

# 辐射和积云对流过程对大气辐射通量的影响<sup>\* 1</sup>

李剑东<sup>1,2</sup> 刘屹岷<sup>1</sup> 孙治安<sup>3</sup> 吴国雄<sup>1</sup>

LI Jiandong<sup>1,2</sup> LIU Yimin<sup>1</sup> SUN Zhian<sup>3</sup> WU Guoxiong<sup>1</sup>

1. 中国科学院大气物理研究所, LASG, 北京, 100029

2. 中国科学院研究生院, 北京, 100049

3. 澳大利亚气象局研究中心, 墨尔本, 3001

1. LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Bureau of Meteorology Research Center, Melbourne, Australia, 3001

2008-01-23 收稿, 2008-04-29 改回.

**Li Jiandong, Liu Yimin, Sun Zhian, Wu Guoxiong. 2009. The impacts of the radiation and cumulus convective parameterization on the radiation fluxes in SAMIL. Acta Meteorologica Sinica, 67(3):355–369**

**Abstract** A new radiation scheme is included into the general circulation model (SAMIL-R42L26) of the State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics/Institute of Atmospheric Physics (LASG/IAP). Compared with the previous radiation scheme (SES1), spectral interval, gas absorption, computation efficiency etc. have been improved in the new radiation scheme (SES2), so the radiative flux simulated by SES2 is improved correspondingly. In clear-sky conditions, the biases of long wave flux at the top of the atmosphere (TOA), short wave flux absorbed by atmosphere, and the incident short wave flux at surface are reduced a lot especially in convection active regions. In cloud-sky conditions, the biases of radiative flux are also reduced to some extent. However, there still exist large biases, which are closely related to the poor performance of the cumulus convective parameterization. Hence, we include a new cumulus convective parameterization into the SAMIL-R42L26 to further improve the simulation results. It is shown that water vapor content is greatly increased along the equator and the strong “double ITCZ” is eliminated with the new convective scheme. At the same time, the biases of radiative flux are reduced significantly along the equatorial convergence zone. The clear-sky long wave flux at TOA, the incident short wave flux over the oceans, and the global mean energy budget at TOA are closer to the observations. Our study also shows that there are still some biases in the radiative flux simulation, which might be related to the aerosol effect, the land surface process, and the cloud physics. These are to be investigated in the future.

**Key words** SAMIL, Radiation scheme, Cumulus convective scheme, Radiation flux

**摘要** 基于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发展的全球大气环流谱模式 (SAMIL-R42L26), 研究了澳大利亚气象局研究中心 (BMRC) 新辐射方案和新 Zhang-McFarlane 积云对流方案对大气辐射通量模拟的影响。新辐射方案相比原辐射方案在辐射计算光谱分辨率、气体吸收和计算效率等方面作了很多改进, 其对大气辐射通量的模拟能力相应提高。在晴空条件下, 大气顶出射长波、大气吸收短波和地表入射短波等与观测的偏差较原辐射方案明显减小, 尤其是在对流活跃区域。在云天条件下大气辐射通量与观测的偏差也较原辐射方案减小, 但其偏差依然较大, 这与模式中积云对流参数化方案模拟能力不足引起的辐射通量偏差有关。为此, 换用了新 Zhang-McFarlane 积云对流方案, 其

\* 资助课题: 国家重点基础研究发展规划项目 (2006CB403607)、中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-Q11-01) 和国家自然科学基金项目 (40875034, 40821092, 40523001)。

作者简介: 李剑东, 主要从事大气模式中辐射过程的数值模拟及诊断研究。E-mail: lijid@mail.iap.ac.cn

通讯作者: 刘屹岷, 主要从事天气、气候动力学及其数值模拟研究。E-mail: lym@lasg.iap.ac.cn

结果表明,对流活跃区水汽含量显著增加,原对流方案中偏强的“双赤道辐合带”现象明显减弱,赤道辐合带地区的大气辐射通量偏差有明显减小,在海洋地区晴空大气顶出射长波和地表入射短波的量值及空间分布均接近观测结果,同时大气顶全球平均能量收支的年变化和观测结果趋于一致,其中模拟的全球年平均大气顶能量收支和观测的偏差不到 $0.6 \text{ W/m}^2$ 。试验结果同时表明,在未来研究中引入气溶胶分布、调整相关的云物理和陆面过程等物理参数化方案是进一步提高 SAMIL-R42L26 辐射通量模拟性能的关键。

**关键词** 大气环流模式, 辐射方案, 积云对流方案, 辐射通量

**中图法分类号** P435+.1

## 1 引言

气候变化是当前国际热点科学问题,已成为影响全球社会、经济和政治发展的重大议题。辐射强迫研究是当前气候变化研究的核心问题之一,2001 和 2007 年两次 IPCC(Houghton, et al, 2001; Meehl, et al, 2007) 气候评估报告均有专门章节论述此方面内容;2006 年发表的《气候变化国家评估报告》(丁一汇等, 2006) 也将温室气体和气溶胶等辐射强迫因子作为中国气候变化的主要影响因素之一。目前,气候模式已成为理解和预测气候变化的强有力研究工具之一(Meehl, et al, 2007),其研制和改进已成为国际上气候研究机构的主要研究内容之一。准确地模拟辐射及能量收支是气候系统及其分量模式应该具有的最基本属性,同时气候系统模拟的能量应该具有合理的空间分布,特别是在大气模式顶和地表(Kiehl, et al, 1998; Wild, et al, 2006)。因此,改进和发展气候模式,特别是和辐射强迫相关的大气辐射方案具有极其重要的科学意义。

自 20 世纪 90 年代初开始,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(IAP/LASG)致力于发展气候系统模式(Wu, et al, 1996; Zhang, et al, 2000)。SAMIL-R42L26 是 IAP/LASG 研制的较高分辨率版本大气环流谱模式,尽管其对东亚气候有较好的模拟能力(Wu, et al, 2003; 周天军等, 2005a, 2005b),已有研究表明, SAMIL 模式中辐射通量的模拟尚存在一些问题,如大气顶(TOA)出射长波(LW)和地表入射短波(SW)偏强等(张韬等, 2002; 王在志等, 2007; 包庆等, 2006)。

在其他物理参数化过程不变的情况下,辐射过程的模拟性能首先和模式中选用的大气辐射方案有关。大气辐射计算的核心问题是大气中气体的非灰

吸收、云和气溶胶粒子的吸收和散射(石广玉, 2007)。SAMIL-R42L26 中原辐射过程采用的是澳大利亚气象局研究中心(BMRC)辐射方案(SES1)(Edwards, et al, 1996; Sun, et al, 1999a, 1999b)。SES1 中没有考虑  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和 CFC 等重要的均匀混合温室气体,也没有考虑对辐射过程有重要影响的气溶胶作用。气溶胶的辐射效应目前还存在很大的不确定性(Meehl, et al, 2007),但对  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和 CFC 等温室气体的辐射效应已有广泛的研究,其对气候系统有正辐射强迫的事实也已经得到广泛研究认可(Meehl, et al, 2007)。已有研究(Kiehl, et al, 1998)表明,引入上述温室气体可使 TOA 出射 LW(OLR)明显减小。此外, SAMIL 中辐射方案 SW 波段谱分辨率偏小,对可见光波段和近红外波段具有窄带吸收特性的气体吸收模拟能力不足。针对这些问题,本研究引入了 BMRC 的新大气辐射方案(SES2)(Sun, 2005),分析其对大气辐射通量模拟的影响。除与辐射方案有关外,大气辐射通量的模拟与云物理、积云对流和陆面过程也是紧密联系的。其中,积云对过程不仅可以影响大气垂直运动和降水,而且对云物理过程也有重要影响(Li, et al, 2007; Wang, et al, 2007; 刘屹岷等, 2007),进而对辐射过程产生影响。因此本文还通过新 Zhang-McFarlane 积云对流方案,结合 SES2 辐射方案,研究了 SAMIL-R42L26 中辐射通量的变化,以期改善大气辐射通量的模拟,并为今后大气环流谱模式进一步发展提供依据。

## 2 模式介绍与资料说明

### 2.1 大气环流谱模式 SAMIL-R42L26

SAMIL-R42L26 是全球大气环流谱模式,在水平方向为菱形截断 42 波,分辨率相当于  $2.8125^\circ$  经度  $\times 1.66^\circ$  纬度,采用  $\sigma p$  混合垂直坐标系,垂直方

向分为 26 层。模式动力框架引入参考大气即采用静力扣除的方法,采用了半隐式时间积分方案(王在志等,2005a,2005b)。其他主要物理过程包括 Slingo(Slingo,1980,1987)云量诊断参数化方案,并引入了基于统计云方案的层积云方案(戴福山,2003);SAMIL 中对流方案有 Tiedtke(Tiedtke,1989;宋晓亮,2005)湿对流调整方案和新 Zhang-McFarlane(ZM)积云对流参数化方案(Zhang, et al,2005)可供选择。边界层参数化过程采用非局地边界层参数化方案(周天军等,2005a)。此外,模式物理过程还考虑了地形重力波拖曳作用(Palmer, et al,1986;钱永甫,2002)。

## 2.2 SAMIL-R42L26 中的辐射方案

SAMIL-R42L26 中采用的大气辐射方案最初是由 Edwards 等(1996)基于二流近似辐射传输方程提出的。BMRC 的 Sun 等(1999a,1999b)对该辐射方案在气体吸收、云辐射参数化方面作了很多改进,模拟效果进一步得到改进,命名为 SES1,这也是目前 SAMIL 中所用的辐射方案。

但是,SES1 仅考虑了  $H_2O$ 、 $O_3$  和  $CO_2$  的气体吸收作用,没有考虑  $O_2$ 、 $CH_4$ 、 $N_2O$ 、CFC 等大气中均匀混合气体的影响;也没有考虑对辐射过程和气候变化有着重要影响的气溶胶辐射效应,同时 SES1 辐射方案的计算效率也较低。针对这些问题,Sun(2005)对 SES1 作了进一步改进,改进后的 SES1 辐射方案称为 SES2。

SES2 增加了辐射计算的谱分辨率,其中 SW 波段由 4 个增为 9 个,LW 波段由 7 个增为 8 个,进而引入  $O_2$ 、 $CH_4$ 、 $N_2O$  和 CFC 等 7 种均匀混合吸收性气体。和 SES1 一样,对气体吸收仍采用相关 k 分布方法处理,但 SES1 中相关 k 分布系数是根据 19 个参考气压和 3 个参考温度计算,而 SES2 中的参考气压和温度分别增加到 59 个和 5 个,从而得到了更为准确的气体吸收系数。谱分辨率增加后,SES2 还对光谱积分过程进行了合理优化,提高了计算效率。此外,SES2 方案还考虑了气溶胶辐射参数化,从而能够研究气溶胶的直接辐射效应。

晴空条件下独立辐射模式(off-line)数值试验(Sun,2005)表明,SES2 模拟的 TOA 出射和地表入射的 SW 辐射通量均要小于 SES1 模拟结果,高层

大气的短波加热率大于 SES1 的短波加热率。这主要是由于 SES2 在 SW 波段考虑了  $O_2$ 、 $CH_4$  和  $N_2O$  这 3 种气体的吸收作用,同时 SES2 还减弱了 SES1 中瑞利散射偏强的问题。

SES1 和 SES2 均采用了 Labs 和 Neckel(1970)太阳辐射通量密度光谱分布函数,且有多种云辐射参数化方案可供选择。在下面数值试验中,SW 波段采用 Stamnes(1988)水云方案和 Chou(1982)冰云方案,LW 波段采用了 Slingo(1989)水云方案和 Ebert 等(1992)冰云方案。

## 2.3 所用的资料

本文采用的主要观测数据如下:TOA 辐射通量的观测数据采用 ERBE(Barkstrom, et al,1990)卫星数据,数据的误差范围是  $\pm 5 W/m^2$ 。地表入射辐射通量的观测数据采用 ISCCP(Raschke,2005)卫星观测结果,数据误差范围是  $\pm(7-10) W/m^2$ 。大气可降水量数据采用 NASA 的 NVAP(Randel, et al,1996)卫星观测数据。此外,还用到了其他观测数据集,在下文中具体说明。

## 3 辐射过程对大气辐射通量的影响

### 3.1 试验设计

为研究 SES1 和 SES2 这两个辐射方案的差异及其对大气辐射通量模拟的影响,本文设计了第 1 组数值试验,包括 3 个试验。在第 1 个试验中,SAMIL-R42L26 中辐射方案为 SES1;第 2 个试验中,辐射方案为 SES2,没有考虑  $O_2$ 、 $CH_4$ 、 $N_2O$ 、CFC 等 7 种均匀混合气体;第 3 个试验中,辐射方案仍然为 SES2,但加入了上述 7 种气体。3 个试验均没有考虑气溶胶辐射作用,采用 PCMDI(Program for Climate Model Diagnosis and Inter-comparison)提供的包含季节变化的气候月平均海温、海冰分布来强迫模式系统,使用 Tiedtke 湿对流调整方案,模式其他物理过程相同。在辐射过程中根据云量的有无增加了晴空辐射通量的输出。每个试验积分 15 年,模式积分前 5 年为调整过程,取积分达到平衡后第 6—15 年的平均结果作为全球模拟场。将上述 3 个试验分别记为:SES1\_tdk,SES2\_tdk,SES2\_tdktr。

### 3.2 全球平均能量收支

表 1 给出了不同辐射方案模拟和观测的全球年

平均大气辐射通量。首先分析 TOA 的 SW 辐射通量。SES1-tdk 晴空净 SW 最小, SES2-tdk 比之大  $2 \text{ W/m}^2$  多, 而 SES2-tdktr 要比 SES1-tdk 高出  $3 \text{ W/m}^2$  多, 这主要是由于 SES1-tdk 中瑞利散射偏强使得晴空出射 SW 偏多所致。在云天, 3 个试验结果差异较小, SES2-tdktr 仍比其他 2 个试验结果高出  $1 \text{ W/m}^2$  左右。由于晴空净 SW 模拟的偏小, 所以 SES1-tdk 模拟的 SW 云辐射强迫小于 SES2 试验结果。SES2-tdktr 模拟的 OLR 最好, 比其他 2 个试验在晴空和云天均减小  $5 \text{ W/m}^2$  左右。这主要是  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和 CFC 等均匀混合温室气体对 LW 的吸收所致。虽然 3 个试验模拟的晴空辐射通量和观测偏差较小, 但是在云天条件下和观测的偏差均很大。这主要是由于模拟的云量明显偏少, 而从模式中诊断得到的云水含量、云粒子半径也不足以很好地模拟云的光学厚度, 从而使得试验中 SW 云辐射强迫和 LW 云辐射强迫明显偏少, 进而 TOA 出射 SW 偏小, 净 SW 和 OLR 偏大。尽管如此, SES2 模拟的大气吸收 SW 均要好于 SES1 结果, 而在加

入 7 种气体后, SES2-tdktr 模拟的晴空和云天大气吸收 SW 均比 SES2-tdk 增加  $3 \text{ W/m}^2$  以上, 和观测的偏差进一步减小。由表 1 还可以看出, 在 3 个试验中, SES2 模拟的地表入射 SW 小于 SES1 结果, 其中 SES2-tdktr 入射 SW 最小, 而其模拟的地表入射 LW 最大, 和观测偏差也最小。SES2 和 SES1 的这些差异表明 SES2 对气体吸收的考虑要明显好于 SES1。SES2 方案中 SW 波段谱分辨率明显增加, 且引入了新的相关 k-分布吸收系数, 使得已有的  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{O}_3$  对 SW 吸收增强; 同时又考虑了可见光波段  $\text{O}_2$  以及近红外波段  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  对 SW 的吸收作用以及  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和 CFC 等对 LW 的吸收作用。SES2 方案中的这些改进使得模拟的大气吸收 SW 和 LW 增加, 进而地表入射 SW 和 TOA 的 OLR 减小; 同时随着  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和 CFC 的引入, 大气吸收增加后由于热红外效应发射的 LW 也相应增加, 从而使得地表入射 LW 增加。上述分析结果特别是 SW 辐射通量的变化, 与 SES1 和 SES2 的 off-line 比较结果一致 (Sun, 2005)。

表 1 不同辐射方案模拟和观测的全球年平均大气辐射通量

Table 1 Global annual mean radiative fluxes simulated by different radiation schemes in comparison with the observations

	辐射通量 ( $\text{W/m}^2$ )	SES1-tdk	SES2-tdk	SES2-tdktr	观测
模式顶	云天净 SW	269.97	269.67	270.90	234(a)
	晴空净 SW	289.94	292.32	293.07	289(a)294(e)
	SW 云辐射强迫	-19.97	-22.65	-22.23	-54(a)
	云天 OLR	264.78	265.29	260.43	234(a)
	晴空 OLR	275.36	275.72	269.52	264(a)
	LW 云辐射强迫	10.58	10.43	9.06	30(a)
	能量收支	5.19	4.38	10.47	0(a)
	总云量	0.367	0.373	0.365	0.67
	地表	云天入射 SW	237.04	234.02	231.51
云天净入射 SW		207.07	204.44	202.41	165(b)
晴空入射 SW		260.96	260.00	256.97	248(b)
晴空净入射 SW		228.34	227.56	225.10	217(b)
云天入射 LW		317.92	320.08	324.32	343(b)
晴空入射 LW		307.00	307.31	319.79	313(b)321(c)
净出射 LW		83.52	83.30	80.11	49
大气	云天吸收 SW	62.90	65.23	68.49	69(b)
	晴空吸收 SW	61.60	64.76	67.97	72(b)

注: a 是 ERBE 卫星观测; b 是 ISCCP 卫星观测; c 是 Wild(1998)估算结果; e 是 CERES(Wielicki, et al, 1996)卫星观测。

a is from ERBE, b from ISCCP, c from Wild (1998), and e from CERES (Wielicki, et al, 1996)。

### 3.3 OLR 和地表入射 SW 的纬向分布

图 1 给出了不同辐射方案模拟和观测 OLR 的纬向平均分布。由图 1a、1c 可见, 在  $30^\circ\text{N}$  以南地

区, SES2-tdktr 模拟的晴空 OLR 明显好于其他 2 个试验结果, 其中南半球海洋地区则已接近 ERBE 观测。北半球中高纬和南极地区, 3 个试验模拟的

OLR 均偏大,主要是模拟的地表温度偏高所致,但 SES2\_tdktr 模拟 OLR 正偏差稍小。3 个试验模拟的水汽分布差异并不大(图略),主要是 SES2 中引入的  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和 CFC 等温室气体对 LW 的吸收作用使 OLR 正偏差减小;而在海洋地区,由于采用的是观测海温,模拟的晴空 OLR 和观测偏差也相应更小。云天条件下试验模拟的 OLR 正偏差均很大(图 1b、1d),在热带地区最大偏差甚至超过  $50 \text{ W/m}^2$ ,在北半球夏季中高纬度地区,OLR 正偏差也很大。这种偏差除了与模拟的陆表温度偏高有关外,另一重要原因是模拟的云量和云水含量明显偏

少,同时赤道辐合带低层水汽明显偏少也是云天 OLR 正偏差原因之一(刘屹岷等,2007)。

晴空地表入射 SW 的纬向平均分布(图 2a、2c)表明,入射 SW 的最大偏差出现在夏半球。在夏季北半球中高纬度地区,最大偏差超过  $30 \text{ W/m}^2$ 。考虑了  $\text{O}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  对入射 SW 的吸收作用后,SES2\_tdktr 模拟入射 SW 正偏差有所减小,在夏半球中高纬度最大可以减少  $5 \text{ W/m}^2$  左右,但晴空入射 SW 的正偏差依然很大。这是因为模拟的大气低层水汽偏少以及没有考虑气溶胶辐射效应导致大气对 SW 吸收偏少所致。在云天条件下,由图 2b、2d 可

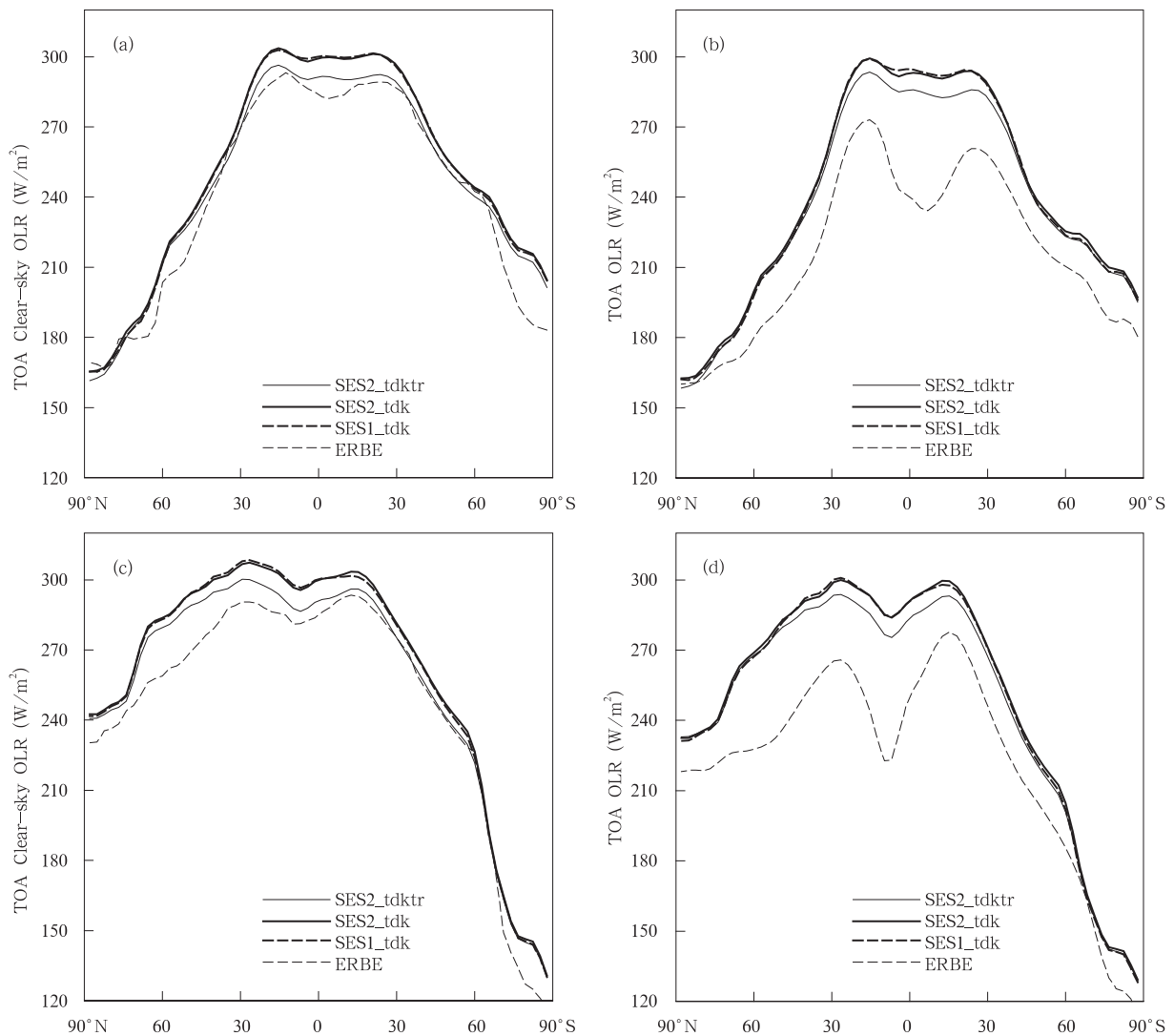


图 1 不同辐射方案模拟和观测 OLR 的纬向平均分布

(a 和 c 分别是冬季和夏季晴空 OLR; b 和 d 分别是冬季和夏季云天 OLR; 单位:  $\text{W/m}^2$ )

Fig. 1 Zonal mean OLR derived from different radiation schemes and observation

(a and c are clear-sky OLR in DJF and JJA, respectively; b and d are cloudy-sky OLR in DJF and JJA, respectively; unit:  $\text{W/m}^2$ )

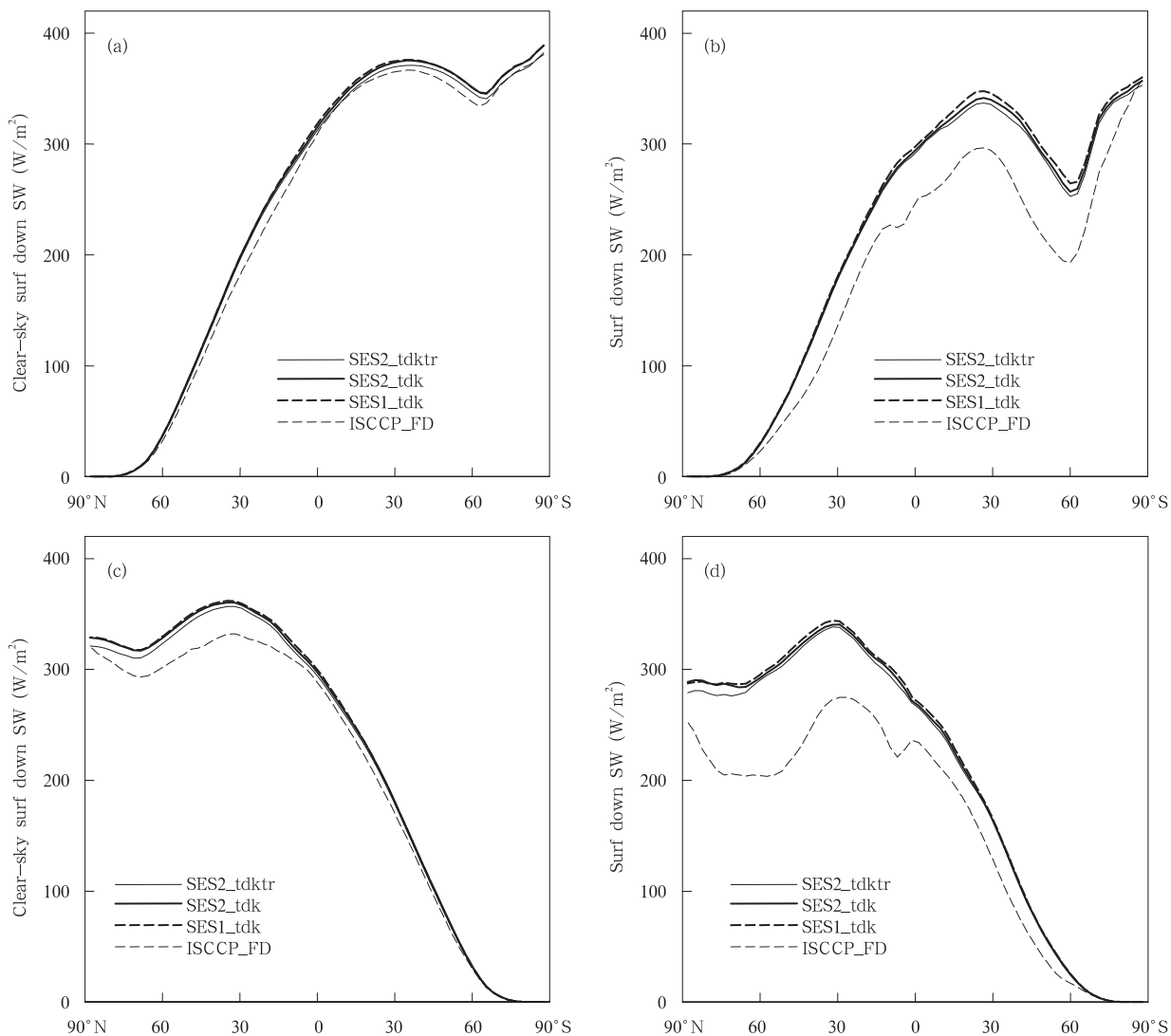


图2 同图1, 但为地表入射 SW 的纬向平均分布  
 Fig. 2 As in Fig. 1 but for incident SW at surface

见, 入射 SW 偏差较晴空更大, 除模拟的水汽偏差和缺少气溶胶影响外, 云量和云水含量偏少是偏差的主要原因。尽管如此, 较之 SES1, SES2 模拟的地表入射 SW 还是有所减小。

### 3.4 晴空 OLR 和地表入射 SW 的空间分布

晴空大气辐射通量主要受地表温度等下垫面状况、气体吸收和气溶胶的影响, 而不受云物理过程的影响, 能更清楚地说明大气辐射方案的模拟性能 (Collins, et al, 2006; Wild, et al, 2006), 所以本节给出晴空条件下 OLR 和地表入射 SW 的空间分布。

图3给出了不同辐射方案模拟和观测晴空

OLR 差值场的空间分布。由图 3a、3b 可见, SES1\_tdk 模拟的 OLR 整体偏大, 主要的正偏差区位于陆地和热带对流区, 其主要原因是模拟的陆表温度偏高和对流区水汽偏少 (图略)。在 SES2\_tdk (图 3c、3d) 试验中, 主要对流区 OLR 的正偏差减小了 3—7  $W/m^2$ , 这与 SES2 中对水汽吸收的增强有关。引入几类主要温室气体后, 由图 3e、3f 可见, SES2\_tdktr 试验模拟全球多数地区出射 OLR 明显减少, 在对流活跃区域正偏差减小达 10  $W/m^2$  以上, 在很多海洋地区模拟的 OLR 已经接近 ERBE 观测结果; 北半球多数陆地地区较大的 OLR 正偏差也有所减弱。

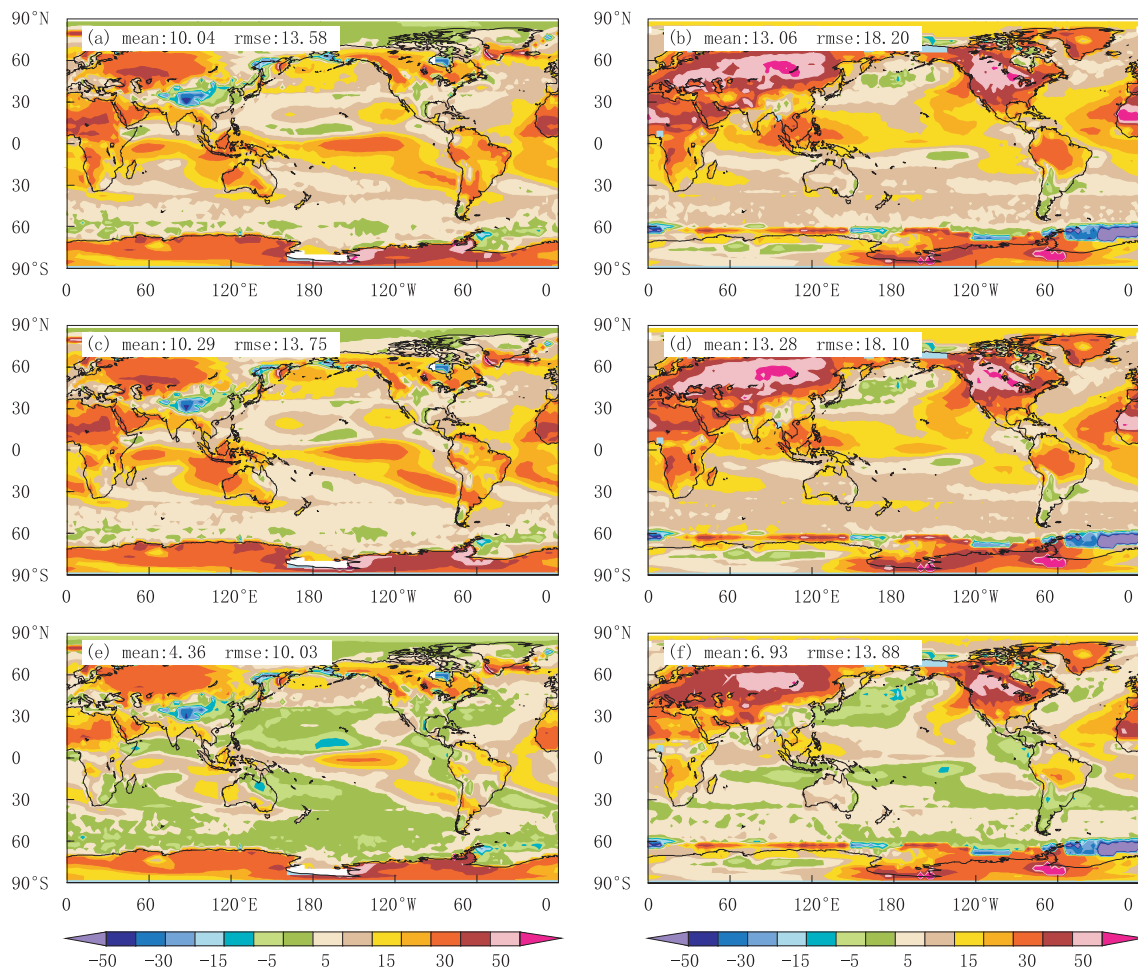


图3 不同辐射方案模拟和观测晴空 OLR 的差值场空间分布  
(a 和 b 是冬季和夏季 SES1-tdk 和 ERBE 之差, c 和 d 是冬季和夏季 SES2-tdk 与 ERBE 之差,  
e 和 f 是冬季和夏季 SES2-tdktr 与 ERBE 之差;单位:  $W/m^2$ )

Fig. 3 The difference of clear-sky OLR between the simulated and the observed results

(a and b: the difference between SES1-tdk and observation; c and d: between SES2-tdk and observation;  
e and f: between SES2-tdktr and observation; a, c and e are for DJF; b, d and f are for JJA; unit:  $W/m^2$ )

尽管 SES2 和 SES1 模拟的纬向平均晴空地表入射 SW 的差异并不是很大(图 2a、2c),但是两者的空间分布还是有明显的差异。图 4 给出了不同辐射方案模拟和观测晴空地表入射 SW 差值场的空间分布。由图 4a、4b 可见,采用 SES1 方案时,入射 SW 整体偏大,北半球副热带地区、澳洲和南半球海洋地区正偏差超过  $20 W/m^2$ ,已进行的敏感性试验表明部分原因是没有考虑这些地区气溶胶对 SW 的衰减作用;此外,模拟的大气低层水汽偏少也使得入

射 SW 偏大,特别是在热带对流地区。SES2-tdk 试验(图 4c、4d)中,上述大陆地区地表入射 SW 的变化并不明显,但在冬季和夏季的对流活跃地区,相比 SES1-tdk 入射 SW 减小了  $2-7 W/m^2$ ,说明 SES2 方案中水汽对 SW 的吸收有明显增加。在 SES2-tdktr 试验(图 4e、4f)中,全球范围内地表入射 SW 的偏差进一步减小,在夏半球中高纬度 SW 正偏差的减小更为明显,这是  $O_2$ 、 $CH_4$  和  $N_2O$  的引入增加了对 SW 吸收所致。

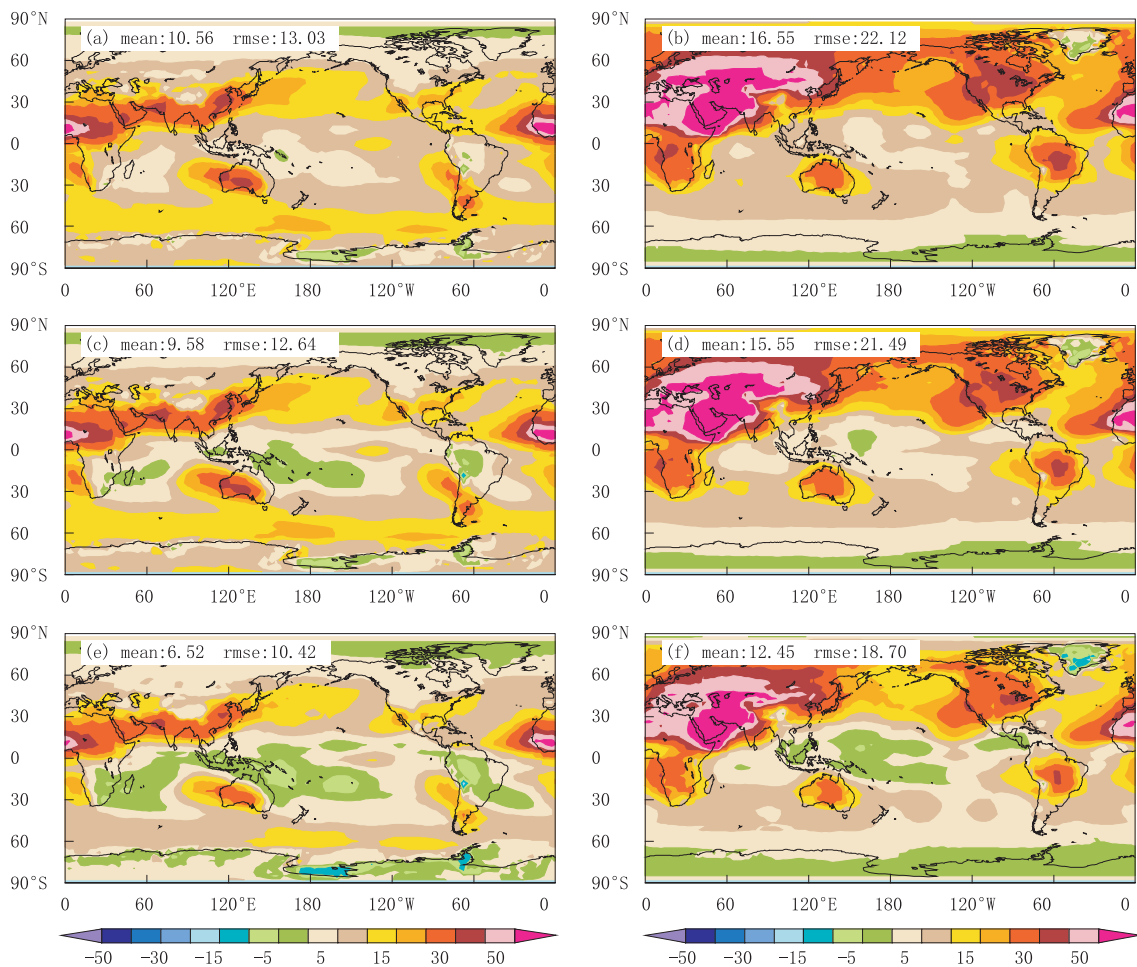


图4 同图3,但为晴空地表入射SW

Fig. 4 As in Fig. 3 but for clear-sky incident SW at surface

## 4 积云对流过程对大气辐射通量的影响

### 4.1 试验设计

由以上分析可知,引入 SES2 辐射方案和 7 种均匀混合气体后,可以减小 TOA 出射 LW 和地表入射 SW。然而和观测相比,大气辐射通量偏差依然很大,主要原因在于模拟的云量和云水含量偏少,大气低层水汽(特别是对流活跃区)水汽偏少。这与模式中现有的 Tiedtke 对流方案模拟能力不足有直接关系(刘屹岷等,2007)。为此,本文又设计了第 2 组试验,将 Tiedtke 对流方案换成新 Z-M(Zhang, et al, 2005) 积云对流方案,模式积分和其他设置同 SES2\_tdktr,记为 SES2\_zmtr,以此研究对流过程改善后辐射通量的变化。

积云对流参数化过程不仅可以产生强烈的降

水,而且其较强的垂直运动会直接影响大气中温度、水汽的垂直分布,大气的可降水量随之改变(刘屹岷等,2007;宋晓亮,2005;Zhang, et al, 2005)。在晴空条件下大气中的水汽是影响辐射通量及其空间分布的最主要因子之一。因此,图 5 给出了两种积云对流方案模拟和观测的大气可降水量空间分布。由图 5 可见, Tiedtke 方案模拟的热带对流区大气可降水量明显偏少,双赤道辐合带现象明显(图 5a、5b);而采用新 Z-M 方案(图 5c、5d)后,虽然在大陆地区、印尼海洋性大陆和西太平洋等地区观测仍有差异,但热带对流区大气可降水量明显增加,双赤道辐合带现象减弱,大气可降水量的总体空间分布比 Tiedtke 方案结果更为合理。同时,对流过程的改进也使得模式中诊断云量和云水含量有所改善,和 SES2\_tdktr 相比, SES2\_zmtr 模拟的总云量、云水



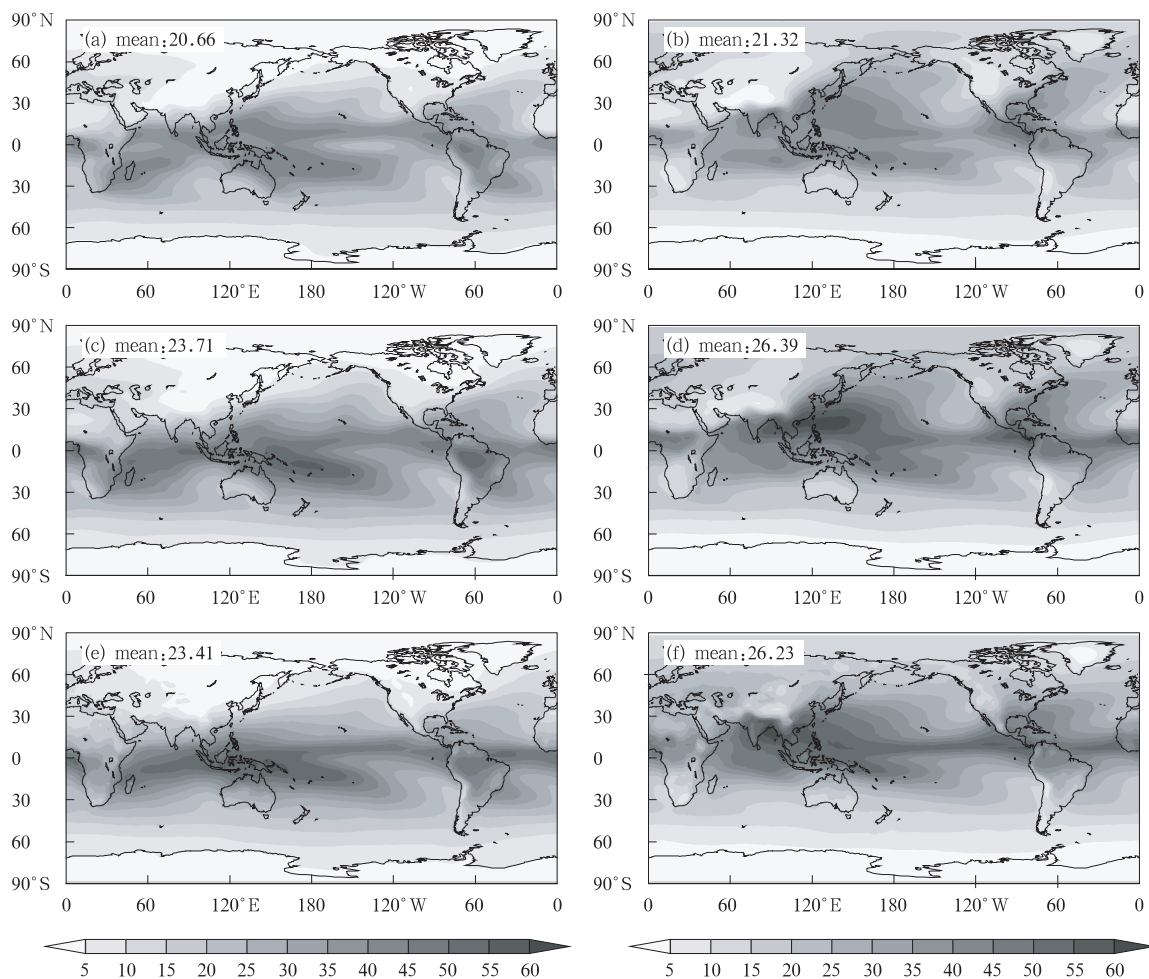


图5 Tiedtke 对流方案(a和b)、新 Z-M 对流方案(c和d)模拟的和观测(e和f)的大气可降水量空间分布 (a、c和e为冬季;b、d和f为夏季;单位:mm/d)

Fig. 5 Atmospheric precipitable water derived from two convective parameterization schemes and the observation (a and b are from the Tiedtke scheme; c and d are from the new Z-M scheme; e and f are NVAP observations; a, c and e are for DJF; b, d and f are for JJA; units: mm/d)

含量和云的光学厚度均明显增加(图略)。

#### 4.2 全球平均能量收支

表2给出了两种对流方案模拟和观测的全球年平均大气辐射通量。由表2可见,和SES2\_tdktr相比,SES2\_zmtr模拟的TOA晴空净入射SW变化不大,但是云天净SW的负偏差减小了近 $18\text{ W/m}^2$ ;晴空OLR的正偏差减小了约 $3\text{ W/m}^2$ ,云天OLR正偏差减小了约 $7\text{ W/m}^2$ 。同时,模拟的云辐射强迫,特别是SW云辐射强迫明显增加。晴空OLR改进的主要原因是模拟的大气水汽总量有了明显增加。云天入射SW和OLR的改进除了和水汽有关外,模拟的云量及云水含量增加也是重要原因。

由于模拟的水汽和云水含量的增加,大气吸收的SW也增加 $3\text{ W/m}^2$ 以上,其中晴空大气吸收的SW已经非常接近观测结果。相应的,SES2\_zmtr模拟的地表入射SW减小,其中云天入射SW与观测的正偏差减小了近 $24\text{ W/m}^2$ ;地表入射LW也明显增加,其中云天地表入射LW负偏差减小了近 $12\text{ W/m}^2$ 。

由表2还可以看出,随着SW和LW辐射通量改进之后,TOA总能量收支也有了明显改善,和观测的偏差不到 $0.6\text{ W/m}^2$ 。虽然能量收支的分量仍有偏差,但和第1组试验结果相比,SES2\_zmtr各分量的偏差明显减小。

表2 两种对流方案模拟和观测的全球年平均大气辐射通量  
Table 2 Global annual mean radiative fluxes simulated by the two convective parameterization schemes in comparison with the observations

	辐射通量( $W/m^2$ )	SES2-tdk	SES2-zm	观测数据
模式顶	云天净 SW	270.90	252.80	234(a)
	晴空净 SW	293.07	293.43	289(a)294(e)
	SW 云辐射强迫	-22.23	-40.63	-54(a)
	云天 OLR	260.43	253.36	234(a)
	晴空 OLR	269.52	266.48	264(a)
	LW 云辐射强迫	9.06	13.12	30(a)
	能量收支	10.47	-0.56	0(a)
	总云量	0.365	0.538	0.67(b)
地表	云天入射 SW	231.51	207.37	189(b)
	云天净入射 SW	202.41	180.13	165(b)
	晴空入射 SW	256.97	254.06	248(b)
	晴空净入射 SW	225.10	222.43	217(b)
	云天入射 LW	324.32	336.90	343(b)
	晴空入射 LW	319.79	319.74	313(b)
	净出射 LW	80.11	66.19	49(b)
大气	云天吸收 SW	68.49	72.67	69(b)
	晴空吸收 SW	67.97	71.00	72(b)

注: a 是 ERBE 卫星观测; b 是 ISCCP 卫星观测; c 是 Wild 估算结果; e 是 CERES 卫星观测。

a is from ERBE, b from ISCCP, c from Wild, and e from CERES

由 SAMIL-R42L26 模拟的 TOA 能量收支季节变化(图 6)可见, SES1-tdk 和 SES2-tdktr 所模拟的 TOA 能量收支明显高于观测值, 4—9 月与观测偏差稍小, 但最小偏差也在  $1.0 W/m^2$  以上, 而冬季

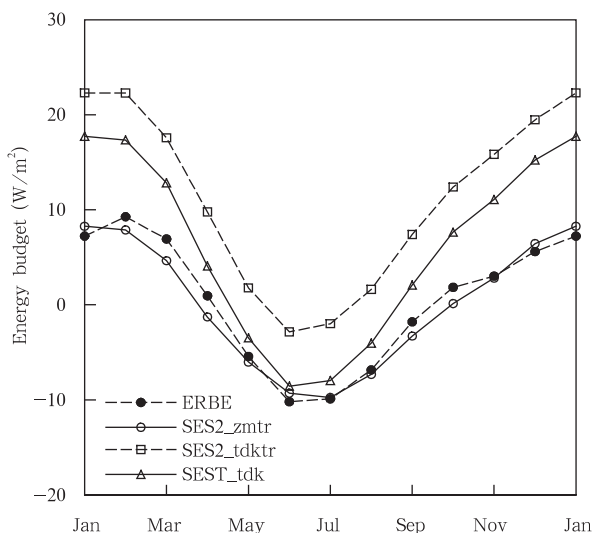


图6 SAMIL-R42L26 模拟的 TOA 能量收支季节变化(单位:  $W/m^2$ )

Fig. 6 Annual cycle of energy budget at TOA as simulated by the SAMIL-R42L26 model using new radiation and convection schemes in comparison with the observations (Unit:  $W/m^2$ )

的正偏差非常明显, 最大正偏差超过  $10 W/m^2$ 。虽然 SES2-tdktr 试验模拟的大气辐射通量好于 SES1-tdk, 但其能量收支各项的偏差并没有同步减小, 所以 TOA 能量收支偏差依然很大。采用 SES2 辐射方案和新 Z-M 积云对流方案(SES2-zmtr)后, TOA 能量收支的年变化趋于合理, 基本消除了之前试验中秋冬季能量收支偏大的现象, 接近 ERBE 观测。这主要是因为 SES2-zmtr 试验中模拟的云量(特别是冬季云量)和大气水汽总量明显增加所致。

#### 4.3 OLR 和地表入射 SW 的纬向分布

图 7 是两种对流方案模拟和观测 OLR 的纬向平均分布。由图 7a、7c 可见, 由于水汽含量增加, SES2-zmtr 模拟的 OLR 明显好于 SES2-tdktr 结果, 晴空条件下热带和南半球海洋地区的结果和观测基本一致。在北半球陆地和南极大陆地区, 模拟的晴空 OLR 仍高于观测结果, 主要是这些地区地表温度偏高所致。在云天条件下, SES2-zmtr 模拟的 OLR(图 7b、7d)正偏差也有减小, 但是仍然整体高于观测结果。这种正偏差除了地表温度偏高外, 还和当前模式中云相关属性的模拟偏差有关。

图 8 是两种对流方案模拟和观测的地表入射 SW 纬向平均分布。在中高纬度, SES2-zmtr 和 SES2-tdktr 模拟的晴空入射地表 SW 均高于观测

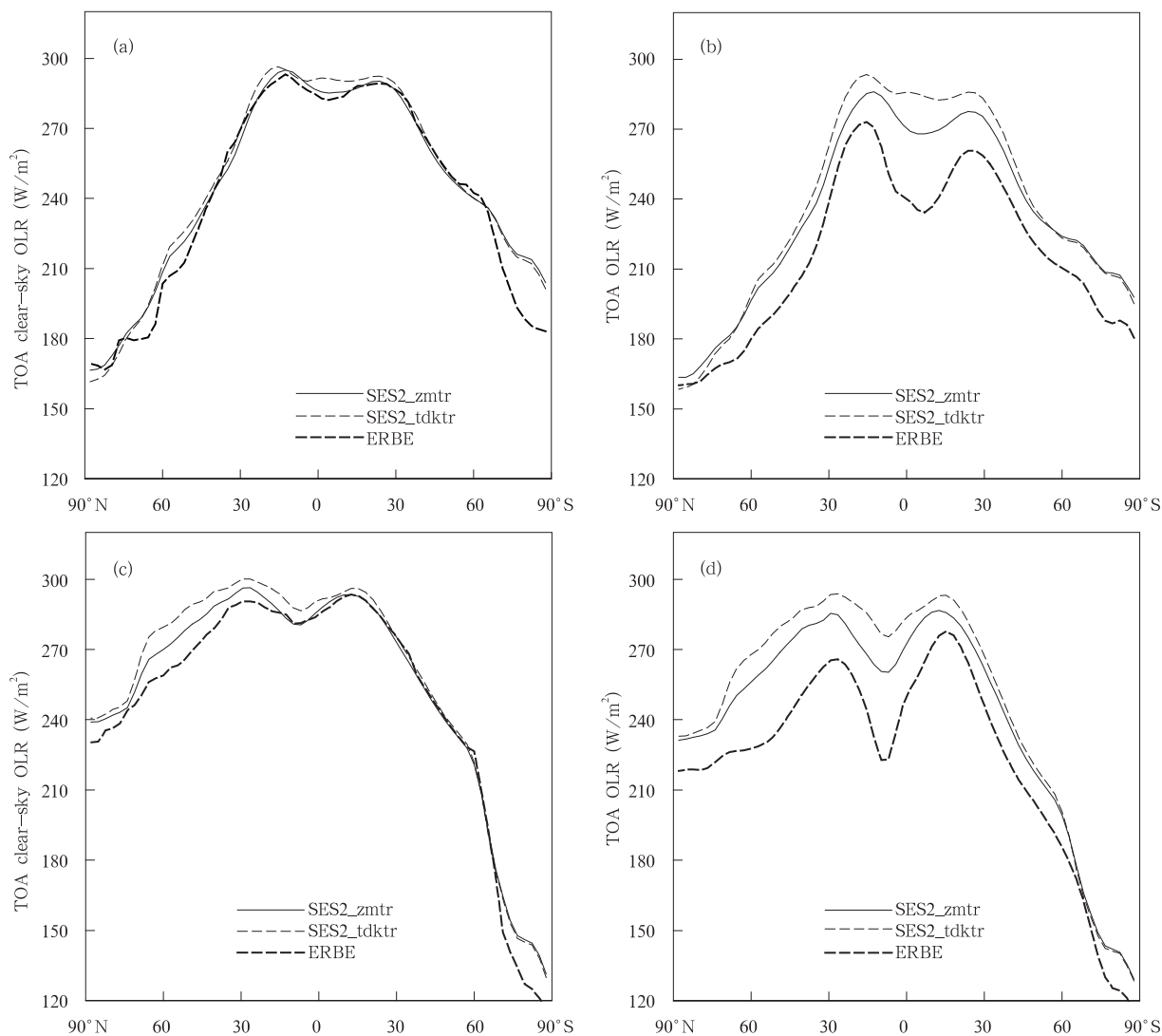


图7 两种对流方案模拟和观测的OLR纬向平均分布

(a和c分别是冬季和夏季晴空OLR; b和d分别是冬季和夏季云天OLR; 单位:  $\text{W}/\text{m}^2$ )

Fig. 7 Zonal mean OLR derived from the two convection schemes and the observation

(a and c are clear-sky OLR in DJF and JJA, respectively; b and d are cloudy-sky OLR in DJF and JJA, respectively; Unit:  $\text{W}/\text{m}^2$ )

结果,尤其是夏季北半球中高纬度地区,这与当前模式中并没有考虑气溶胶的辐射效应有关;比较而言,SES2\_zmtr模拟的正偏差有所减小(图8a、8c)。云天条件下,在热带和副热带地区SES2\_zmtr模拟的入射地表SW正偏差明显减小,在热带一些地区正偏差减小 $40 \text{ W}/\text{m}^2$ 以上,已经接近观测。这是引入新Z-M对流方案后,模拟的热带地区云量及云水含量明显增加所致。同时从图8b、8d可以看出,在中高纬度地区,SES2\_zmtr模拟的入射地表SW虽然好于SES2\_tdktr结果,但其模拟偏差仍然很大;除气溶胶作用外,仍然与这些地区云相关属性的模拟

偏差有关。

#### 4.4 晴空OLR和地表入射SW的空间分布

图9给出了新Z-M对流方案模拟和观测晴空OLR差值场的空间分布。由图9a、9c可见,引入新Z-M对流方案后,随着强“双赤道辐合带”现象减弱,在多数海洋地区模拟的晴空OLR和观测的偏差在 $5-10 \text{ W}/\text{m}^2$ ,已经进入允许的误差范围以内(Barkstrom, et al, 1990; Rieland, et al, 1991; Sohn, et al, 2006);在冬季赤道中东太平洋(图9a)和夏季海洋性大陆地区(图9c),模拟的晴空OLR较SES2\_tdktr试验(图3e、3f)减小了 $5 \text{ W}/\text{m}^2$ 左右,更趋合

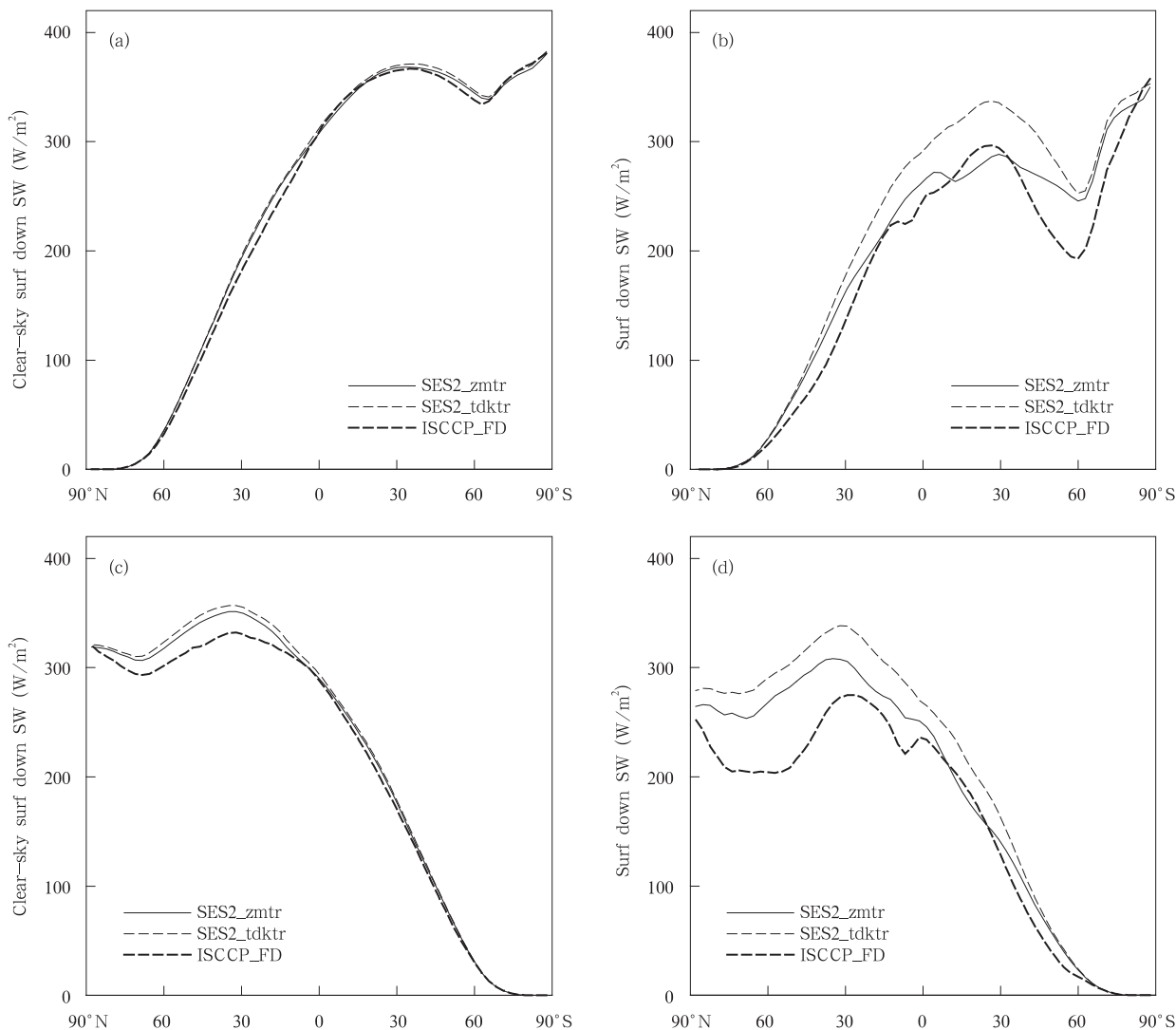


图 8 同图 7, 但为地表入射 SW

Fig. 8 As in Fig. 7 but for incident SW at surface

理。在夏季西太平洋地区(图 9c), 由于模拟的对流太强, 该地区晴空 OLR 和观测相比偏小。除南北极部分地区外, 和 SES2\_tdktr 结果相比, 在多数大陆地区 SES2\_zmtr 模拟的晴空 OLR 进一步减小, 更接近观测。除了大气水汽量增加外, 这些大陆地区地表温度降低也是原因之一。

图 9b、9d 还给出了新 Z-M 对流方案模拟和观测晴空地表入射 SW 差值场的空间分布。由于大气水汽总量增加, 不论是赤道辐合带还是大陆地区, SES2\_zmtr 模拟的地表入射 SW 较 SES2\_tdktr 结果(图 4e、4f)整体减小, 但在冬季中北部非洲、阿拉伯半岛、南亚和东亚地区以及澳洲(图 9b)以及夏季北半球大陆地区(图 9d), 虽然晴空入射 SW 较

SES2\_tdktr 试验相比明显减小, 但与 ISCCP 观测相比还是存在较大正偏差, 主要因为没有考虑气溶胶作用, 同时这些大陆地区大气水汽含量偏少也是偏差的主要原因之一。而在西太平洋地区出现的入射 SW 负偏差仍然与偏强的对流有关。

## 5 结论与讨论

本文利用 SAMIL-R42L26 模式研究了不同辐射过程和积云对流过程对大气辐射通量模拟的影响, 包括全球年平均的辐射通量以及冬、夏季 TOA 出射 OLR 和地表入射 SW 等辐射通量的变化。试验结果表明:

(1) 新辐射方案 SES2 中增加了辐射计算的谱

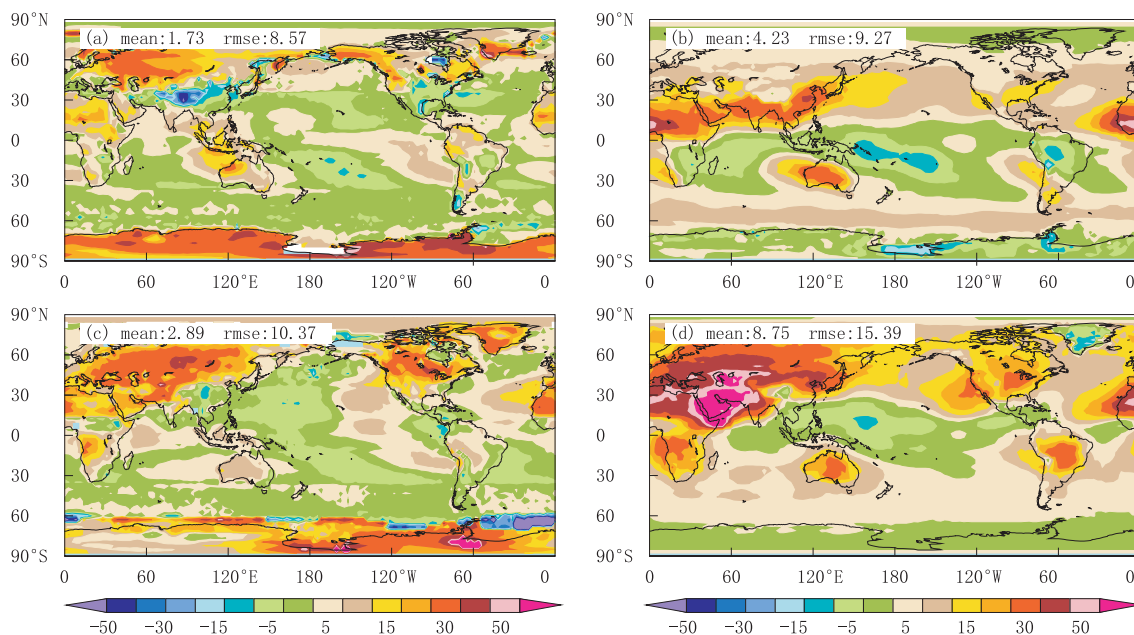


图9 新 Z-M 对流方案模拟与观测晴空 OLR 和地表入射 SW 的差值场空间分布  
(a 和 c 分别是冬季和夏季晴空 OLR; b 和 d 分别是冬季和夏季晴空地表入射 SW; 单位:  $W/m^2$ )

Fig. 9 The difference of clear-sky OLR (a, c) and incident SW at surface (b, d) between the results derived from the new Z-M convection scheme and the observation  
(a and c for clear-sky OLR in DJF and JJA, respectively; b and d for clear-sky incident SW at surface in DJF and JJA, respectively; Unit:  $W/m^2$ )

分辨率,采用了较新的气体吸收系数,从而明显增强了对气体吸收的模拟能力,在对流活跃区域和赤道辐合带增强了对水汽吸收的模拟,使得上述区域晴空 OLR 和入射地表 SW 与观测的偏差有所减小。在 SES2 中引入  $CH_4$  和  $N_2O$  等均匀混合温室气体后,不仅仅在对流活跃区域,在全球范围内,SES2 模拟的晴空和云天 OLR 正偏差明显减小,地表入射 SW 的正偏差也较 SES1 结果有所减小。此外,TOA 出射的 SW、大气向下的 LW 和大气吸收 SW 与观测的偏差均有不同程度的减小,好于原辐射方案 SES1 的结果。

(2) 换用新对流方案后使得之前存在的偏强“双赤道辐合带”现象明显减弱,大气含水量、云量和云水含量均有了明显增加,TOA 出射和地表入射辐射通量均有了进一步改进,其中在海洋地区模拟的晴空 OLR 已接近观测。能量收支的各项与观测的偏差大幅减小,相应的模拟的全球年平均 TOA 能量收支和观测偏差不到  $0.6 W/m^2$ ,而且其季节变化也和观测基本相符。

尽管有上述改进,SAMIL-R42L26 模拟的大气

辐射通量和观测相比仍然存在一些偏差。例如,模拟的北半球中纬度陆地晴空地表入射 SW 偏高,其原因之一就在于当前试验方案中没有考虑气溶胶的辐射效应。在多数大陆地区,模拟的晴空 OLR 偏高,这与模拟的地表温度偏高有关。同时,模拟的云量、云水含量的量值及其空间分布并不尽合理,同样的问题亦存在于水汽的模拟。这些偏差都会直接影响大气辐射通量的模拟,进而影响 TOA 和地表的能量收支。因此,模式中的云物理过程、积云对流方案和陆面过程还需要进一步改进。此外,在热带强对流区和高纬度地区,ERBE 和 ISCCP FD 等卫星观测资料均存在一些偏差,找到较好的参考资料分析云天大气辐射通量的空间分布也是进一步研究需要解决的问题。上述问题的研究和解决将为以后耦合气候模式发展和气候变化等方面研究提供保障。

致谢:感谢夏威夷大学的刘平博士提供的 Tiedtke 对流方案以及美国 Scripps Institution of Oceanography 的张广俊博士提供的新 Zhang-McFarlane 对流方案源程序。与夏威夷大学的王玉清博士就相关问题作了有益讨论,包庆和王在志博士在 SAMIL 模拟方面给予了很多帮助,在此表示感谢。

谢。同时感谢 CCSM 大气模式组提供的模式诊断包程序和附带观测资料。

## References

- Bao Qing, Liu Yimin, Zhou Tianjun, et al. 2006. The sensitivity of the spectral atmospheric general circulation model of LASG/IAP to the land process. *Chinese J Atmos Sci* (in Chinese), 30(6): 1077-1090
- Barkstrom B R, Harrison E F, Lee III R B. 1990. Earth radiation budget experiment. *Eos Trans Amer Geophys Union*, 71: 297-305
- Chou M D. 1992. A solar radiation model for use in climate studies. *J Atmos Sci*, 49: 762-772
- Collins W D, Ramaswamy V, Schwarzkopf M D, et al. 2006. Radiative forcing by well-mixed greenhouse gases: estimates from climate models in the intergovernmental panel on climate change (IPCC) fourth assessment report (AR4). *J Geophys Res*, 111: D14317, doi:10.1029/2005JD006713
- Dai Fushan. 2003. Impacts of low-level cloud over the eastern-Pacific on the "Double ITCZ" in an ocean-atmosphere coupled model-diagnostic analyses on LASG FGCM-0[D] (in Chinese). Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, 102-118
- Ding Yihui, Ren Guoyu, Shi Guangyu, et al. 2006. National assessment report of climate change (I): Climate in China and its future trend. *Adv Clim Change Res* (in Chinese), 2(1): 3-8
- Ebert E E, Curry J A. 1992. A parameterization of ice cloud optical properties for climate model. *J Geophys Res*, 97: 3831-3826
- Edwards J M, Slingo A. 1996. A studies with a flexible new radiation code I: Choosing a configuration for a large-scale model. *Quart J Roy Meteor Soc*, 122: 689-720
- IPCC. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. New York: Cambridge Univ Press
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Scientific Basis*. New York: Cambridge Univ. Press
- Kiehl J T, Hack J J, Hurrell J W. 1998. The energy budget of the NCAR community model: CCM3. *J Climate*, 11: 1151-1178
- Labs D, Neckel H. 1970. Transformation of the absolute solar radiation data into the "International piratical temperature scale of 1968". *Sol Phys*, 15: 79-87
- Li L J, Wang B, Wang Y Q, Wan H. 2007. Improvements in climate simulation with modifications to the Tiedtke convection parameterization in the grid-point atmospheric model of IAP LASG (GAMIL). *Adv Atmos Sci*, 24(2): 323-335
- Liu Yimin, Liu Kun, Wu Guoxiong. 2007. The impacts of the cumulus convective parameterization on the atmospheric water-content and rainfall simulation in SAMIL. *Chinese J Atmos Sci* (in Chinese), 31(6): 1201-1211
- Palmer T N, Shutts G J, Swinbank R. 1986. Alleviation for systematic westerly bias in general circulation and numerical weather prediction models through an orographic gravity wave drag parameterization. *Quart J Roy Meteor Soc*, 112: 1001-1039
- Qian Yongfu. 2002. Effects of the envelope orography and gravity wave drag on performance of climate modeling. *Quart J Appl Meteor* (in Chinese), 11(1): 13-20
- Randel D L, Greenwald T G, Vonder Harr T H, et al. 1996. A new global wapor dataset. *Bull Amer Meteor Soc*, 77: 1233-1246
- Raschke E, Ohmura A, Rossow W B, et al. 2005. Cloud effects on the radiation budget based on ISCCP data (1991-1995). *Int J Climatol*, 25: 1103-1125
- Rieland M, and Raschke E. 1991. Diurnal variability of the earth radiation budget: Sampling requirements time integration aspects and error estimates for the Earth Radiation Budget Experiment (ERBE). *Theor Appl Climatol*, 44: 9-24
- Shi Guangyu. 2007. *Atmospheric Radiation* (in Chinese). Beijing: Scientific Press, 402pp
- Slingo A. 1989. A GCM parameterization for the shortwave radiative properties of water clouds. *J Atmos Sci*, 46: 1419-1427
- Slingo J M. 1980. A cloud parameterization scheme derived from GATE data for use with a numerical model. *Quart J Roy Meteor Soc*, 106: 747-770
- Slingo J M. 1987. The development and verification of a cloud prediction scheme for ECMWF model. *Quart J Roy Meteor Soc*, 113: 899-927
- Sohn B J, Schmetz J, Stuhmann R, et al. 2006. Dry bias in satellite-derived clear-sky water vapor and its contribution to longwave cloud radiation forcing. *J Climate*, 19: 5570-5580
- Song Xiaoliang. 2005. The evaluation analysis of two kinds of mass-flux cumulus parameterizations in climate simulation [D] (in Chinese). Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 119-145
- Stamnes K, Tsay S C, Wiscombe W, et al. 1988. Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media. *Appl Optics*, 27: 2502-2509
- Sun Z, Rikus L. 1999a. Improved application of ESFT to inhomogeneous atmosphere. *J Geophys Res*, 104: 6291-6303
- Sun Z, Rikus L. 1999b. Parameterization of effective radius of cirrus clouds and its verification against observations. *Quart J Royal Meteor Soc*, 125: 3037-3056
- Sun Z. 2005. Parameterizations of radiation and cloud optical properties. *BMRC Research Report*, 1-6
- Tiedtke M. 1989. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Mon Wea Rev*, 117: 1779-1800
- Wang Y, Zhou L, Hamilton K P. 2007. Effect of convection entrainment/detrainment on simulation of tropical precipitation diurnal cycle. *Mon Wea Rev*, 135(2): 567-585
- Wang Zaizhi, Wu Guoxiong, Liu Ping, et al. 2005. The development

- of GOALS/LASG AGCM and its global climatological features in climate simulation I: Influence of horizontal resolution. *J Tropical Meteor(in Chinese)*, 21(3):225-237
- Wang Zaizhi, Yu Rucong, Wang Pengfei, et al. 2005. The development of GOALS/LASG AGCM and its global climatological features in climate simulation II: The increase of vertical resolution and its influence. *J Tropical Meteor(in Chinese)*, 21(3): 238-247
- Wang Zaizhi, Yu Rucong, Bao Qin, et al. 2007. A comparison of the atmospheric circulations simulated by the FGOALS-s and SAMIL. *Chinese J Atmos Sci(in Chinese)*, 31(2):202-213
- Wild M, Long C N, Ohmura A. 2006. Evaluation of clear-sky solar flux in GCMs participating in AMIP and IPCC-AR4 from a surface perspective. *J Geophys Res*, 111:D01104. 1-D01104. 15
- Wild M, Ohmura A, Gilgen H, et al. 1998. The disposition of radiative energy in the global climate system: GCM-calculated versus observation estimates. *Climate Dyn*, 14:853-869
- Wild M, Roeckner E. 2006. Radiative fluxes in the ECHAM5 general circulation model. *J Climate*, 19:3792-3809
- Wu G X, Liu H, Zhao Y C, et al. 1996. A nine-layer atmospheric general circulation model and its performance. *Adv Atmos Sci*, 13(1):1-18
- Wu T W, Liu P, Wang Z Z, et al. 2003. The performance of atmospheric component model R42L9 of GOALS/LASG. *Adv Atmos Sci*, 20(5):726-742
- Zhang G J, Mu M Q. 2005. Effects of modifications to the Zhang-McFarlane convection parameterization on the simulation of the tropical precipitation in the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model, version 3. *J Geophys Res*, 110:D09109, doi:10.1029/2004JD005617
- Zhang X H, Shi G Y, Liu H, et al. 2000. IAP Global Ocean-Atmosphere-land System Model(in Chinese). Beijing: Science Press, 252pp
- Zhang T, Wang G X, Guo Y F. 2002. Energy budget bias in global coupled ocean-atmosphere-land model. *Acta Meteor Sinica(in Chinese)*, 60(3):278-289
- Zhou Tianjun, Yu Rucong, Wang Zaizhi, et al. 2005. Atmosphere Circulation Model SAMIL and the Full Coupled Model of FGOALS-s(in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 288pp
- Zhou T J, Wang Z Z, Yu R C, et al. 2005. The climate system model FGOALS-s using LASG/IAP spectral AGCM SAMIL as its atmospheric component. *Acta Meteor Sinica(in Chinese)*, 63(5): 702-715

### 附中文参考文献

- 包庆, 刘屹岷, 周天军等. 2006. LASG/IAP 大气环流谱模式对陆面过程的敏感性试验. *大气科学*, 30(6):1077-1090
- 戴福山. 2003. 东太平洋低云对海气耦合模式中“双辐射带”的影响-基于 LASG FGCM-0 的分析研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 102-118
- 丁一汇, 任国玉, 石广玉等. 2006. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势. *气候变化研究进展*, 2(1):3-8
- 刘屹岷, 刘琨, 吴国雄. 2007. 积云对流参数化方案对大气含水量及降水的影响. *大气科学*, 31(6):1201-1211
- 钱永甫. 2002. 包络地形和重力波拖曳对气候模拟效果的影响. *应用气象学报*, 11(1):13-20
- 宋晓良. 2005. 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[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, p119-145
- 王在志, 吴国雄, 刘平等. 2005. 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*, 21(3):225-237
- 王在志, 宇如聪, 王鹏飞等. 2005. 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 II: 垂直分辨率的提高及其影响. *热带气象学报*, 21(3):238-247
- 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. *大气科学*, 31(2):202-213
- 石广玉. 2007. 大气辐射学. 北京: 科学出版社, 402pp
- 张韬, 吴国雄, 郭裕福. 2002. 海-陆-气全球耦合模式能量收支的误差. *气象学报*, 60(3):278-289
- 周天军, 宇如聪, 王在志等. 2005. 大气环流模式 SAMIL 及其耦合模式 FGOALS-s-亚洲季风区海-陆-气相互作用对我国气候变化的影响(第四卷). 北京: 气象出版社, 288pp
- 周天军, 王在志, 宇如聪等. 2005. 基于 LASG/IAP 大气环流谱模式的气候系统模式. *气象学报*, 63(5):702-715