个非常复杂的问题,在这方面还需要进行大量的试验研究工作。具体到 T63 模式,仅引进参考大气和质量守恒方案是不够的,与世界其他先进水平的气候模式相比差距还很大,尤其是在对降水的模拟上。还需要对其物理过程、陆面过程等进行多方面的改造,使其成为一个较好的气候模式。本工作是这个系统性改造中的基础和第一步,因此只对试验结果中 500 hPa 高度场和中国地

区温度、降水的模拟进行了简要介绍, 没有涉及其他更多气候要素和物理量的分析。

(5) 以往的工作表明, 通过与高分辨率区域气候模式的嵌套, 往往能够改善全球环流模式对区域气候的模拟结果^[8, 9], 这也是未来工作中需要注意的。

参 考 文 献

- 1 Marchenhauer, B., The implementation of the semi-implicit scheme in cell-integrated semi Lagrangian models, Max Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 156, 1995.
- 2 曾庆存, 大气运动的特征参数和动力学方程, 气象学报, 1963, **33**, 472~483.
- 3 陈嘉滨、舒静君, 大气谱模式中质量守恒格式的研究, 大气科学, 1996, **20**, 169~179.
- 4 陈嘉滨、高学杰, 质量守恒律在国家气候中心气候谱模式中的应用, 大气科学, 2000, **5**, 608~614.
- 5 Chen Jiabin, Ji Liren, and Wu Wanli, Design and test of an improved scheme for global spectral model with reduced truncation error, *Adv. Atmos. Sci.*, 1987, **4**, 156~168.
- 6 徐影、丁一汇、赵宗慈, 近 30 年人类活动对东亚气候变化影响的检测与评估, 应用气象学报, 2002, **5**, 513~525.
- 7 Wang Huijun, Taroh Matsuno, and Yoshio Kurihara, Ensemble hindcast experiments for the flood period over China in 1998 by the use of CCSR/NIES atmospheric general circulation model, *J. Meteor. Soc. Japan*, 2000, **78** (4), 357~365.
- 8 Gao Xuejie, Zhao Zongci, Ding Yihui, Huang Ronghui, and Filippo Giorgi, Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model, *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **6**, 1224~1230.
- 9 石广玉、王喜红、张立盛等, 人类活动对气候影响的研究 II: 对东亚和中国气候变化的影响, 气候与环境研究, 2002, **7**, 255~266.

Simulation of Global Circulation and Climate in China by T63 Model with Mass Conservation Law

Gao Xuejie¹⁾, Zhou Guangqing²⁾, and Chen Jiabin²⁾

1) (National Climate Center, Beijing 100081)

2) (Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract 10-year simulation of T63 model driven by climate sea surface temperature with application of mass conservation law only was analyzed. It indicates that the model can simulate well the global scale atmospheric circulation. The model also reproduced the basic patterns of air surface temperature in China and precipitation in east part of China, with a better performane in simualting air surface temperature than precipitation. But the model tends to have a cold bias in simulating air surface temperature, and it can not describe the small air surface temperature perturbations caused by topography. As for precipitation, a big virtual center was simulated in mid-west part of China.

Key words: spectral model; reference atmosphere; mass conservation; climate simulation