乐旭,王会军. 2009. CCM3/NCAR 的辐射方案在 IAP-AGCM 模式中的应用 [J]. 大气科学, 33 (1): 16-28. Yue Xu, Wang Huijun. 2009. The application of the CCM3/NCAR radiation scheme in IAP-AGCM [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (1): 16-28.

CCM3/NCAR 的辐射方案在 IAP-AGCM 模式中的应用

乐旭1,2 王会军1

1 中国科学院大气物理研究所竺可桢-南森国际研究中心,北京 100029 2 中国科学院研究生院,北京 100049

摘 要利用 NCAR 的 CCM3 (The Community Climate Model version 3) 辐射模块,对 IAP9L-AGCM 的辐射计 算方案进行了替换,并对改进的结果做了细致的评估。分析表明,新版本的模式在大多数辐射场的空间平均和分 布型的模拟上有了较为明显的改进,特别是较好地克服了原模式中陆面净辐射场的偏差。在此基础上,新版本计 算的大气温度普遍升高。伴随这种变化,模式中的海平面气压、地表温度、位势高度、风场、降水、比湿等物理量 都有了调整,但是变化并不明显,从而对模式的进一步发展和完善提出了新的要求。 关键词 IAP9L-AGCM 辐射方案 气候态

大键问 IAF9L-AGCM 猫别刀杀 气候态

文章编号 1006 - 9895 (2009) 01 - 0016 - 13 中图分类号 P435 文献标识码

The Application of the CCM3/NCAR Radiation Scheme in IAP-AGCM

YUE Xu1, 2 and WANG Huijun1

Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The old radiation scheme in IAP9L-AGCM is replaced by a new one from the CCM3/NCAR codes. And the effects of such modification are evaluated in detail. It shows that there are many improvements in the simulated radiation fields from the new version of IAP9L-AGCM, especially some net radiation fields at the surface. As a result, there is a prevalent enhancement of the atmospheric temperature in the new version. Other fields, such as sea level pressure, surface air temperature, geopotential height, wind field, precipitation, specific humidity and so on, show some corresponding changes, though the magnitudes are not large. The evaluation results put forward the requirement of a further improvement of the IAP9L-AGCM.

Key words IAP9L-AGCM, radiation scheme, climatology

1 引言

中国科学院大气物理研究所的 IAP9L-AGCM 是一个由 Zeng et al. (1989) 建立并发展起来的全

球格点模式 (Zhang et al., 1989; Zhang, 1990; Liang, 1996)。该模式水平分辨率为 $4^{\circ} \times 5^{\circ}$, 垂直 方向采用了 $\sigma - p$ 地形坐标, 共分 9 层, 模式顶为 10 hPa。毕训强 (1993) 改进和优化了模式代码,

А

收稿日期 2007-07-05, 2007-10-29 收修定稿

资助项目 国家重大基础研究规划项目 P317025400,国家自然科学基金资助项目 40631005,国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403705

作者简介 乐旭, 男, 1981年出生, 博士生, 主要从事气候数值模拟研究。E-mail: yuexu@mail. iap. ac. cn

使得模式模拟性能进一步提高,运算速度更快。在 此基础上,该模式被广泛应用于短期气候预测(郎 咸梅等,2004a,2004b)、年际年代际气候变化研究 (穆明权等,1999;李崇银等,2000)、气候系统相互 作用机制分析(屈述军等,2003;左瑞亭等,2004; 晏红明等,2007)以及古气候模拟(Wang,1999; Jiang et al.,2005)研究中,取得了丰富的成果。

IAP9L-AGCM 自 20 世纪 90 年代初推出以来, 经历了多个版本的改进和发展。Zhang et al. (2001) 将模式并行化,极大缩短了积分时间,提高 了计算效率。在动力框架方面,刘洪涛等(2002) 比较了三种常用的水汽方程差分方案,从而为 IAP9L-AGCM 选择了较好的一种。薛洪斌等 (2004)考察了垂直分辨率的提高对降水模拟的影 响,指出增加垂直分辨率改善了积云对流参数化, 从而能够更好地模拟对流性降水,但同时对于大尺 度降水的模拟能力降低。张凤等(2004)讨论了水 平分辨率的增加对于模式性能的影响,指出较高的 水平分辨率在改善模式气压场、降水场模拟能力的 同时,容易造成南极地区计算紊乱。在物理过程方 面,张凤(2005)和张凤等(2005)引入Fu-Liou短 波辐射方案,并细化了相关的物理过程,从而改进 了模式对于短波辐射和季风降水的模拟。

尽管 IAP9L-AGCM 有了许多改进和发展,与 国外同类模式相比,其更新的速度还是相对较慢 的。例如,美国 NCAR 的 CAM3 (The Community Atmosphere Model version 3)模式 (Collins et al., 2006; Hurrell et al., 2006),十几年中经历了 CCM0、CCM1、CCM2、CCM3、CAM2等版本的 演化,如今其物理过程参数化日臻完善,并成为当 前世界范围内比较通用的几个模式之一。因此,系 统地发展 IAP9L-AGCM 成为迫切的需要。本文将 从该模式的辐射部分入手,对相应部分做了较为全 面而有益的改进。

大气模式中的辐射部分是相当重要的。从物理 过程来讲,太阳辐射能量是大气运动的根源,辐射 过程描述的准确性,在很大程度上决定着气候模式 的模拟效果;从模式发展来讲,辐射部分的代码是 最为繁琐和细致的,它涉及到了大量的积分和参数 化计算,如云量、气体吸收发射率、地表反照率等, 因此不确定性较大;从模式计算的效率来讲,辐射 部分的运算比较耗时,有的甚至可以达到整个模式 计算时间的约三分之二(王鹏飞等,2006)。 IAP9L-AGCM的辐射计算方案主要来源于NCAR 的CCM1(毕训强,1993),目前需要进一步改善。 因此,我们使用CCM3的辐射方案替换了原来的辐 射计算部分,作为模式改进的第一步。之所以选择 CCM3,一方面是因为它对于CCM1有较好的继承 性,不至于造成整个模式各个部分之间的不协调; 另一方面则是由于它的代码采用了与IAP9L-AGCM一致的Fortran77语言,不同于CAM系列 的Fortran90,从而更加便于移植和替换。

2 模式与资料

CCM3 相对于 CCM1 在辐射计算方面有了较 大的改进。短波辐射计算波段由 2 个增加为 18 个, 因此对于气体的辐射吸收描述更准确。长波辐射计 算中, CCM1 只考虑了 H₂O、O₃ 和 CO₂ 在 0 ~ 500 cm⁻¹、500~800 cm⁻¹、800~1000 cm⁻¹、1000~ 1200 cm⁻¹和 1200~2200 cm⁻¹五个波段的吸收作 用,而 CCM3 则考虑了更多的温室气体,并且在气 体的重叠吸收区细化了长波积分波段范围,例如在 500~1500 cm⁻¹细分了 8 个子波段,并根据各子波 段内不同的吸收气体来计算大气透射率。除此以 外, CCM3 中还包括了初步的气溶胶辐射反馈,虽 然只是采用背景气溶胶光学厚度(0.14)的方式, 但仍然是一个有益的改进,这有利于后期工作中更 多地考虑其他气溶胶的影响,以评估气溶胶的气候 效应。

CCM3 和CCM1 在云量的计算上都采用 Slingo (1987)的方案,但是前者在云的辐射特性计算上 有了很大的改进:CCM3 不仅考虑云水的光学性 质,还加入了云冰以及固液混相粒子的计算方案。 除此之外,CCM3 区分了海洋和大陆的云滴有效半 径的计算方法(Kiehl et al.,1994)。在此基础上, 利用 δ-Eddington 近似计算每一层的反射率和透射 率,这些对云的辐射特性参数化方案的改进使得新 的辐射模块能更好地模拟大气的辐射能量。表1 给 出了 CCM1 与 CCM3 在辐射计算方案上的主要异 同点,具体细节可以参照这两个模式的技术说明 (Williamson et al.,1987; Kiehl et al.,1996)。

另外,由于地表反照率与下垫面的海陆分布、 植被类型、土壤颜色、土壤种类以及土壤含水量等 参数密切相关,而且不同的陆面模式采用的参数化

	CCM1	CCM3		CCM1	CCM3
短波吸收气体	O_3 , O_2 , H_2O , CO_2	O_3 , O_2 , H_2O , CO_2	辐射传输方 程计算方案	累加法	∂-Eddington 近似
短波波段间隔	2个:紫外可见光波段 0.0~0.9 μm;红外波段 0.9~4.0 μm	18 个: O ₃ 吸收 0.20~0.35 μ m (7 个); O ₃ 和 O ₂ 吸收 0.35~ 0.70 μ m (1 个); O ₂ 和 H ₂ O 吸收 0.70~5.0 μ m (7 个); CO ₂ 吸收 2.70~ 4.30 μ m (3 个)	痕量温室气体	无	CH ₄ , N ₂ O , CFC11 , CFC12
云量参数化	Slingo 方案	Slingo 方案	气溶胶辐射 反馈	无	背景 (硫化物) 气溶胶
云的辐射特性	只考虑云水	考虑云水、云冰以及固液混 合态粒子	地表反照率	直接(散射)短波反射率 与IAP94陆面模式相关	直接(散射)短波反射率 与LSM陆面模式相关

表 1 CCM1 与 CCM3 辐射计算方案比较 Table 1 Comparisons of radiation schemes in CCM1 and CCM3

方案有一定差异,因此,在嵌套 CCM3 的辐射计算 方案时,理论上来说还需要对陆面过程做相应调 整。但是 CCM3 中的 LSM (The Land Surface Model)陆面模式涉及到了次网格参数化过程,因 此直接替换 IAP94 陆面模式还存在一定难度,所以 对于地表反照率,新的 IAP9L-AGCM 仍然使用了 原有的计算方案,只是在此基础上利用 CCM3 提供 的方案对海洋和海冰的反照率做了调整,从而保证 了全球大部分区域表面反照率与新辐射方案匹配。

在此基础上,我们将 IAP9L-AGCM 的新旧两 个版本分别积分25年,取后20年平均得到模式基 本气候态,并与观测场进行比较,从而判别模式改 进效果。所选用的观测资料为 1979~2003 年的 NCEP/NCAR 的再分析资料(Kalnay et al., 1996), 自 1979 年加入卫星观测以来, 该资料的可 信度大幅度提高,而且其包含的物理场种类较全, 适合于做一些诊断分析和模式评估工作。NCEP/ NCAR 的再分析资料水平分辨率为 2.5°×2.5°, 垂 直方向分为17层,从1000 hPa延伸到10 hPa。在 模式资料与观测资料比较之前,我们先将 NCEP/ NCAR 资料插值到模式对应的网格上,这样有利于 定量评估模式气候态模拟效果的空间分布型以及平 均态差异大小。另外,为了便于说明,我们在后文 中统一把观测资料称为 ncep, 而把原来的 IAP9L-AGCM 称为 iap91_ccm1, 新的模式版本称为 iap91_ ccm3。同时,冬季代表了12(当年)、1和2(次年) 三个月的平均,夏季代表了6、7和8三个月的

平均。

3 辐射场的模拟

由于 IAP9L-AGCM 的辐射方案被替换,所以 首先来看辐射场的模拟效果。为了便于理解,文中 讨论的几个物理量用了统一的命名方式,第一个字 母 N、U或 D 代表净(net)、向上(upward)或向 下的(downward),中间三个字母为 SWR 或 LWR 代表短波辐射(shortwave radiation)或长波辐射 (longwave radiation),最后一个字母 T 或 S 代表大 气顶(TOA)或地表(surface)。晴空辐射则在上 述命名之后加上"_CS"以示区别。例如,USWRT 表示大气顶向上的短波辐射通量。本文中对于净辐 射的方向,除非特别说明,长波正值方向取向上, 短波则取向下。

3.1 辐射场的总体比较

在这一部分,我们将评估地表和大气顶的几个 常规辐射场的改进情况。首先,逐月的辐射场按面 积权重取全球平均值,然后将 iap91_ccm3 和 iap91_ ccm1 的模拟结果分别与 ncep 做差值,得到图 1, 其目的是检验气候平均态模拟的均值差异;然后, 将模式逐月的辐射场与对应的观测场做空间相关, 得到了图 2,其目的是检验模式模拟的气候态分布 型是否与观测一致或接近。

图 1 所显示的辐射场平均值的差异变化很大, 从±0.2 W/m² 到±35 W/m²。其中大气顶向下的 短波辐射 (DSWRT) 的模拟最为精确,因为这是一





个天文量,只要地球轨道参数和太阳常数确定了就 不会有很大差异。总体来看,每幅分图中的两条曲 线形状比较类似,说明模式改进前后模拟的辐射场 偏差的季节变化趋势很接近。但是, iap91 ccm3 相 对于 iap91 ccm1 来说,模拟的大部分辐射场均值都 更接近于观测一些,如图1c~f所示,新的模式偏 差都要比以前更接近于 0。而图 1a 所显示的大气 顶净的长波辐射,虽然波动幅度仍然比较大,但相 对于老版本, iap91 ccm3 克服了原有模式较大的正 异常,使得偏差主要集中在0值附近。另外,iap91 ccm3 对于晴空辐射的模拟结果与原来的版本比较 一致 (见图 1g、h), 这说明尽管新的模式中使用了 原来的陆表反照率方案,这一方案还是比较适用 的。从图1可以看出,新模式在有云条件下的辐射 通量相对于以前版本有了较为明显的改进,这充分 说明 CCM3 的辐射方案中对于云的辐射特性参数 化方案的改进是非常有益的。

1期

No. 1

图 2 反映模式模拟的气候态分布与观测场的相 似程度。比较来看,模拟结果最不理想的应该是地 表净长波辐射(NLWRS),而 iap91_ccm3 相对于 iap91_ccm1 还是有较为明显改进的,空间相关系数 从 0.3 左右提高到了 0.6 左右。其他的物理场空间 分布形势在改进前后变化则不是很明显。值得一提 的是对 DSWRT 的模拟,它是整个大气辐射源,从 图 1b 可以看到 iap91_ccm3 和 iap91_ccm1 在这个量 的均值模拟上差别不是很大,然而,从空间分布型 来看(图 2b),iap91_ccm1 在冬半年的模拟存在一 定问题。在比较了冬季的 DSWRT 的模拟和观测 差异后(图略),我们发现 iap91_ccm1 在北极点计 算出现偏差,它在北半球处于极夜时期仍然有较大 的值,这个问题在 iap91_ccm3 中得到了改正。

由图 1 和图 2 可以看到, iap91_ccm3 对于辐射 场的模拟相比于 iap91_ccm1 有了较大的改进, 这表 现在大多数物理场的均值更接近于真值, 而且空间 分布也更加合理。当然, iap91_ccm3 仍然有不足之 处, 它基本上保持了原来物理场随时间演变的特 征, 从而没有改善模式辐射场在某些月份模拟较差 的问题, 例如 USWRT 和 USWRT_CS 在 3 月和 9 月的空间分布型与观测偏差较大, 而 NLWRT 在 12 月、1 月份模拟效果不好, 这些有待于进一步的 改进。

3.2 大气顶净的长波辐射 (OLR)

从这一部分开始将考察几个净辐射场的空间变化,更细致地评估模式模拟的性能。IAP9L-AGCM模拟的OLR在赤道地区是极大值,越往两极值越小,这与温度的分布是对应的(图略)。但





是 OLR 的分布并不完全决定于温度, 它还与云的 覆盖率密切相关,特别是具有"保温"作用的深厚 积云和具有强烈致冷作用的中云。观测资料表明 (图略),在沿赤道的撒哈拉沙漠南部、中南半岛以 及北美洲南端等地区,是 OLR 的低值区,这些地 区对流活动旺盛,往往具有较高的积云覆盖率。另 一方面,环绕地球的副热带地区,由于受到 Hadley 下沉支绝热加热的影响,空气干燥高温,一般晴空 少云,因此低层的长波辐射可以直接到达大气顶, 对应 OLR 的高值区。比较模式结果与观测结果的 差异(图3)可以看到, IAP9L-AGCM的OLR在 云的影响造成的上述高低值中心都有较大偏差。这 说明原来的 Slingo 云量参数化方案可能需要改进, 虽然 CCM3 的云量计算中作了一些有意义的调整 (Kiehl et al., 1998), 但这些调整并没有包括到 iap91 ccm3 中来, 所以 IAP9L-AGCM 的固有偏差 仍然存在。

尽管模式模拟的结果与实际观测仍然存在较大 偏差,但是 iap91_ccm3 相对于 iap91_ccm1 还是有 一定改进的。比较图 3a 和 3b 可以发现,在赤道地 区的几个低值中心模拟效果都比以前更接近于观 测,而南半球大面积的正偏差也有所减弱。另一方 面, iap91_ccm3 模拟的太平洋副高地区的 OLR 值 则偏小了。在夏季(图 3c、d), iap91_ccm3 相对于 iap91_ccm1 在北半球中高纬地区的正异常面积减 小,强度减弱,而热带的几个低值中心都更接近真 实。总体来看, iap91_ccm3 在中低纬地区引入了较 大的负异常,有效地克服了 iap91_ccm1 模拟结果的 整体偏高,这一点也可以从图 1a 中比较看出。

3.3 地表净的短波辐射 (NSWRS)

图 4 是模式模拟的 NSWRS 分布。比较图 4a 和 4b 可以直观地发现,在冬季,原来模式中的大 面积正偏差得到了很好的抑制,特别是中低纬海洋 和南极大陆地区的异常得到了改善。但同时,绕南 极低压带地区(海冰覆盖区)出现较大的负异常, 这有可能与 iap91_ccm3 中对海冰的反照率作的调 整有关。表 2 列出新旧模式的海冰反照率参数化方 案对比结果,*T*。为近地面大气温度。可以看到, iap91_ccm3 相对于 iap91_ccm1 的海冰反照率偏高, 这使得反射的短波辐射强度偏大,因而计算的净短 波辐射量相对于后者偏低。

夏季的 NSWRS 模拟情况与冬季类似(图 4c、 d),中低纬海洋的大面积正异常被削弱,从而使得 模拟的结果更趋近于观测。而北冰洋地区出现的大 面积负异常,同样有可能源于海冰反照率偏高。从 图4的结果可以看出,海表和海冰反照率的变化对



图 3 iap9l_ccm3 (a、c) 和 iap9l_ccm1 (b、d) 与 NCEP 的冬季 (a、b) 和夏季 (c、d) OLR 差別 (单位: W/m²)。虚线代表负值 Fig. 3 (a, b) The climatological differences of OLR between NCEP reanalysis and the simulations from (a) iap9l_ccm3 and (b) iap9l_ccm1 in DJF (Dec - Feb); (c, d) same as (a, b) but in JJA (Jun - Aug). Negative values are dashed, units: W/m²

波段	iap9l_ccm1		iap91_ccm3	
0.2~0.7 μm	0.7	$T_{\rm s} \leqslant 272.15$	0.70	
	$\langle 0.7 - 0.04(T_s - 272.15) \rangle$	272.15 $<$ T _s $<$ 277.15		
	0.5	$T_{\rm s} \ge 277.15$		
0.7~5.0 μm	0.5	$T_{\rm s} \leqslant 272.15$	0.50	
	$< 0.5 - 0.06(T_{\rm s} - 272.15)$	272.15 $<$ $T_{\rm s}$ $<$ 277.15		
	0.2	$T_{\rm s} \ge 277.15$		

	表 2	新旧模式海冰反照率的参数化方案对比	Ł
--	-----	-------------------	---

Table 2	Comparison of the	noromotorizations of	Con ico	albodo in	ian01 ccm	1 and ian01	com3
I ADIC 2	Comparison or the	parameter izations of	scance	and and an	apri cun	\mathbf{I} and \mathbf{I}	unis

于全球净短波辐射能量的计算相当重要。总的模拟 结果表明,一方面,新版本中的海洋部分反照率更 加合理,从而海洋地区的正异常得到了较好控制, 另一方面,海冰部分的反照率偏高,导致对应部分 的净短波辐射量偏低。

1期

No. 1

另外,进一步比较新旧模式在陆地上 NSWRS 的模拟情况,可以发现 iap91_ccm3 与 iap91_ccm1 的偏差基本上是一致的,这主要是因为新旧模式中 陆地部分的反照率没有差别。尽管如此, iap91_ ccm3 在陆地部分的 NSWRS 与观测还是比较一致 的(图 4a、c),这说明原来的陆表反照率参数化方 案仍然较好地适用于新的版本。

3.4 地表净的长波辐射 (NLWRS)

图 5 是模式模拟的 NLWRS 分布。从模式模 拟的偏差来看, iap91_ccm3 比 iap91_ccm1 有了较为 明显的改进, 主要表现在海洋地区大面积的正异常 减弱甚至消失, 而冬季南极大陆上的负异常也得到 了有效的克服 (图 5a、b)。另外, 旧版本中大洋东 岸大陆西侧的高异常中心有了较为明显的减弱。这 一带往往是具有较强致冷作用的中云密集区, 原来 模式中这类云对长波辐射的影响刻画得不够好, 而 新的模式则在这方面有了较好的改进。

进一步分析可以发现, iap91_ccm3 对于 NL-WRS模拟的改进是合理的, 而不是类似于负负得



图 4 同图 3, 但为模式模拟的 NSWRS 分布 Fig. 4 Same as Fig. 3, but for NSWRS



图 5 同图 3,但为模式模拟的 NLWRS 分布 Fig. 5 Same as Fig. 3, but for NLWRS

正的偶然结果。从图 1d 可以看到,新的模式对于 地表向上的长波辐射量 (ULWRS) 模拟比以前有

了较大的改善。Iap91_ccm1 中的 ULWRS 偏低,而得到的 NLWRS 却偏高,这说明到达地表的向下的

长波辐射(DLWRS)比观测值要更加偏低(因为 NLWRS=ULWRS-DLWRS),所以是不合理的。 而 iap91_ccm3 在改进了ULWRS的同时,也使得 NLWRS与观测更加接近。之所以会出现这样明显 的改进,除了 iap91_ccm3 对于长波辐射过程的描述 更加合理(Kiehl et al., 1998)外,还与模式中引 入更多的痕量温室气体有关,这些气体使模式大气 的长波辐射净损失减少,从而使得模拟结果更接近 真实。

4 常规物理场的模拟

在上一部分讨论了 IAP9L-AGCM 的改进版本

对于辐射场的模拟效果,接下来,我们继续对其他 的常规物理场进行比较。这里的常规物理场主要包 括海平面气压(SLP)、温度,其他的物理场限于篇 幅只做概述。另外,由于常规物理场的变化不像辐 射场那样直接明显,所以这一部分我们将通过 iap9l_ccm3 与 iap9l_ccm1 的差值来讨论改进效果。

4.1 海平面气压

图 6 是 iap91_ccm3 模拟的冬季和夏季 SLP 分布情况。从图 6a 和 6d 来看,模式基本上抓住了主要的气候系统,特别是中低纬和热带地区,主要包括冬季的阿留申低压、冰岛低压、南印度洋副热带高压、南太平洋副热带高压和南大西洋副热带高压



图 6 iap9l_ccm3 模拟的冬季 (a~c) 和夏季 (d~f) SLP 分布情况 (单位: hPa): (a、d) SLP 平均气候态; (b、e) 与 NCEP 的差别; (c、f) 与 iap9l_ccm1 的差别

Fig. 6 (a) The climatology of SLP simulated by iap9l_ccm3 in DJF; (b) the climatological difference of SLP between the simulation of iap9l_ccm3 and NCEP reanalysis in DJF; (c) the climatological difference of SLP between the simulations of iap9l_ccm3 and iap9l_ccm1 in DJF; (d-f) same as (a-c), but in JJA. Units: hPa

等,夏季的印度低压、北太平洋副热带高压、北大 西洋副热带高压以及环南半球中低纬度的副热带高 压等,只是模拟的强度都要偏弱一些。模式模拟的 SLP 偏差最大的地方在极地地区,特别是南极。 IAP9L-AGCM 对于南半球中高纬地区的绕极低压 带以及南极大陆气压的模拟不是很理想,这是该模 式的一个系统性误差,在 iap91_ccm3 中也没有得到 明显改善(图 6b、e)。之所以出现这样的结果,可 能与模式的分辨率偏低有关。张凤等(2004)将该 模式的分辨率提高到 1°×1. 25°后,模式在 SLP 模 拟上的偏差得到了很好的改进。

比较 iap91_ccm3 和 iap91_ccm1 的 SLP 模拟情

况(图 6c、f),可以看到模式改进前后气压场绝对 值变化不大,而且主要集中在中高纬两极地区。具 体来说,iap91_ccm3 对于冬季南极地区和夏季北极 地区 SLP 的正偏差有一定改进,而在其他的一些 地区,原有的偏差被进一步放大,不过这些变化的 幅度都比较小。

4.2 温度

接下来看温度的变化。由于辐射场与温度场是 直接相关的,所以我们对于辐射模块的改善,首先 应该在温度上表现出来。

图 7 是模式模拟的冬季和夏季近地面大气温度 (TAS)的分布。从图 7a 和 7d 来看, IAP9L-AGCM



图 7 iap9l_ccm3 模拟的冬季 (a~c) 和夏季 (d~f) 近地面大气温度 (TAS) 分布情况 (单位:℃): (a、d) TAS 平均气候态; (b、e) 与 NCEP 的差别; (c、f) 与 iap9l_ccm1 的差别

Fig. 7 (a) The climatology of surface air temperature (TAS) simulated by iap91_ccm3 in DJF; (b) the climatological difference of TAS between the simulation of iap91_ccm3 and NCEP reanalysis in DJF; (c) the climatological difference of TAS between the simulations of iap91_ ccm3 and iap91_ccm1 in DJF. (d-f) same as (a-c), but in JJA. Units: $^{\circ}$ C

对于温度的模拟还是比较合理的,特别是海洋部分,这是因为该模式在海洋地区 TAS 取的是月平均海温。而在陆地部分,模式利用 IAP94 陆面模式来计算地表温度、感热和潜热等物理量,因此存在着一定偏差。从图 7b 和 7e 来看,模式模拟的 TAS 的偏差主要集中在两半球的中高纬和极地地区,这与 SLP 的模拟效果是一致的。进一步比较图 7b 和 图 6b 以及图 7e 和图 6e,可以看到负(正)的 TAS 异常对应正(负)的 SLP 异常,这与我们的常识是一致的,因为在近地面往往是冷高压与热低压的配置。从这一点来看, IAP9L-AGCM 的动力框架是比较合理的。

图 8 是模式模拟的冬季和夏季纬向平均温度随 高度分布情况,这可以反映该模式对于全空间大气 温度场模拟的合理性。分别比较图 8a 和 8b 以及图 8d 和 8e,可以发现 IAP9L-AGCM 对于大气温度的 模拟还是相当好的。无论是对流层中低层温度等值 线的分布,还是热带对流层顶的低值中心,该模式 模拟得都与观测很接近。模拟结果偏差主要存在于 对流层高层以及平流层低层区域,比较来看,200 hPa以上的冬季南极和夏季北极地区温度模拟较观 测情况偏低。对于这些地方的偏差,iap91_ccm3比 iap91_ccm1有了较好的改进。从图 8c 和 8f 来看, 无论冬夏季新版本模式在热带对流层中低层、平 流层中低层等地方模拟的温度有了明显升高,而 南极和北极几乎整层大气的温度在冬季和夏季均 有所上升,这些变化都有利于减小原来模式中的 负偏差。

从图 8c 和 8f 看出, iap91_ccm3 比 iap91_ccm1 的大气温度要偏高一些。更定量化的差异显示在图 9, 它是两个模式各层的物理量之差取面积权重全 球平均后的垂直廓线随时间演变的情况。图 9d 反 映新旧模式大气温度垂直廓线差异的逐月变化, 可 以看到模式改进后大气温度有了普遍的升高, 最大 的正偏差位于 200 hPa 附近, 它有效克服了 iap91_ ccm1 在该高度处温度的全球性负异常(图略)。但 另一方面, 500 hPa 以下的温度正偏差导致新的模 式模拟的温度比观测结果偏高(图略)。



图 8 模式模拟的冬季 (a~c) 和夏季 (d~f) 纬向平均温度随高度的分布 (单位: K): (a、d) NCEP; (b、e) iap9l_ccm3 模拟结果; (c、f) iap9l_ccm3 与 iap9l_ccm1 模拟结果之差

Fig. 8 (a) Vertical distribution of zonal mean temperature of NCEP reanalyses in DJF; (b) vertical distribution of zonal mean temperature simulated by iap9l_ccm3 in DJF; (c) vertical distribution of the zonal mean temperature difference between iap9l_ccm3 and iap9l_ccm1 in DJF; (d-f) same as (a-c), but in JJA. Units: K



图 9 iap9l_ccm3 与 iap9l_ccm1 垂直廓线差异随时间演变的情况:(a) 短波辐射加热率;(b) 长波辐射加热率;(c) 总辐射加热率;(d) 温 度(单位:℃)。(a~c) 单位:℃/d

Fig. 9 The temporal evolutions of the vertical profile differences between iap9l_ccm3 and iap9l_ccm1: (a) Shortwave radiation heating rate $(^{\circ}C/d)$; (b) longwave radiation heating rate $(^{\circ}C/d)$; (c) total radiation heating rate $(^{\circ}C/d)$; (d) temperature $(^{\circ}C)$

图 9a~c 是新旧模式的辐射加热率对比。从图 9a 可以看出, iap91 ccm3 的短波辐射加热率相对于 iap91 ccm1 是升高的,最大变化主要位于对流层低 层 (700 hPa 附近) 和平流层, 可能分别与水汽和臭 氧的短波吸收描述更加细致有关(见表1)。而长波 辐射加热率(图 9b)在高低层有着相反的变化,即 高层为负偏差,低层为正偏差。从图 9c 的总辐射 加热率变化来看,正值区主要位于对流层,特别是 低层 700 hPa 附近, 而这种变化包括了短波和长波 的贡献。在100 hPa以上,新版本计算的辐射加热 率稍有降低。比较图 9c 和 9d 发现,辐射增温率与 温度变化并不对应,这一方面是因为短波辐射加热 率主要集中在白天,因此就全球范围来说,其影响 比较难以定量评估;另一方面则是因为大气对于太 阳辐射的响应是复杂和非线性的,模式中的大气温 度变化包括了辐射、摩擦、扩散、积云对流和降水 补偿等过程,因此只改变辐射过程并不能完全改善 对大气温度的模拟。

5 总结与讨论

本文评估了一个改进版本的 IAP9L-AGCM 的 气候态,该版本利用 NCAR CCM3 模式的辐射部 分替换了原来模式中的辐射计算方案。评估的结果 表明:新的版本对于辐射场的模拟有了较大的改 进,主要表现在大部分辐射场的空间平均和分布型 都与观测更加接近,特别是有云条件下辐射场的模 拟偏差减小。这种改进的结果,一方面是由于 CCM3 中的辐射物理过程描述得更加细致,各种参 数也比以前更加合理,所以克服了原有辐射方案中 的较大偏差 (Kiehl et al., 1998); 另一方面是因为 考虑了痕量温室气体和气溶胶的影响,从而使得长 波辐射的计算更加合理。模式中的偏差主要在于大 气顶净的长波辐射 (OLR)、大气顶向上的短波辐 射(USWRT)、地表净的长波辐射(NLWRS)等 场的空间分布型模拟不够好,可能的原因是模式中 有关云量和陆表反照率的参数化方案未作相应调 整,从而出现了一定程度的偏差。尽管如此,新版 本对于大气运动能量来源——辐射场的模拟还是有 较大的改进的。

进一步对改进后模式的常规物理场进行评估发现,模式大气的温度有了普遍的升高,环流场也发生了变化,具体表现为位势高度升高,比湿增大, 降水减少,而其他的地表物理场如表面气压、近地 面大气温度、潜热、感热等变化都不明显(图略)。 这一结果主要是由于模式中其他物理过程参数化未 做相应调整,如积云对流和陆面过程参数化方案 等,因而未能合理"消化"辐射场的变化。另外,由 于模式的分辨率以及动力框架没有改变,所以对于 一些与动力过程有关的物理量如海平面气压、风场 等所存在的系统性误差没有明显改善。

从图 4、5 还可以看出,模式改进后地表净辐 射场的变化主要集中于海洋地区,而这些地区的温 度在 AGCM 中取气候态海温,这也就解释了为什 么 iap91_ccm1 在较大辐射偏差下计算得到的 TAS 仍然与观测接近。当然,这一不合理偏差的存在, 是不利于海气耦合模式的发展的。其他耦合模式的 发展经验表明,要提高耦合系统的整体性能,除改 进各气候分量模式的模拟性能外,需要重点改进大 气模式中的云、辐射过程(王在志等,2007)。这正 是本文工作的意义所在。

致谢 非常感谢国际理论物理中心 (ICTP) 毕训强博士对于模式 改进过程中的建设性意见。

参考文献 (References)

- 毕训强. 1993. IAP 九层大气环流模式及气候数值模拟 [D]. 中国 科学院大气物理研究所博士学位论文. Bi Xunqiang. 1993. IAP 9-level atmospheric general circulation model and climate simulation [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- Collins W D, Rasch P J, Boville B A, et al. 2006. The formulation and atmospheric simulation of the Community Atmosphere Model Version 3 (CAM3) [J]. J. Climate, 19: 2144-2161.
- Hurrell J W, Hack J J, Phillips A S, et al. 2006. The dynamical simulation of the Community Atmosphere Model Version 3 (CAM3) [J]. J. Climate, 19: 2162-2183.
- Jiang Dabang, Wang Huijun, Ding Zhongli, et al. 2005. Modeling the middle Pliocene climate with a global atmospheric general circulation model [J]. J. Geophys. Res., 110: doi: 10.1029/ 2004JD005639.

- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc. , 77: 437-471.
- Kiehl J T, Hack J J, Briegleb B P. 1994. The simulated earth radiation budget of the NCAR CCM2 and Comparisons with the Earth Radiation Budget Experiment (ERBE) [J]. J. Geophys. Res., 99: 20815 – 20827.
- Kiehl J T, Hack J, Bonan G, et al. 1996. Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3) [C]. Technical Report NCAR/TN-420+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 152.
- Kiehl J T, Hack J J, Hurrell J W. 1998. The energy budget of the NCAR Community Climate Model: CCM3 [J]. J. Climate, 11: 1151-1178.
- 郎咸梅,王会军,姜大膀. 2004a. 应用九层全球大气格点模式进行 跨季度短期气候预测系统性试验 [J]. 地球物理学报,47 (1): 19-24. Lang X M, Wang H J, Jiang D B. 2004a. Extraseasonal short-term predictions of summer climate with IAP9L-AGCM [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese),47 (1): 19-24.
- 郎咸梅,王会军,周广庆,等. 2004b. 应用 IAP9L-AGCM 对 2002
 年中国夏季气候的预测及效果检验 [J]. 南京气象学院学报,27
 (1):29-35. Lang X M, Wang H J, Zhou G Q, et al. 2004b.
 Prediction of summer climate over China in 2002 with IAP9L-AGCM and its performance [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 27 (1): 29-35.
- 李崇银,穆明权,毕训强. 2000.大气环流的年代际变化 II. GCM 数值模拟研究 [J].大气科学,24(6):739-748. Li C Y, Mu M Q, Bi X Q. 2000. Inter-decadal variations of atmospheric circulation. Part II: GCM simulation study [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2000, 24 (6): 739-748.
- Liang Xinzhong. 1996. Description of a nine-level grid point atmospheric general circulation model [J]. Adv. Atmos. Sci., 13 (3): 269 - 298.
- 刘洪涛, 王斌, 薛峰, 等. 2002. 大气环流模式降水的模拟对水汽方 程差分方案的敏感性试验 [J]. 气候与环境研究, 7 (1): 121 – 134. Liu H T, Wang B, Xue F, et al. 2002. The sensitivity of precipitation simulation to different schemes of water vapor equation in atmosphere general circulation model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 7 (1): 121 – 134.
- 穆明权,李崇银. 1999. 东亚冬季风年际变化的 ENSO 信息 II. 模 拟资料分析 [J]. 气候与环境研究,4(2):176-184. Mu M Q, Li C Y. 1999. ENSO signals in interannual variability of East-Asian winter monsoon. Part II. Simulated data analyses [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese),4(2):176-184.
- 屈述军,张铭. 2003. 西南印度洋海温异常影响亚洲夏季风爆发的数值试验 [J]. 解放军理工大学学报,4 (2): 83-86. Qu S J, Zhang M. 2003. Numerical simulation of south-west Indian Ocean SSTA influence on outbreak of Asian summer monsoon [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (in Chinese), 4 (2): 83-86.

- Slingo J M. 1987. The development and verification of a cloud prediction scheme for the ECMWF model [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. , 113: 899-927.
- Wang Huijun. 1999. Role of vegetation and soil in the Holocene megathermal climate over China [J]. J. Geophys. Res., 104: 9361-9367.
- 王鹏飞,王在志. 2006. 大气环流数值模式的一种并行化方案 [J]. 大气科学,30(3):519-525. Wang P F, Wang Z Z. 2006. A parallelization scheme for atmospheric general circulation model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (3):519-525.
- 王在志, 宇如聪, 包庆, 等. 2007. 大气环流模式 (SAMIL) 海气耦 合前后性能的比较 [J]. 大气科学, 31 (2): 202-213. Wang Z Z, Yu R C, Bao Q, et al. 2007. A comparison of the atmospheric circulations simulated by the FGOALS-s and SAMIL [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (2): 202-213.
- Williamson D L, Kiehl J T, Ramanathan V, et al. 1987. Description of NCAR Community Climate Model (CCM1) [C]. Technical Report NCAR/TN-285+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 112.
- 薛洪斌,张铭,黄克. 2004. 垂直分辨率对全球降水模拟的影响 [J]. 解放军理工大学学报,5(1):99-102. Xue H B, Zhang M, Huang K. 2004. Effect of different vertical resolution on simulations of global precipitation [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (in Chinese), 5(1):99-102.
- 晏红明,李崇银. 2007. 赤道印度洋纬向海温梯度模及其气候影响 [J]. 大气科学, 31 (1): 64 - 76. Yan H M, Li C Y. 2007. A study of the sea surface temperature zonal gradient mode in the equatorial Indian Ocean and its influence on climate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (1): 64 - 76.
- Zeng Qingcun, Zhang Xuehong, Liang Xinzhong, et al. 1989. Documentation of IAP Two-Level Atmospheric General Circulation Model [C]. DOE/ER/60314-H1, TR044: 383.

- 张凤,陈红,林朝晖,等. 2004. IAPAGCM-I 水平分辨率的提高及 对全球和东亚区域气候的数值模拟 [J]. 气候与环境研究,9 (2): 396-408. Zhang F, Chen H, Lin Z H, et al. 2004. Improvement of horizontal resolutions of IAP AGCM-I and its influence on the simulations of global and East Asian climate [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (2): 396-408.
- 张凤. 2005. IAP AGCM 中短波辐射方案的改进研究 I 引入 Fu-Liou 短波辐射方案 [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 543-559. Zhang F. 2005. The study of the improvement of the solar radiation transfer scheme in IAP AGCM. Part I: Incorporating Fu-Liou code into IAP AGCM [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (3): 543-559.
- 张凤,曾庆存. 2005. IAP AGCM 中短波辐射方案的改进研究 II 短波辐射方案的改进 [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 560 - 573. Zhang F, Zeng Q C. 2005. The study of the improvement of the solar radiation transfer scheme in IAP AGCM. Part II: The improvement of solar radiation scheme [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (3): 560 - 573.
- Zhang Xin, Wang Bin, Ji Zhongzhen. 2001. Performance of a parallel finite difference atmospheric general circulation model [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 18 (6): 1175 – 1184.
- Zhang Xuehong, Liang Xinzhong. 1989. Comparison and examination of dynamic frameworks of IAP and OSU AGCM [J]. Adv. Atmos. Sci., 6 (3): 265-274.
- Zhang Xuehong. 1990. Dynamical framework of IAP nine-level atmospheric general circulation model [J]. Adv. Atmos. Sci., 7 (1): 67-77.
- 左瑞亭,曾庆存,张铭. 2004. 季风及季风与西风带相互关系的数 值模拟研究 [J]. 大气科学,28 (1):7-22. Zuo R T, Zeng Q C, Zhang M. 2004. A numerical simulation of monsoon and the correlation between monsoon and westerlies [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (1):7-22.