

积云对流参数化方案对大气含水量及降水的影响

刘屹岷¹ 刘琨^{1, 2*} 吴国雄¹

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室所发展的高分辨率全球大气环流谱模式 SAMIL, 自从发展成 R42L26 新版本之后, 显示出对全球气候基本态的模拟能力, 但模式对流层低层以及热带地区整层偏干, 且对热带地区的降水模拟存在“双赤道辐合带”这一普遍误差, 在赤道地区以及北半球中纬度降水偏少, 而在拉丁美洲降水偏多。敏感性试验表明这些误差是相互联系的。通过将 700 hPa 以下的相对湿度趋近于“观测资料”的试验显示模拟的降水误差减小了。据此, 对 Tiedtke 积云对流参数化方案中的浅对流部分进行修改, 增加了浅对流的侧向混合的卷入以及卷入率, 并减小了对流方案中的云水-雨水的转换率, 将其耦合到模式中。积分结果表明, 修改后的方案明显改进了湿度和温度场的模拟, 对降水的模拟能力有了很大的提高, 基本消除了“双赤道辐合带”现象。

关键词 大气环流模式 积云对流参数化方案 质量通量方案 浅对流

文章编号 1006-9895 (2007) 06-1201-11

中图分类号 P426

文献标识码 A

The Impacts of the Cumulus Convective Parameterization on the Atmospheric Water-Content and Rainfall Simulation in SAMIL

LIU Yi-Min¹, LIU Kun^{1, 2}, and WU Guo-Xiong¹

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Science and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The new version of the State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics/Institute of Atmospheric Physics (LASG/IAP) spectral atmospheric model SAMIL_R42L26 has been developed and evaluated since 2005. The model shows its ability in representing the global climate, but it also suffers from some problems in simulating precipitation in the tropics, such as the double ITCZ in the central-western Pacific, less precipitation in the equator area and in the mid-latitudes of the Northern Hemisphere, and more in Latin America. These biases seem to result mainly from the treatment of subgrid scale convection, which is parameterized with the Tiedtke's mass flux scheme. A sensitivity experiment shows that these systematic errors are linked each other, and owe their existence mainly to the dry bias of the lower troposphere. In view of these results, several modifications are made to the Tiedtke's mass flux scheme used in SAMIL, and the results show apparent improvements in simulating the climate compared with the control experiment. In particular, the “double ITCZ” is eliminated and the modeled precipitation in the northern tropical area is more realistic. The modified scheme can also

收稿日期 2007-05-30, 2007-06-13 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403607, 中国科学院团队国际合作伙伴计划“气候系统模式研发及应用研究”, 国家自然科学基金资助项目 40475027、40221503、40575028、40523001、40675038

作者简介 刘屹岷, 女, 1965 年出生, 研究员, 理学博士, 主要从事天气、气候动力学研究。E-mail: lym@lasg.iap.ac.cn

* 通讯作者 E-mail: kliu@mail.iap.ac.cn

reduce both cold and dry biases in the middle troposphere. Results from the compared experiment show that the improvements in the model performance mainly result from the improved shallow convection due to the introduction of the modified convective parameterization.

Key words general circulation model, cumulus convective parameterization, mass flux convection scheme, shallow convection

1 引言

SAMIL-R42L26 是全球大气环流谱模式, 水平方向为菱形截断 42 波, 分辨率相当于 2.8125° (经度) $\times 1.66^\circ$ (纬度), 采用 $\sigma-p$ 混合垂直坐标系, 分为 26 层, 模式层顶达到 2.1941 hPa。模式引入了参考大气, 采用半隐式时间积分方案^[1, 2]。物理过程采用了新的 Edwards-Slingo 辐射方案^[3]、Slingo 诊断云方案^[4, 5], 同时引入了基于统计方法的层积云方案^[6, 7], 采用非局地的边界层参数化方案^[8], 还考虑了重力波拖曳^[9]。其中, 水汽方案选择 Tiedtke 质量通量型积云对流参数化方案, 并由宋晓良^[10]于 2005 年对其进行了改进, 主要包括确定云顶高度、组织化出流的改进等等。改进后的 SAMIL-R42L26 模式可以模拟出孟加拉湾、印度半岛以及南海主要的降水中心特征, 但是仍旧存在着一些问题。主要系统偏差为中低纬对流层低层偏干, 热带地区整层偏干偏冷, 且降水出现“双赤道辐合带”(双 ITCZ) 等。本文首先提供一个简单的敏感性试验, 从中发现这些误差是彼此相连的, 其中的根本性误差为对流层低层大气偏干。由此推断这些系统误差与模式中浅对流参数化方案设计不当有关。

浅对流活动对影响全球能量平衡的湿度场和温度场起重要的作用。位于副热带边界层(PBL)顶以及信风逆温层上的湿度通量是与浅积云对流中的饱和上升气流及其临近区域中自由大气干空气的补偿相联系的^[11, 12]。浅对流对湿度场和温度场平衡收支的影响也同样反映在其他要素场^[13~15]以及模式模拟中^[16~18]。这些研究结果表明, 浅对流的形成对整个温度场、湿度场所产生的影响会导致热带、副热带区域重要的热力以及动力反馈^[19, 20]。

SAMIL-R42L26 所采用的浅对流参数化过程包含在 Tiedtke^[21]积云对流参数化方案中, 该方案是基于质量通量的概念的总体云模型方案。尤其在 Nordeng^[22]对 Tiedtke 方案引入新的计算对流有效

位能的调整型闭合假设方法以后, Tiedtke 方案被很多大气环流模式所采用(如 ECHAM5.0、BAM3.0、ECWMF 等), 并且得到较好的模拟结果。该方案不考虑网格内的每一积云单体, 而是仅考虑与网格内所有的积云单体上升气流、下沉气流等效的一支总体的上升、下沉气流的作用, 即采用总体云模型来表示积云群的总体作用。方案包含贯穿性对流、浅对流以及中间对流三种对流类型, 同时考虑了积云对流对水平动量的垂直输送。该方案基于试验的假设和简化, 把质量夹卷分为云边界的湍流质量交换夹卷以及组织化的入流或出流这两种形式。Wang 等^[23~25]和 Li 等^[26]的研究表明, 模式大气的降水分布对 Tiedtke 积云对流参数化方案非常敏感。本研究即在他们研究基础上对 SAMIL-R42L26 的浅对流参数化进行修改, 以期改进对模式大气降水的模拟。

本文第 2 节将简单分析 SAMIL 模式存在的主要误差; 第 3 节主要介绍引入观测资料来对模式湿度场进行修正的敏感性试验 SH1 及其主要结果; 对修改后 Tiedtke 积云对流参数化方案以及模式运行的结果和反馈分析则在第 4 节进行介绍和分析, 第 5 节则给出全文的小结和讨论。

2 大气环流谱模式 SAMIL-R42L26 的主要系统误差

首先, 我们对 SAMIL-R42L26 模式连续积分 14 年, 然后取其 12 年平均进行分析, 定义为控制试验的结果。通过与观测资料和 ERA-40 再分析资料比较, 诊断降水场、湿度场和温度场的误差。

2.1 降水场

图 1b 给出了控制试验中(以下均称 TCTL)全球 DJF (12 月、1 月以及 2 月)的降水分布情况, 图中存在两条降水大值区, 分别位于海洋性大陆、西太平洋暖池区域附近以及 10°S 附近的南太平洋辐合带(SPCZ)。这两条降水大值区分别位于赤道南北两侧, 而在赤道上降水则相对较少, 这就是所谓

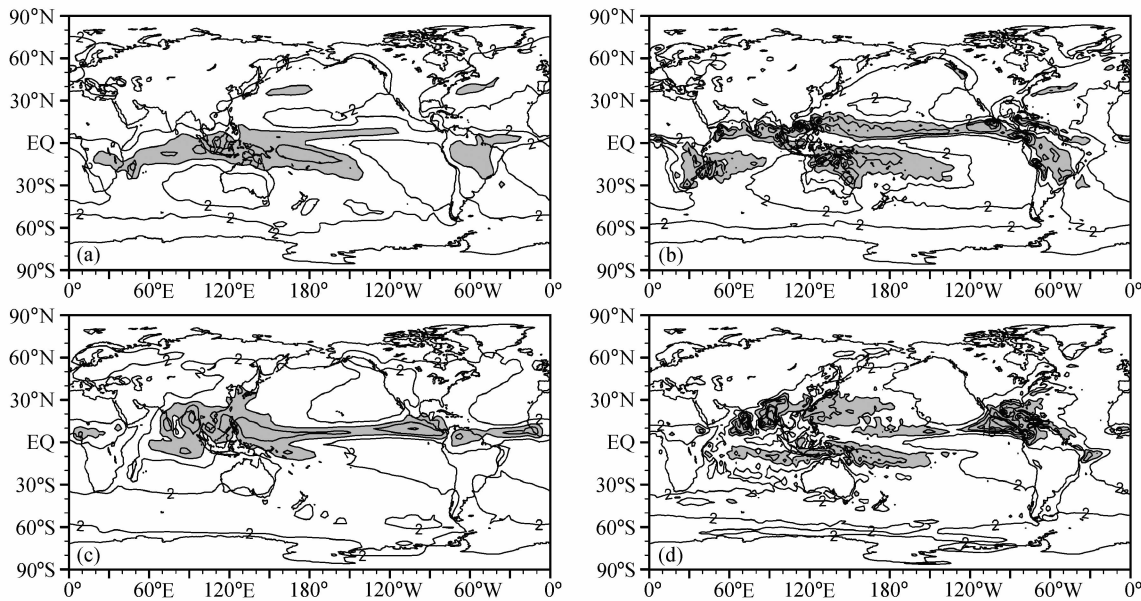


图 1 Xie-Arkin 观测资料 (a、c) 以及长期积分的控制试验 TCTL (b、d) 的降水分布图：(a、b) 北半球冬季；(c、d) 北半球夏季。等值线间隔：4 mm/d (10 mm/d 以下)、6 mm/d (10 mm/d 以上)；阴影：>6 mm/d

Fig. 1 The precipitation distributions derived from Xie-Arkin observation (a, c) and the control experiment TCTL of long-term integration (b, d); (a, b) Boreal winter (DJF); (c, d) boreal summer (JJA). Isoline intervals: 4 mm/d (below 10 mm/d), 6 mm/d (above 10 mm/d); shading: >6 mm/d

的“双赤道辐合带”现象。与作为观测资料的 Xie-Arkin 数据^[27](图 1a) 相比，其北支部分的强度偏强且位置偏北，位于 10°N 左右，而在赤道东、西太平洋上降水不到 2 mm/d。同时，在东亚、南亚、拉丁美洲以及非洲南部地区的降水模拟均偏多。控制试验在北半球夏季 JJA (6、7、8 月) 的全球降水分布 (图 1d) 同样存在“双赤道辐合带”的现象，与观测资料 (图 1c) 相比，整个赤道太平洋上的降水小于 2 mm/d，同时在印度半岛、孟加拉湾、拉丁美洲则有正的降水偏差。

2.2 湿度场和温度场

北半球冬季 (DJF) 控制试验与观测资料 ERA-40 再分析资料^[28](图 2a) 的相对湿度场差值的纬向平均分布图在图 2b 给出。在赤道地区整层均偏干 10% 以上，尤其在对流层低层 850 hPa 附近存在干偏差中心 (达到偏干 20% 以上)；而在南北半球的副热带以及中纬度地区，对流层低层也存在干误差达 10%~15% 左右；但到对流层中层 600 hPa 以上，转为偏湿达 10% 左右。图 2c、d 则分别给出北半球夏季再分析资料以及控制试验与再分析资料之差的纬向平均图。与图 2b 相比，北半球夏季出现的干偏差区域更大，几乎包含整个中低纬地区的对

流层低层，干偏差中心区域 (偏干 20% 以上) 扩展至整个北半球中低纬度区域；其在赤道上空的高度也从北半球冬季时的 850 hPa 延伸至 700 hPa 层上。在对流层中高层，除 0°~10°N 外，普遍存在湿偏差，中心达 15%。

控制试验与 ERA-40 再分析资料纬向平均的温度场之差在北半球冬季 (图 2e) 以及北半球夏季 (图 2f) 具有相似的特征：对流层低层存在正偏差，而在赤道地区的对流层中高层均存在 -4 K 左右的冷偏差中心。在南北半球的中高纬度地区则存在正偏差，尤其是在北半球夏季其中心值达到了 2 K。

3 敏感性试验

3.1 张弛试验设计

通过上述分析可知，在边界层内模式模拟的湿度偏干。为了消除这一误差，设计了试验 SH1，把 ERA-40 再分析资料中的比湿变量作为观测资料，记作 q_{obs} ，在 q 的预报方程右端加上一个张弛项 $[-(1/\tau)(q - q_{\text{obs}})]$ ：

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla q + w \frac{\partial q}{\partial z} = -(c - e) - \frac{1}{\tau}(q - q_{\text{obs}}), \tag{1}$$

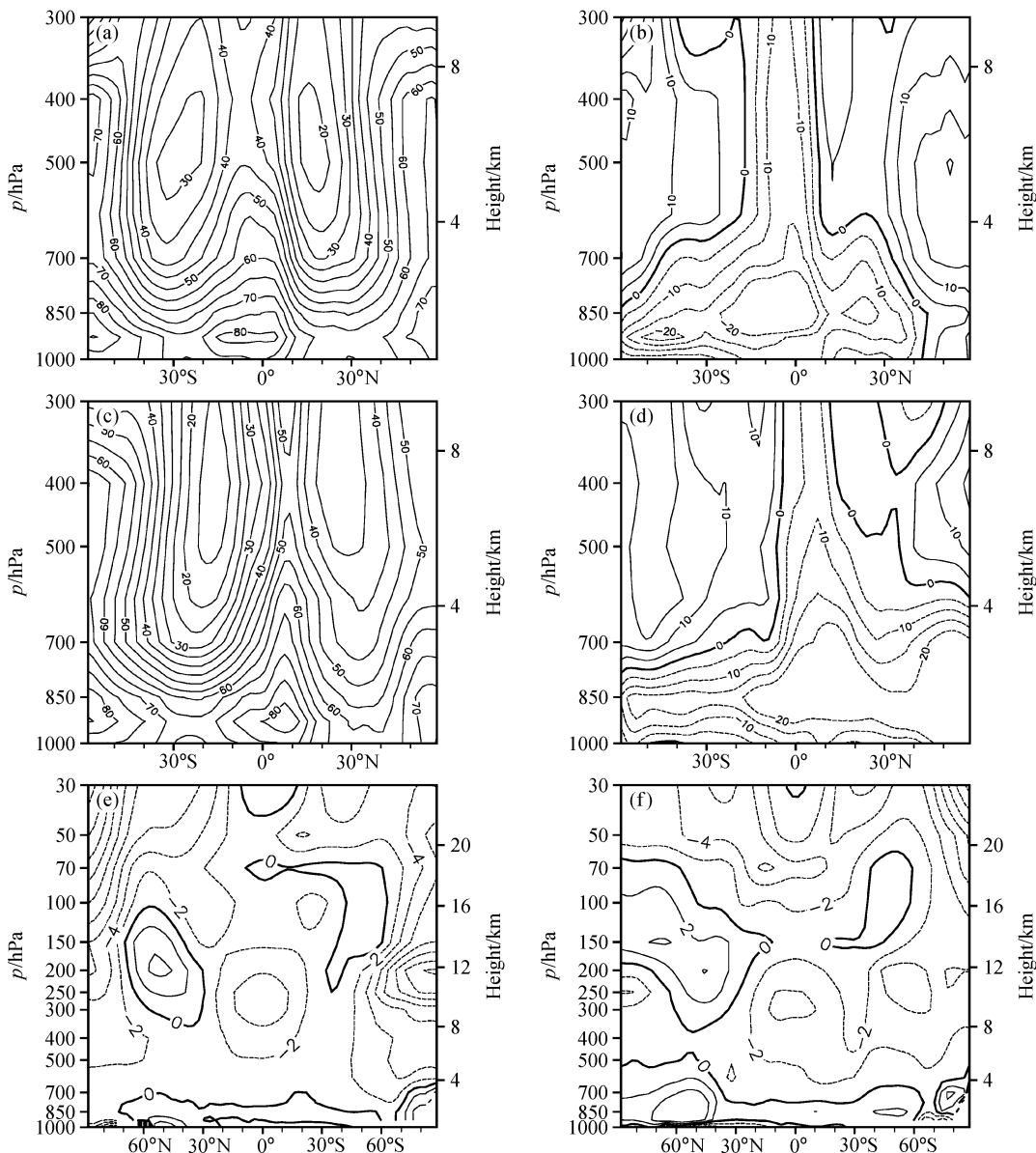


图2 ERA-40再分析资料(a、c)以及控制试验与ERA-40再分析资料差值(b、d、e、f)纬向平均场分布图:(a、b)北半球冬季的相对湿度场(%);(c、d)北半球夏季的相对湿度场(%);(e)北半球冬季的温度场;(f)北半球夏季的温度场。温度单位:K

Fig. 2 Distributions of the zonal mean fields derived from ERA-40 reanalysis data (a, c) and the differences between the zonal mean fields derived from the TCTL experiment and ERA-40 reanalysis data (b, d, e, f); Relative humidity (%) in DJF (a, b) and JJA (c, d); temperature (K) in DJF (e) and JJA (f)

其中, q 表示比湿, c 、 e 表示凝结、蒸发率, τ 为张弛系数。

考虑到模式中的湿度需要与温度相匹配, 所以最终选择相对湿度 r 这一变量引入模式中, 由于

$$q = q_{\text{sat}} r, \quad (2)$$

所以, 最终变化而得

$$r = r_{\text{obs}}|_t + \frac{q_{\text{sat}}|_{t-\Delta t}}{q_{\text{sat}}|_t} (r|_{t-\Delta t} - r_{\text{obs}}|_{t-\Delta t}) e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}, \quad (3)$$

其中, q_{sat} 代表饱和比湿, Δt 表示模式时间步长 (10 分钟)。经过调试, 发现 $\tau = 15$ 天的时候最佳。也就是说, 每隔 15 天就用对应时间的再分析资料强迫模式的相对湿度场, 来减小其误差。观测资料选用 ERA-40 再分析资料中 10 年平均 (1990~1999 年) 每 6 小时一次的相对湿度场。

SH1 试验运行了 3 年, 以下结果均是 3 年平均的结果。

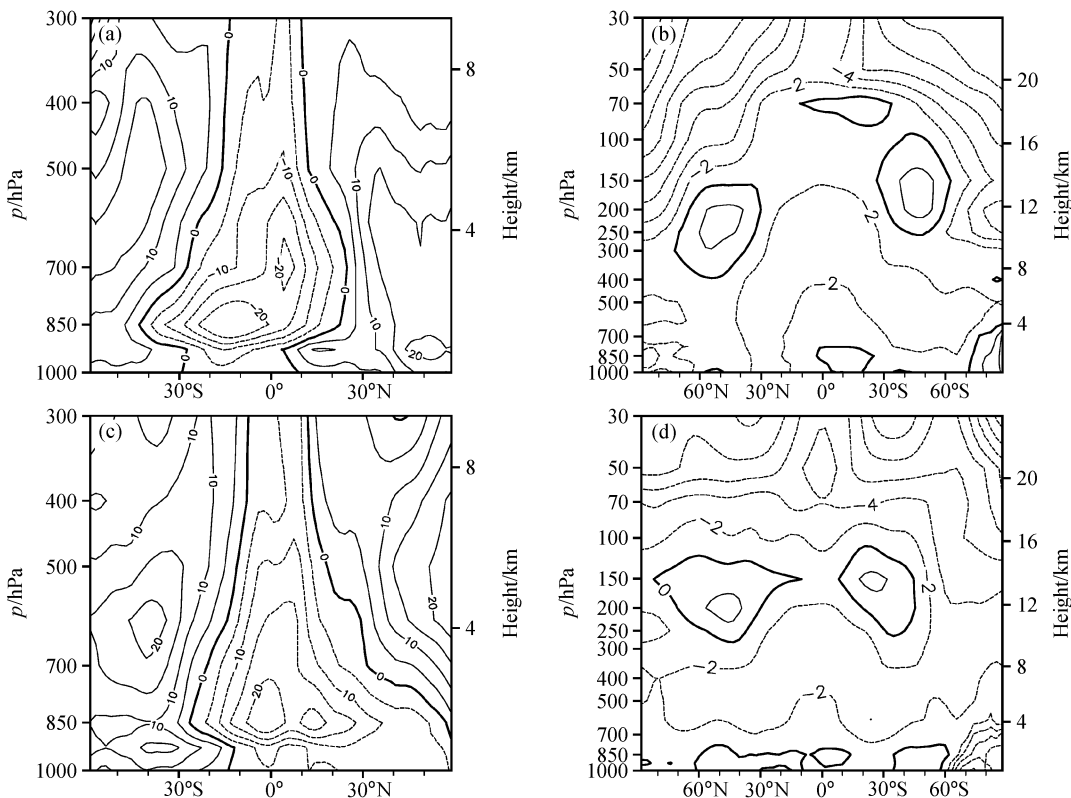


图3 敏感性试验 SH1 与 ERA-40 再分析资料差值的纬向平均场：北半球冬季 (a) 和夏季 (c) 相对湿度 (%)；北半球冬季 (b) 和夏季 (d) 温度 (单位：K)

Fig. 3 The differences between the zonal mean fields derived from the SH1 experiment and ERA-40 reanalysis data; Relative humidity (%) in DJF (a) and JJA (c); temperature (K) in DJF (b) and JJA (d)

3.2 SH1 试验结果

图 3a 给出 SH1 试验模拟的相对湿度的纬向平均在北半球冬季的分布。其中最明显的表现是在对流层低层偏干范围减少至 30°N~30°S 之间，比较控制试验中在赤道地区整层均大于 10% 的干偏差，SH1 模拟相应大于 10% 的干偏差区域仅存在于赤道地区 500 hPa 以下的对流层中低层。但在南北两半球的中高纬地区的对流层中上层，湿偏差较控制试验稍稍增大，达到 10%~15% 左右。在北半球夏季湿度场的改进更加明显 (图 3c)。控制试验中整个中低纬度均存在干偏差，而 SH1 仅存在于 25°S 以北的地区，且控制试验中位于对流层低层 850 hPa 附近的干偏差中心 (偏干 20% 以上) 也缩小至仅存在于赤道地区附近。

SH1 试验模拟的温度场纬向平均在北半球冬季、夏季的分布图分别由图 3b、d 中给出。相较控制试验，SH1 模拟的主要改进之处在于：700 hPa 以下的温度偏差区域减小，且中心数值在 2 K 以

下；在控制试验中赤道地区对流层中层存在的一 4 K 的冷偏差中心在 SH1 中减小至 -2 K。但冷偏差区域较控制试验偏大，这一点在北半球夏季中表现得较明显，几乎整个中低纬地区的对流层中层都存在 -2 K 的冷偏差。在南北半球中高纬地区，原控制试验中位于对流层高层的 2~4 K 的暖偏差强度在 SH1 试验中减小为 0~2 K。

以上结果表明，通过引入观测资料来强迫模式的相对湿度场能改善对流层低层的湿度场、温度场的模拟，进而改善整层的湿度场、温度场的分布状况。同时对降水的模拟也有很大程度的改进，尤其是消除了“双 ITCZ”现象 (图 4)。

4 修改后的 Tiedtke 积云对流参数化方案

对流层低层浅对流的发展可以把边界层的水汽输送到低对流层。本节将通过改进引进的 Tiedtke 对流参数化方案，对对流层低层的相对湿度 (RH)

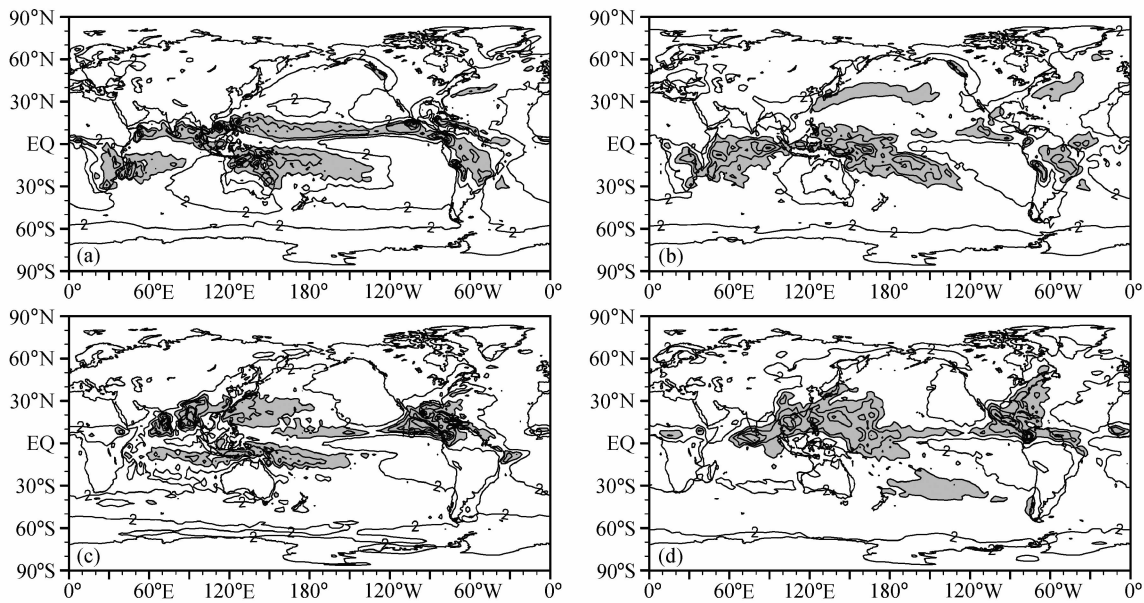


图 4 控制试验 (a、c) 以及 SH1 试验 (b、d) 降水分布图 (单位: mm/d): (a、b) 北半球冬季; (c、d) 北半球夏季。等值线间隔: 4 mm/d (10 mm/d 以下)、6 mm/d (10 mm/d 以上); 阴影: 大于 6 mm/d

Fig. 4 The precipitation distributions derived from the TCTL experiment (a, c) and the SH1 experiment (b, d) in DJF (a, b) and JJA (c, d). Isoline intervals: 4 mm/d (below 10 mm/d), 6 mm/d (above 10 mm/d); shading: >6 mm/d

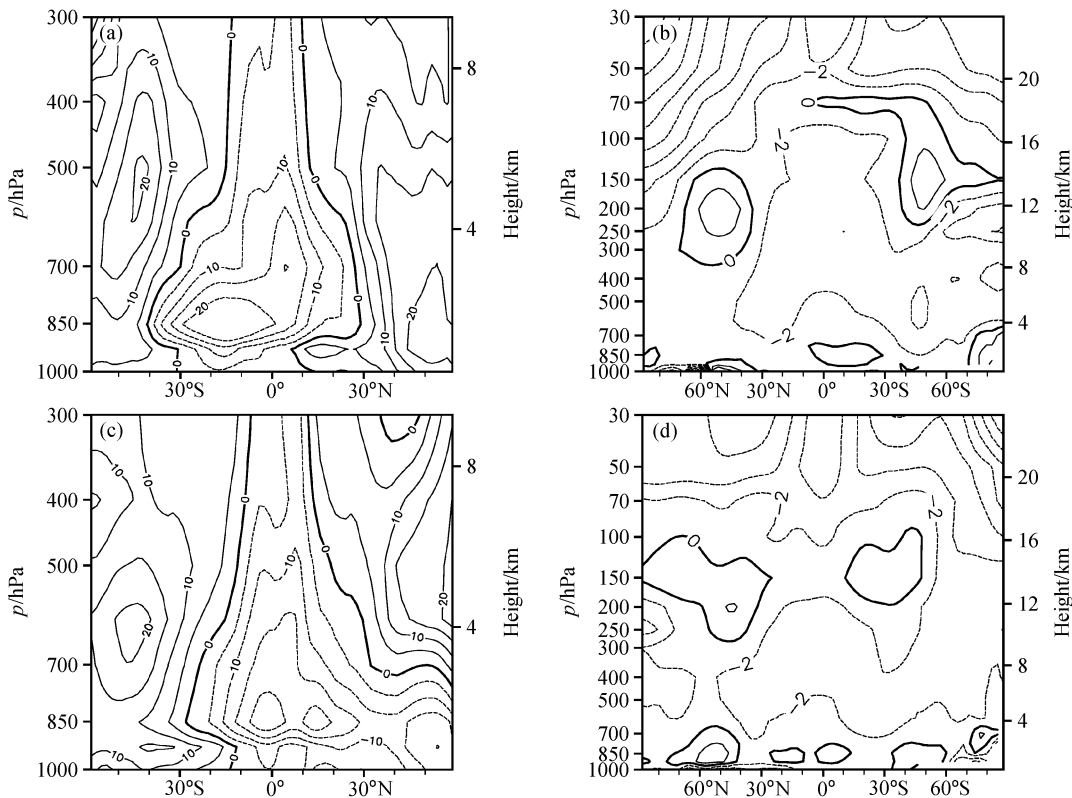


图 5 同图 3, 但为修改后的 Tiedtke 积云对流参数化方案与 ERA-40 再分析资料之差

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for the differences between the SH2 experiment and ERA-40 reanalysis data

进行修正,以期提高模式对温度场、湿度场的模拟,从而使得模式模拟的降水场更加真实。

4.1 试验设计

本文在 Wang 等^[23~25]和 Li 等^[26]的工作基础上,主要对 Tiedtke 积云对流方案做了两点修改:(1)把浅对流中平均的侧向混合的卷入以及卷出率从原来的 $3 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ 增加到 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$,这样更加接近文献[29]中大涡模拟的特征值;(2)把云水到雨水的转换率从 $6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 减小到 $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,从而增加大气中的含水量,降低降水率。

4.2 试验结果

4.2.1 温度场和湿度场的模拟

将采用修改后的 Tiedtke 积云对流参数化方案的 SAMIL-R42L26 模式运行 14 年,取后 12 年平均作为结果输出。以下把此试验称为 SH2。

与 SH1 试验的结果相似,SH2 试验明显地降低了控制试验湿度场的干偏差。从北半球冬季 RH 纬向平均场(图 5a)可以看出,在对流层低层的偏干误差范围同样减小至南北纬 30° 之间,且偏干 10% 的区域也降至 500 hPa 以下的对流层中层。北半球夏季的情况(图 5c)亦如此,干偏差中心(偏干大于 20% 的区域)减小至仅存在赤道地区上空对流层低层 850 hPa 附近。同时,北半球冬夏两季中高纬度地区的 RH 湿偏差范围以及强度稍有增大,从 15% 左右到 20% 左右。

温度场纬向平均分布在北半球冬季(图 5b)以及北半球夏季(图 5d)的模拟情况与 SH1 得到的结果类似。北半球冬季控制实验中在赤道地区上空对流层中高层的 -4 K 的冷偏差中心在 SH2 试验中减小为 -2 K ,但冷偏差所在范围有所扩展。类似的,控制实验中在北半球夏季的冷偏差中心的强度降低了,中高纬地区对流层中高层的 2 K 的暖偏差中心也减弱为 $0 \sim 2 \text{ K}$ 。

SH2 得到了与 SH1 类似的模拟结果,表明通过修改 Tiedtke 积云对流参数化方案,可以达到与 SH1 引入 RH 的观测资料来强迫模式模拟的湿度场一样的效果,使得对流层低层的湿度增大,对流层中高层的冷偏差减小。

4.2.2 大气含水量和降水的模拟

SH2 试验对 Tiedtke 积云对流参数化方案主要修改之处:减少了云水向雨水的转换率,增加了平均的侧向卷入以及卷出率。前者对湿度的模拟能

力,尤其针对作为主要水汽源的边界层内的湿度模拟能力有了很大的提高,而后者则是影响对流尺度的重要因子。

图 6 分别给出了 ERA-40 再分析资料、控制试验以及 SH2 试验在北半球冬季以及夏季的 850 hPa 相对湿度分布图。在南太平洋辐合带(SPCZ)以及赤道地区北侧,TCTL 模拟的 RH 明显偏干,为 50% 以下;SH2 试验中则提高到 60% 以上,减少了控制试验的误差。且控制试验中东南太平洋地区的干区过度西伸的现象也得到了抑制。北半球夏季的情况亦如此。850 hPa SH2 试验模拟的 RH 整体较控制试验提高了 10% 左右,且在降水大值区 SH2 试验模拟的 RH 均超过 60%,与控制试验相比更加接近 ERA-40 再分析资料。然而,冬、夏两季在 700 hPa 高度上,SH2 试验模拟与控制试验中相应地区模拟的 RH 场的量值是相类似的(图略)。换言之,由于在 SH2 的浅对流中减小了从云水到雨水的转换率,从而使更多的水分保留在对流层低层。因而在 $20^\circ \text{N} \sim 20^\circ \text{S}$ 之间与控制试验相比,SH2 试验中 850 hPa 高度以下较湿润,而 700 hPa 层则与控制试验相似,湿度较小,这样的高低层配置有利于湿对流不稳定的产生。

图 7 给出了控制试验以及 SH2 试验纬向平均的北半球冬夏两季的云量分布。在控制试验中,热带地区 925 hPa 至 400 hPa 附近区域几乎处于无云的状态,而在 SH2 试验的模拟结果则有很大的改善,尤其在北半球夏季,在热带地区 700 hPa 以下存在明显的云量分布。

低云量会影响其下大气的温度情况,控制试验中边界层的少云状态使得 700 hPa 以下的温度偏高,热带地区 850 hPa 层处于偏干且偏暖的状态,而在对流层中高层则偏干且偏冷;所以即使存在上升运动也仅仅是干对流。但在 SH2 试验中,在 850 hPa 高度以下则较湿且暖,而在对流层中层则保持偏干且偏冷,这样的高低空配置有利于形成对流性不稳定。增加侧向平均卷入及卷出率即意味着减小对流云体的特征尺度,在环境足够湿润达到饱和的情况下,很容易形成小的对流。

图 8 给出了控制试验、SH2 试验以及两者之差的垂直速度纬向平均分布图,阴影为 $\omega < 0$ 的区域。SH2 试验中由于近赤道夏半年对流不稳定增加,增强了上升运动,从而增强了 Hadley 环流,即在夏

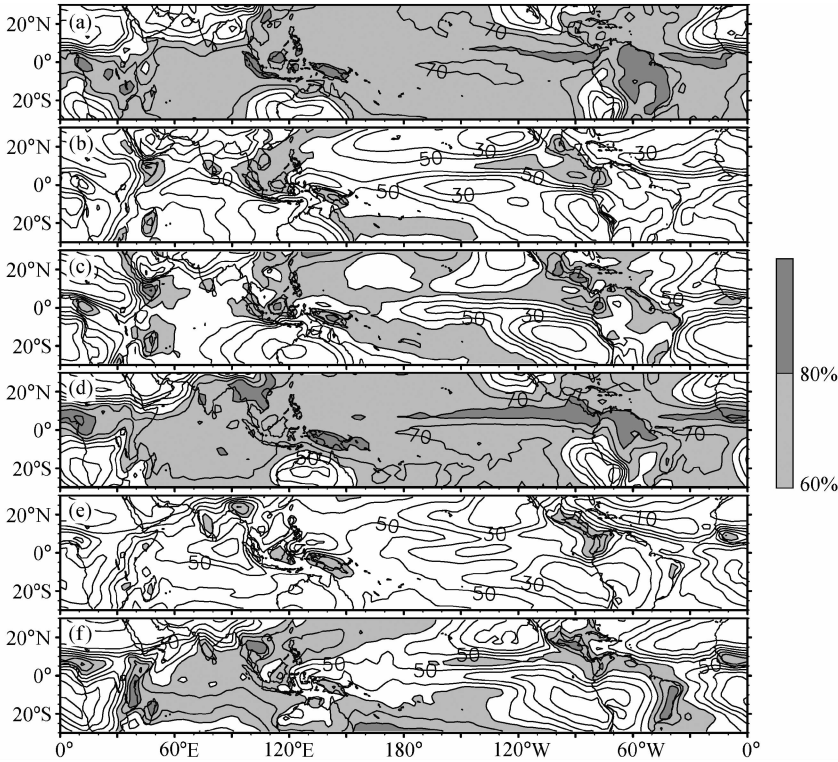


图 6 ERA-40 再分析资料 (a, d), 控制试验 (b, e) 以及 SH2 试验 (c, f) 的 850 hPa 层上相对湿度 (%) 分布图: (a, b, c) 北半球冬季; (d, e, f) 北半球夏季。等值线间隔: 10 %

Fig. 6 The 850 hPa relative humidity (%) distributions derived from ERA-40 reanalysis data (a, d), the TCTL experiment (b, e), the SH2 experiment (c, f); (a, b, c) DJF; (d, e, f) JJA. The isoline interval is 10 %

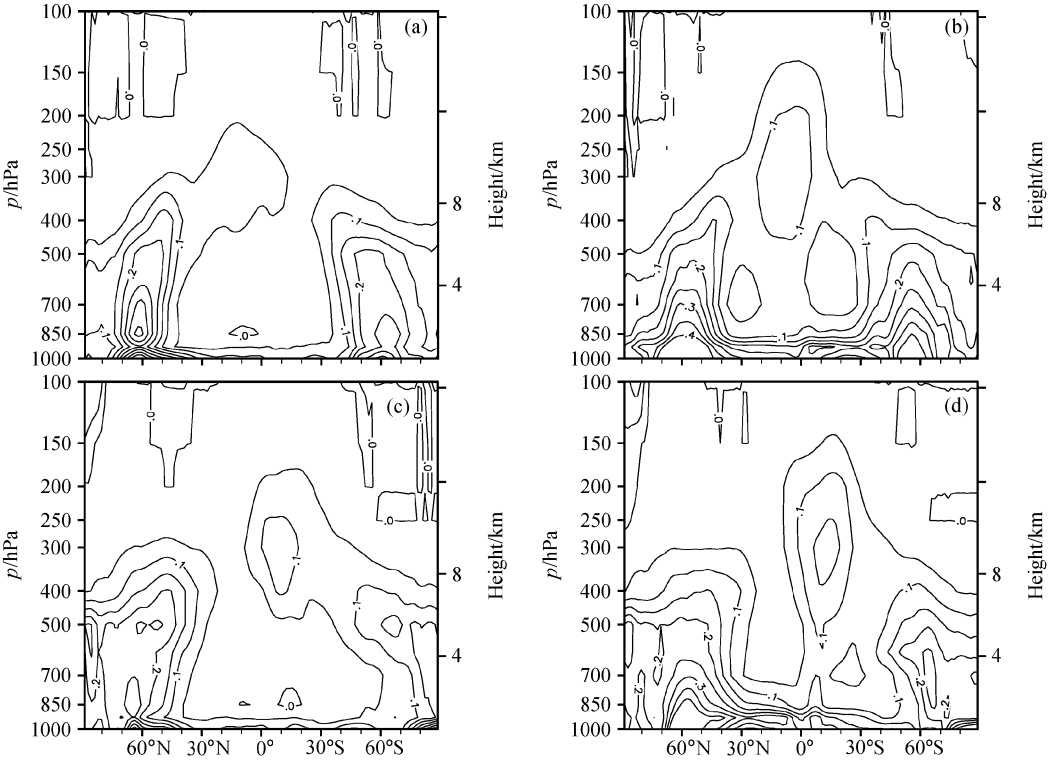


图 7 控制试验 (a, c) 和 SH2 试验 (b, d) 云量 (%) 的纬向平均分布图: (a, b) 北半球冬季; (c, d) 北半球夏季

Fig. 7 The zonal mean distributions of cloud fraction derived from the TCTL experiment (a, c), the SH2 experiment (b, d); (a, b) DJF; (c, d) JJA

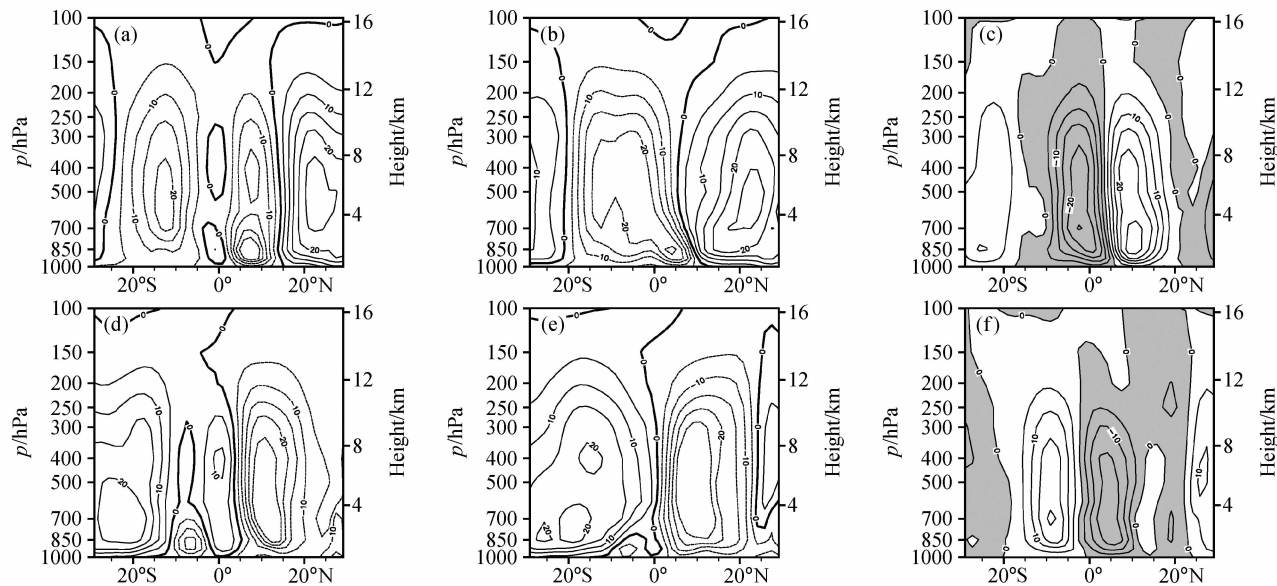


图 8 控制试验 (a、d) 和 SH2 试验 (b、e) 的垂直速度以及两者差值 (c、f) 的纬向平均分布图 (单位: hPa/d): (a、b、c) 北半球冬季; (d、e、f) 北半球夏季。阴影:<0

Fig. 8 The zonal mean distributions of vertical velocity derived from the TCTL experiment (a, d), the SH2 experiment (b, e), and their differences (c, f) (units: hPa/d): (a, b, c) DJF; (d, e, f) JJA. Shading: <0

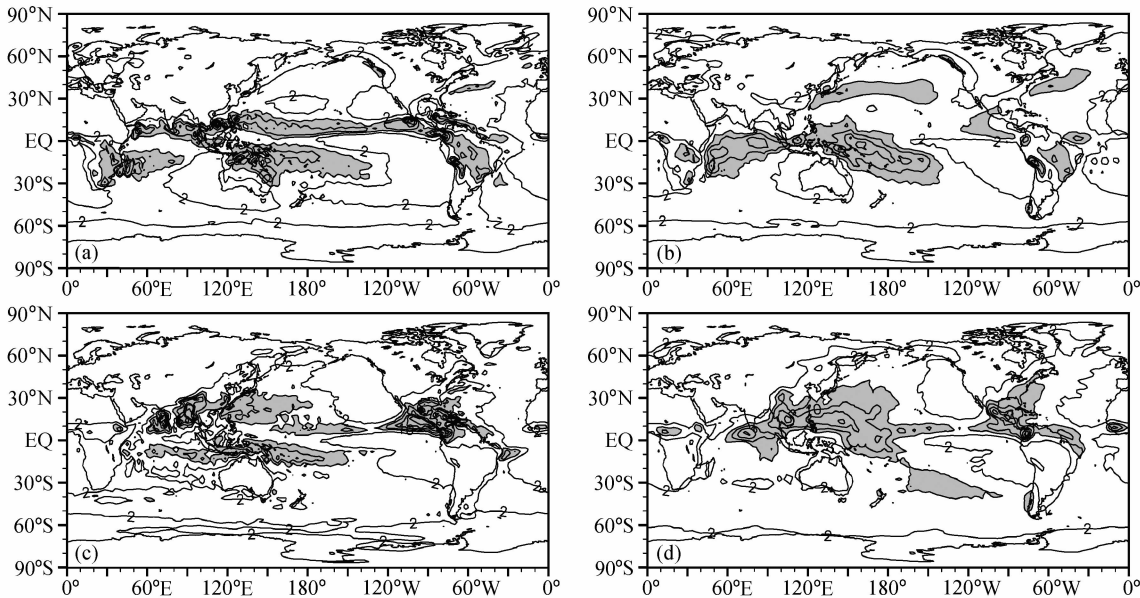


图 9 控制试验 (a、c) 以及 SH2 试验 (b、d) 的降水分布图: (a、b) 北半球冬季; (c、d) 北半球夏季。等值线间隔: 4 mm/d (10 mm/d 以下)、6 mm/d (10 mm/d 以上); 阴影: >6 mm/d

Fig. 9 The precipitation distributions derived from the TCTL experiment (a, c), the SH2 experiment (b, d): (a, b) DJF; (c, d) JJA. I-soline intervals: 4 mm/d (below 10 mm/d), 6 mm/d (above 10 mm/d); shading: >6 mm/d

半球上升运动的范围和强度比控制试验大,同时也相应增强了下沉运动的范围和强度。

图 9 给出了北半球冬、夏两季的控制试验以及 SH2 试验的降水场的模拟结果。在上述的温湿场以及垂直运动场的配置下,SH2 试验的降水模拟基

本消除了“双赤道辐合带”的现象,北半球冬季在 10°N 附近虚假的降水带已经不见,取而代之的是在赤道上以及南太平洋辐合带区域附近的降水大值区;北半球夏季赤道地区的降水从小于 2 mm/d 增至大于 8 mm/d。另外,在非洲南部、印度半岛、孟

加拉湾以及在拉丁美洲地区的降水正偏差有所减小。这些结果更接近观测分布(图 1a、c)。

虽然, SH2 试验模拟出的降水场与控制试验相比有较大提高, 但是同观测资料相比仍然存在一系列的误差(如图 9 所示), 北半球冬季降水在赤道地区仍然稍偏弱, 在北半球夏季在赤道地区中太平洋降水偏强且位置稍偏北, 所以, 需要进一步完善模式中的积云对流参数化方案以及相应的其他物理过程, 以期减小模式降水模拟的误差。

5 小结和讨论

虽然, SAMIL-R42L26 模式能够描述气候基本要素场的主要特征, 但是仍旧在降水的模拟方面存在一些问题, 比如“双赤道辐合带”现象, 而且在温度场、湿度场模拟方面, 亦存在对流层低层偏干偏暖, 而对流层高层偏干偏冷的现象。

本研究通过引入观测湿度场进行张弛试验, 使控制试验中的系统误差减小, 这表明合理模拟对流层的水汽含量是改善模式性能的一个关键。

在此基础上, 引入了修改的 Tiedtke 积云对流参数化方案到 SAMIL-R42L26 模式中: 其一是通过减小云水到雨水的转换率来保持大气中应有的湿度, 其二是通过增加浅对流侧向平均的卷入以及卷入率去影响对流的活动。结果表明, 这一新的方案明显改进了对湿度场的模拟, 进而减少了云量和温度场的模拟误差。

高低层温湿场配置的改善导致了对对流不稳定及模式垂直速度的模拟的改善。由于它们是影响降水模拟的重要因素, 由此通过修改积云对流参数化方案中浅对流的部分, 最终使得模式对降水的模拟有了显著的改进: 它基本消除了“双赤道辐合带”的现象, 使得赤道上的降水增多, 同时还减小了印度半岛、孟加拉湾以及非洲南部和拉丁美洲降水模拟的偏差, 这为我们改进东亚季风的模拟提供了有效的工具。

尽管如此, SH2 所模拟的降水场与观测相比仍然存在一系列的误差。还必须进一步改善物理过程参数化和模式的动力框架, 并进行海气耦合试验, 以进一步提高模式的模拟能力。

致谢 仅以此文献给陶诗言先生 90 寿辰。非常感谢夏威夷大学的刘平博士以及王玉清博士提供的 Tiedtke 参数化方案的源程序以及富有启发性的讨论。同时, 本文所用的 ERA-40 的再分析资料由

ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, <http://www.ecmwf.int>) 所提供, 在此一并表示感谢!

参考文献 (References)

- [1] Bonan G B. The land surface climatology of the NCAR land surface model coupled to the NCAR Community Climate Model. *J. Climate*, 1998, **11**: 1307~1326
- [2] 王在志, 吴国雄, 刘平, 等. 全球海-陆-气耦合模式大气模式分量的发展及其气候模拟性能 I: 水平分辨率的影响. 热带气象学报, 2005, **21**: 225~237
Wang Z Z, Wu G X, Liu P, et al. The development of GOALS/LASG AGCM and its global climatological features in climate simulation. I: Influence of horizontal resolution. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2005, **21**: 225~237
- [3] Edwards J M, Slingo A. Studies with a flexible new radiation code. I: Choosing a configuration for a large-scale model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1996, **122**: 689~719
- [4] Slingo J M. A cloud parameterization scheme derived from GATE data for use with a numerical model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1980, **106**: 747~770
- [5] Slingo J M. The development and verification of a cloud prediction scheme for the ECMWF model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1987, **113**: 899~927
- [6] 戴福山. 东太平洋低云对海气耦合模式中“双辐合带”的影响——基于 LASG FGCM-0 的分析研究. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2003. 102~118
Dai Fushan. Impacts of low-level cloud over the eastern Pacific on the “Double ITCZ” in an ocean-atmosphere coupled model—Diagnostic analyses based on LASG FGCM-0. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003. 102~118
- [7] Teixeira J, Hogan T F. Boundary layer clouds in a global atmospheric model: Simple cloud cover parameterizations. *J. Climate*, 2002, **15**: 1261~1276
- [8] 包庆, 刘屹岷, 周天军, 等. LASG/IAP 大气环流谱模式对陆面过程的敏感性试验. 大气科学, 2006, **30**: 1077~1090
Bao Qing, Liu Yimin, Zhou Tianjun, et al. The sensitivity of the spectral atmospheric general circulation model of LASG/IAP to the land process. *Chinese Journals of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30**: 1077~1090
- [9] Palmer T N, Shutts G J, Swinbank R. Alleviation of a systematic westerly bias in general circulation and numerical weather prediction models through an orographic gravity wave drag parameterization. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1986, **112**: 1001~1039
- [10] 宋晓良. 两种质量通量型积云参数化方案在气候模拟中的评估分析研究. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2005. 119~145

- Song Xiaoliang. The evaluation analysis of two kinds of mass-flux cumulus parameterizations in climate simulation. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005. 119~145
- [11] Riehl H, Yeh T C, Malkus J S, et al. The northeast trade of the Pacific Ocean. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1951, **83**: 21~29
- [12] Nitta T, Esbensen S. Heat and moisture budget analyses using BOMEX data. *Mon. Wea. Rev.*, 1974, **102**: 17~28
- [13] Holland J Z, Rasmusson E M. Measurements of atmospheric mass, energy and momentum budgets over a 500-kilometer square of tropical ocean. *Mon. Wea. Rev.*, 1973, **101**: 44~55
- [14] Albrecht B A. Parameterization of trade-cumulus cloud amount. *J. Atmos. Sci.*, 1981, **38**: 97~105
- [15] Raga G B, Jensen J B, Baker M B. Characteristics of cumulus band clouds off the coast of Hawaii. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**: 338~355
- [16] Siebesma A P, Cuijpers W M. Evaluation of parametric assumptions for shallow cumulus convection. *J. Atmos. Sci.*, 1995, **52**: 650~666
- [17] Stevens B, Ackerman A S, Albrecht B A, et al. Simulation of trade wind cumuli under a strong inversion. *J. Atmos. Sci.*, 2001, **58**: 1870~1891
- [18] Brown A R, Cederwall R T, Chlond A, et al. Larger-eddy simulation of the diurnal cycle of shallow cumulus convection over land. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2002, **128**: 1075~1093
- [19] Riehl H, Malkus J S. On the heat balance and maintenance of circulation in the trades. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1957, **77**: 598~626
- [20] Simpson J. Global circulation and tropical cloud activity. In: Theon J S, Matsuno T, Skata T, et al (Eds). The global role of tropical rainfall. A Deepak Publishing, Hampton, 1992. 77~92
- [21] Tiedtke M. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Mon. Wea. Rev.*, 1989, **117**: 1779~1800
- [22] Nordeng T E. Extended versions of the convective parameterization scheme at ECMWF and their impact on the mean and transient activity of the model in the tropics. Tech. Memo., 206, ECWMF, Reading, UK, 1994
- [23] Wang Y, Sen O L, Wang B. A highly resolved regional climate model (IPRC-RegCM) and its simulation of the 1998 severe precipitation event over China. Part I: Model description and verification of simulation. *J. Climate*, 2003, **16**: 1721~1738
- [24] Wang Y, Xie S-P, Xu H, et al. Regional model simulations of marine boundary layer clouds over the Southeast Pacific off South America. Part I: Control experiment. *Mon. Wea. Rev.*, 2004, **132**: 274~296
- [25] Wang Y, Xu H, Xie S-P. Regional model simulations of marine boundary layer clouds over the Southeast Pacific off South America. Part II: Sensitivity experiments. *Mon. Wea. Rev.*, 2004 **132**: 2650~2668
- [26] Li L-J, Wang B, Wang Y, et al. Improvements in climate simulation with modifications to the Tiedtke convective parameterization in the grid-point atmospheric model of IAP/LASG (GAMIL). *Adv. Atmos. Sci.*, 2007, **24**: 323~335
- [27] Xie P, Arkin P A. A 17-year monthly analysis based on gauge observation, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **78**: 2539~2558
- [28] Uppala S M, Källberg P W, Simmons A J, et al. The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2005, **131**: 2961~3012. doi:10.1256/qj.04.176
- [29] Siebesma A P, Holtslag A A M. Model impacts of entrainment and detrainment rates in shallow cumulus convection. *J. Atmos. Sci.*, 1996, **53**: 2354~2364