

两组辐射方案对中国短期天气过程影响的比较和探讨

王 曼¹ 沈元芳² 韩慎友³ 钟 青³ 寿绍文⁴

1 云南省气象科学研究所, 昆明 650034

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

4 南京信息工程大学大气科学系, 南京 210044

摘 要 为了比较长短波辐射方案对中国短期天气过程模拟的影响, 并进一步完善中尺度模式 MM5 中的辐射过程的参数化方案, 将 WRF 中 Goddard 短波辐射参数化方案移植到模式 MM5 中。利用移植的方案和 MM5 模式原有的参数化方案, 设计了两组试验方案。通过对 2002 年第 16 号台风个例和 2002 年 12 月 19~24 日北方降雪个例模拟, 结果表明: 选用不同的辐射参数化方案对两个个例模拟结果具有较明显的影响, 较详细的长短波辐射参数化方案组合模拟的各种辐射量和云更加细致合理地反映地形、台风、副高和槽脊的结构和位置; 台风降水中心强度改进近三分之一, 北方降雪强度也有一定的改进, 更加接近实况。

关键词 辐射参数化 短期预报 数值试验 MM5 模式

文章编号 1006-9895(2005)04-0654-17

中图分类号 P435

文献标识码 A

Impact of Two Group Radiation Parameterization Schemes on Simulation of Short-Range Weather Process in China

WANG Man¹, SHEN Yuan-Fang², HAN Shen-You³,
ZHONG Qing³, and SHOU Shao-Wen⁴

1 *Yunnan Institute of Meteorology, Kunming 650034*

2 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

3 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of sciences, Beijing 100029*

4 *Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

Abstract In order to compare the impact of radiation parameterization schemes on simulated short-range weather process and improve the radiation parameterization schemes in Mesoscale Model Version 5 (MM5), the scheme of Goddard short-wave radiation parameterization has been replanted from Weather Research and Forecast Model (WRF) to MM5. With the planted scheme and radiation parameterizations in MM5 two groups of experiment schemes have been designed to simulate ‘Sinlaku’ typhoon (2002) and the case of snowfall occurred in 19-24 December 2002. The results show that selection of radiation parameterization schemes has distinct impact on the simulation. The results simulated by the group with the detailed long-wave and short-wave radiation parameterization scheme reflect the structure and location of cloud and radiation on plateau terrain, typhoon, subtropical high and trough/ridge more particularly and reasonably; the intensity of typhoon rain center is improved about 1/3, and there

收稿日期 2004-01-14, 2004-06-10 收修定稿

基金项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-213 和国家自然科学基金资助项目 49675267

作者简介 王曼, 女, 1978 年出生, 硕士, 目前从事中尺度天气动力学研究。E-mail: wangmanbox@sina.com

are also some improvements on the intensity of north heavy snow, which more approaches the observation.

Key words radiation parameterization, short-range forecast, numerical experiment, MM5

1 引言

因为计算工作量较大, 过去有些模式通常忽略或简化对辐射过程的描述。可是, 由于辐射过程对长期天气过程和气候变化的重要性, 辐射参数化首先在中长期数值天气预报模式、大气环流模式和气候模式中得到广泛的应用。关于辐射过程对模式的气候模拟、中期和月的预报影响, 沈元芳等^[1, 2]进行过详细的研究。随着计算机条件的改善和中尺度模式的发展, 人们也逐渐认识到辐射对短期过程和中小尺度天气系统也是十分重要。例如, 山谷风或海陆风就是由于辐射的日变化所造成的, 夏季午后常出现的雷阵雨也是与辐射密切相关。现今较完善的中尺度模式, 如 MM5 [美国宾州大学(The Pennsylvania State University, 简称 PSU)和国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, 简称 NCAR)的中尺度模式(Mesoscale Model Version 5)]、WRF[美国新一代研究预报模式(Weather Research and Forecast Model)]、ARPS[美国俄克拉荷马州大学“风暴分析预报中心”开发的非静力模式(Advanced Regional Prediction System)]等均包含辐射过程的处理。

PSU/NCAR 的中尺度模式 MM5 作为研究和天气预报业务最广泛的模式, 共包含四组辐射过程参数化方案。许多研究工作者^[3~8]对其中的各个参数化方案有详细描述。其中, 快速辐射传输模式 RRTM(Rapid Radiative Transfer Model)的长波方案是比较精确的长波方案, Mlawer 等^[7]曾用中纬度夏季、热带、中纬度冬季、亚北极冬季大气资料, 验证了 RRTM 相对逐线辐射传输模式 LBLTRM(line-by-line radiative transfer model)的精确性, 结果表明: 各纬度各谱带的净通量的误差为 $0.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 任意纬度总谱带 ($10 \sim 3000 \text{ cm}^{-1}$) 的误差小于 $1.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 对流层和低平流层冷却率误差为 $0.07 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$, 而平流层上部的误差达 $0.75 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$ 。但是与之相配合的短波参数化方案却是简单的云参数化方案。由于短波方案对长波计算、温度场和降水有着直接和间接的影响, 因此, 本文移植 21 世纪初叶国际先进水平的区域中尺度

模式 WRF 中比较详细的 Goddard 短波方案到 MM5 模式中, 试图对模式的模拟能力有所改进。通过对夏秋季节台风个例和冬季降雪个例的模拟, 对两组参数化方案所得的辐射量和降水结果进行初步分析, 发现辐射方案对短期天气的模拟有较明显的影响, 详细的长短波参数化组合方案的模拟结果更接近实况。

2 辐射参数化方案介绍和数值试验设计

2.1 辐射参数化方案介绍

MM5 模式提供了四组辐射参数化方案供选择:

第一组: 简单的冷却。大气冷却率仅根据温度变化, 没有考虑与云的相互作用和日变化。另外, 还需要地面辐射提供日变化的地面长短波辐射, 用于计算地面的能量收支。辐射通量根据大气柱中水汽的积分量和由相对湿度估算得到的高、中、低云量来计算。

第二组: 云辐射方案。该选项包括长波和短波参数化方案^[5], 简单计算了由于晴空散射和水汽吸收^[3], 以及由于云的反射和吸收^[4]引起的向下短波辐射通量。晴空情况下, 水汽吸收作为水汽量的函数来计算, 考虑近似的瑞利散射和气溶胶散射。有云情况下, 云的后向散射(或反射)和吸收根据 μ 和 $\ln(w/\mu)$ 的双线性插值得到, 其中 w 为垂直积分的液态水特征, μ 为太阳天顶角的余弦。在计算液态水路径时, 考虑各种液态水和固态水(包括云水、云冰、雨、雪和霰)的贡献。这是云方案的特征。对长波也是根据云和水汽简单地计算了通量(根据文献^[4])。此方案提供大气温度变化倾向和地面辐射通量。

第三组: CCM2(Community Climate Model)辐射方案。多谱带处理长短波, 但云的处理不是在可分辨云的基础上, 而是在相对湿度基础上。其中短波散射吸收用 δ -Eddington 近似。它能很好地处理多次散射, 适合于大的网格距和长时间的积分。由于这次比较试验中没有应用, 这里就不详细介绍(可参看文献^[6])。

第四组: RRTM 长波方案。这个方案是由美

国大气环境研究中心的 Mlawer 等^[7]研制的,是一个在通量和冷却率计算精度上可和逐线模式一致的快速辐射传输模式。RRTM 方案主要特色是用 k 分布的方法表示水汽、二氧化碳、臭氧的吸收谱。这主要是由于谱积分在计算中花费的时间最多,应用 k 分布方法能进行极大的简化^[9]。其中 k 分布的系数直接从逐线辐射传输模式 (LBLRTM) 获得,因此达到了与逐线方法接近的精度,又极大地减少了辐射运算的时间。而且 RRTM 长波方案利用相关 k 分布方法,能处理一般带模式不能处理的多次散射。在模式计算中,这个方案是 RRTM 长波与云的短波方案一起用。

鉴于第四组方案中,长波的处理比较先进,但与它相配合的短波云的方案却相对简单,为了更加完善模式的辐射过程的参数化,我们移植了 NCAR 和美国国家大气海洋局 (NOAA) 的新一代中尺度模式 WRF 中的 Goddard 短波方案到 MM5 中,这个方案是 Chou 和 Suarez 等^[8]在 NASA/GSFC (Goddard Space Flight Center) 气候和辐射分部研制的,是一个复杂的谱方案。已经用于 Goddard 大气实验室的各种大气模式,包括一个大气环流模式^[10] (GCM)、一个中尺度模式 (MM) 和一个云体模式 (CEM)^[11],它计算了由于水汽、臭氧、二氧化碳、氧气、云和气溶胶的吸收,以及由于云、气溶胶和各种气体的散射产生的太阳辐射通量。依赖吸收的性质,不同的方法应考虑用不同的吸收物。在紫外 (UV) 和可见光 (PAR) 区域,谱段分为 8 个带,主要考虑了臭氧的吸收和瑞利散射。在红外,谱段被分为 3 个带,应用了 k 分布方法,主要考虑水汽吸收,各谱带用了 10 个吸收系数。氧气和二氧化碳造成的通量减少分别从简单的函数和预先计算好的表^[8]中得到。

在云和气溶胶存在的层次中,反射和透射的计算应用 δ -Eddington 近似,通量的计算采用二流累加近似。对云冰/水质点分别进行参数化。对于一个云层来说,光学厚度作为云冰/水含量和有效质点大小的函数参数化,而单次散射反照率和不对称因子则作为有效质点大小的函数来参数化。对不同层次云的重叠用最大的随机近似。气溶胶的光学性质可以作为谱带、高度的函数输入参数到辐射模式中。

这个模式的一个显著特征就是包括许多次吸收

带造成的吸收。在这些次吸收带中的个别吸收是小的,但集合起来的影响是大的,大约是大气加热率的 10%,对辐射参数化方案的比较和验证在多数情况下可用精确的辐射模式,例如逐线模式 (line-by-line, 简称 LBL) 或窄带模式 (narrow band model, 简称 NBM) 作为参考。Chou 和 Suarez 等^[8]曾仔细地对本文使用的辐射方案与高分辨率的精确计算作了验证,结果表明,在所有谱带和吸收物上积分,地面加热可精确到高分辨率计算的 10^0 量级 (单位: $W \cdot m^{-2}$),从 0.01 hPa 到地面之间大气的加热率精度在 5% 之内。

Goddard 短波方案移植到 MM5 模式后,需要输入云量、温度、整层气压、半层气压、反照率、水汽混合比、云水混合比、云冰混合比、经纬度等量。其中云量依据 WRF 模式中的方法用云冰和云水来判断,然后输入到短波方案中。其他的量都从模式直接输入到短波方案中。

2.2 数值试验方案设计

由于来自太阳辐射和来自地球辐射的电磁波谱分布几乎没有重叠,因此,一般模式中对长波辐射和短波辐射可以分别进行参数化。模式 MM5 也是如此处理。为了比较参数化方案的差别,根据 MM5 模式本身的方案和移植的 Goddard 短波方案设计了两组辐射过程的试验方案 (表 1)。

表 1 两组试验方案所选用的长波短波参数化方案
Table 1 The long and short wave parameterization schemes in the two groups of experiments

试验 Expt	参数化方案 Parameterization scheme
A 方案 Scheme A	MM5 中云的长波方案
	Long-wave scheme of cloud in MM5
	MM5 中云的短波方案
B 方案 Scheme B	Short-wave scheme of cloud in MM5
	MM5 中 RRTM 长波方案
	RRTM scheme in MM5
	Goddard 短波方案 (从 WRF 中移植)
	Goddard short-wave scheme from WRF

3 数值试验

3.1 模式 MM5 参数设置及个例简介

本文所用的是美国宾州大学和国家大气研究中心的非静力中尺度模式 (MM5V3 版本),该模式包括比较完整的物理过程。本文模拟中模式具体的参数设置如下 (未加特别说明的表示两个例参数设置

相同)：

一重网格，中心定位于(27°N, 112°E)；格距 60 km，格点数为 85×120，区域基本包括整个中国，积分时间步长 60 s，辐射步长 1800 s。模式顶气压为 10 hPa，垂直分层 σ 方向上为 23 层。云和降水物理过程：可分辨尺度降水采用简单冰方案(台风个例)和 Reisner graupel 方案(降雪个例)；不可分辨尺度降水采用 Bettes-miller 方案。边界层参数化方案选取了高分辨率 MRF (Medium Range Forecast) 方案。资料为 NCEP/NCAR 再分析数据集逐日高空资料子集中的资料，每日 4 个时次，分辨率为 1.0°×1.0°。个例 1 的初值为 2002 年 9 月 6 日 12 时(国际协调时间，下同)，积分 48 h；个例 2 的初值为 2002 年 12 月 20 日 12 时，积分 72 h。

个例 1 为 2002 年 16 号台风“森拉克(Sin-laku)”，是浙江近 5 年登陆最强的台风。“森拉克”是 9 月 7 日 10 时 30 分在浙江省南部苍南县登陆的，中心气压 965 hPa，近中心风力达 12 级。登陆后向偏西方向移动，经闽北于 8 日 00 时到达闽、赣交界处，强度减弱为热带低压。受其影响，北京时间 7 日 00 时~8 日 00 时，浙江大部、福建北部等地出现了大到暴雨、局部大暴雨和特大暴雨天气。降雨量一般为 30~60 mm，其中浙江东部沿海、福建东北部地区的降雨量为 70~

100 mm。大于 100 mm 的站点有：浙江大陈岛 134 mm、玉环 128 mm、洞头 144 mm，福建福鼎 178 mm、柘荣 198 mm。以此个例作为夏秋台风季节的情况。为了进一步检验辐射方案对短期天气过程的作用，作者选取个例 2，2002 年 12 月 19~24 日北方降雪过程是我国北方入冬以来范围最大、持续时间最长的一次降雪过程。这次过程是由蒙古地区高空槽以及西伯利亚冷空气、中低纬切变线和低空急流共同作用造成的。北京、天津、河北、内蒙古中西部、山西、山东中北部、河南大部、陕西、甘肃、宁夏、青海北部以及新疆大部出现连续性的小到中雪，部分地区大到暴雪。累计降水量一般为 1~6 mm，其中北京和山东中部的局部地区、山西中南部、河南大部、陕西中北部以及河北中南部和甘肃东部的部分地区的降水量为 8~18 mm，山西兴县达 20 mm。以此个例作为冬季个例。

3.2 试验结果的比较和验证

把上述的两个个例，分别作为夏秋台风季节和冬季降雪季节的代表进行试验。以下给出试验结果的比较和验证。

3.2.1 短波辐射加热率和长波辐射冷却率

台风个例中，从短波辐射加热率和长波辐射冷却率廓线来看，无论是 48 h 预报平均，还是预

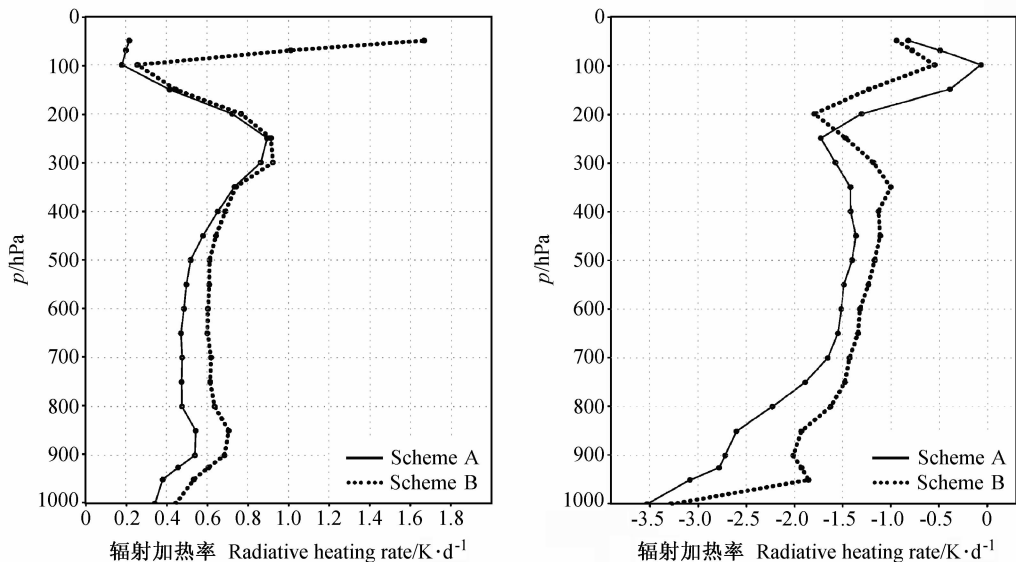


图 1 MM5 模式整个模拟区域 48 h 预报平均加热率廓线(2002 年 9 月 6 日 12 时为初值，实线表示 A 方案，虚线表示 B 方案)：(a) 短波加热率；(b) 长波加热率

Fig. 1 The radiative heating rate profiles averaged over 48 h integrations in the model domain with scheme A (solid line) and scheme B (dashed line), and the initial date is 1200 UTC 6 Sep 2002: (a) Short-wave radiative heating rate; (b) long-wave radiative heating rate

报第 40 小时(中午时刻)的整个模拟区域平均(图略)都发现两组方案有较大差别。图 1 是模式两组方案模拟整个区域 48 h 预报平均的加热率廓线。由图 1 知,总的来说,B 方案的短波加热率在整个模式层较 A 方案的大。对流层最大偏差约在 850 hPa 处,达 $0.15 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$ 。随着高度的增加偏差逐渐减小。在 100 hPa 以上,B 方案加热率迅速增大,而 A 方案加热率只是略有增加,两组方案在 50 hPa 差别最大,达 $1.45 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$ 。Chou 和 Suarez 等^[8]曾用 B 方案中的短波方案与精确的逐线模式进行比较试验,得出在 1 hPa 以下,Godard 短波方案计算的大气加热率与逐线模式十分一致。并且逐线模式画出加热率廓线,从 100 hPa 到 1 hPa 迅速增加,B 方案的结果与之一致,而 A 方案低估了平流层中短波加热率。平流层中二氧化碳和臭氧的吸收十分重要,是高层大气能量和动力的主要能源。B 方案中考虑二氧化碳和臭氧比较详细。二氧化碳对短波通量的减少能从预先计算的表^[8]中查到。臭氧浓度使用了一种新的方便和精确的方法,给定站点的经纬度、日期和气压值,就能根据中纬度($30^\circ \sim 60^\circ$)夏季(第 80~265 天)、冬季(第 266~第二年第 79 天),副极地(大于 60°)夏季、冬季和热带地区(小于 30°)不同气压层次臭氧廓线的气候资料(75 层),用线性内插方法得到第 k 层上气压为 $p(k)$ 的臭氧浓度。其

中 75 层有一半层次在平流层。A 方案没有考虑二氧化碳和臭氧吸收,因此,A 方案在平流层低估了短波加热率,B 方案描述的情况更接近实际情况。长波冷却率在对流层 B 方案较 A 方案小,最大偏差在 950 hPa 附近,达 $1.3 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$ 。平流层的情况与对流层相反,A 方案冷却率比 B 方案小。Morcrette^[12]曾试验用逐线模式计算大气冷却率,100 hPa 以上冷却率是迅速增加的,最大冷却率接近 $4 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$ 。A、B 方案都有增大趋势,但 B 方案增大更多,更接近逐线模式的试验结果。降雪个例中,加热率和冷却率的特点都与台风个例相似。只是由于是冬天,加热率没有台风个例的大,量值在 $1 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$ 以下。

3.2.2 大气顶向外长波辐射

大气顶向外长波辐射(OLR)是地气系统辐射收支中的重要分量,反映地气系统射出的长波辐射,主要跟下垫面和云有关,前者决定于下垫面的温度,后者决定于云顶温度及云量。为了更清楚地看到 OLR 与云和高度形势场的关系,图 2 给出了个例 1A、B 两组方案计算的 48 h 预报的 OLR、500 hPa 高度场、高云量。从高度场和云量图上看:两组方案预报 500 hPa 高度场与预报高云量对应较好,500 hPa 形势场中主要的天气系统有台风低压、副热带高压、低槽等。在高压地区无云,台风低压和槽区有云。相比两组方案,B 方案模拟的台风云

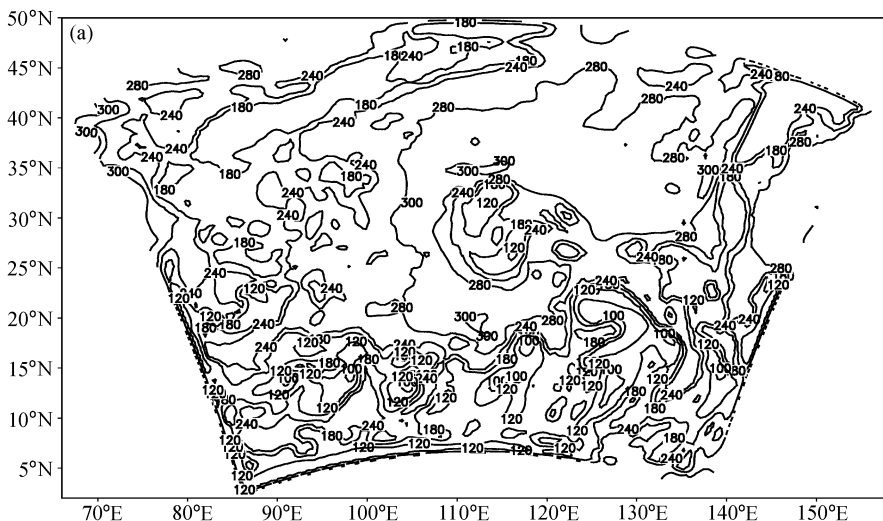


图 2 (a) A 方案 48 h 预报大气顶向外长波辐射(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); (b) 同(a), 但为 B 方案; (c) A 方案 48 h 预报高云量与 500 hPa 高度(单位: gpm)场; (d) 同(c), 但为 B 方案。预报均以 2002 年 9 月 6 日 12 时为初值

Fig. 2 (a) 48 h forecasted outgoing longwave radiation at the top of the atmosphere (units: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) for scheme A; (b) the same as (a), but for scheme B; (c) 48 h forecasted high cloud cover and geopotential height field at 500 hPa (units: gpm) for scheme A; (d) the same as (c), but for scheme B. The initial date is 1200 UTC 6 Sep 2002

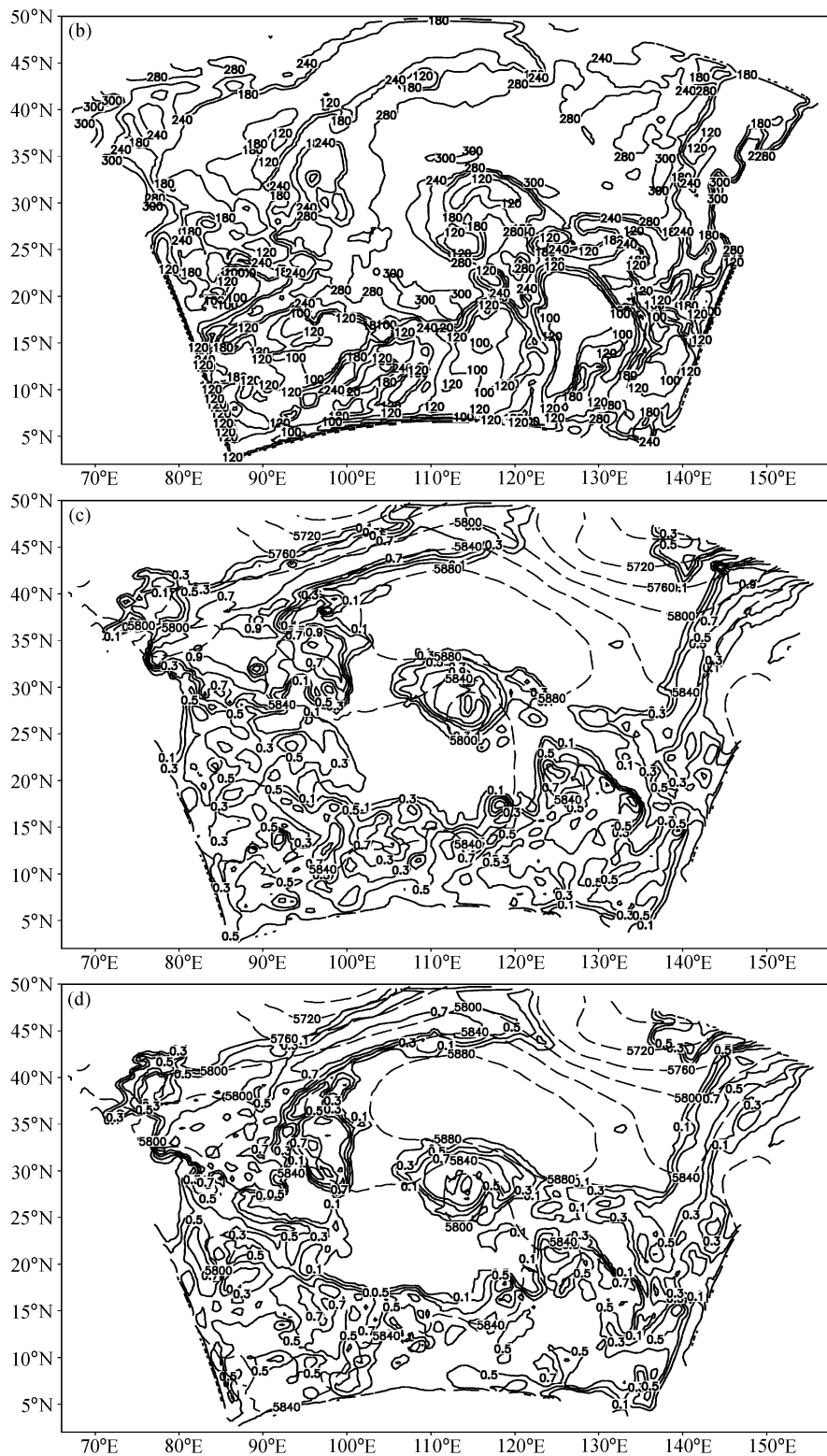


图 2 (续)

Fig. 2 (Continued)

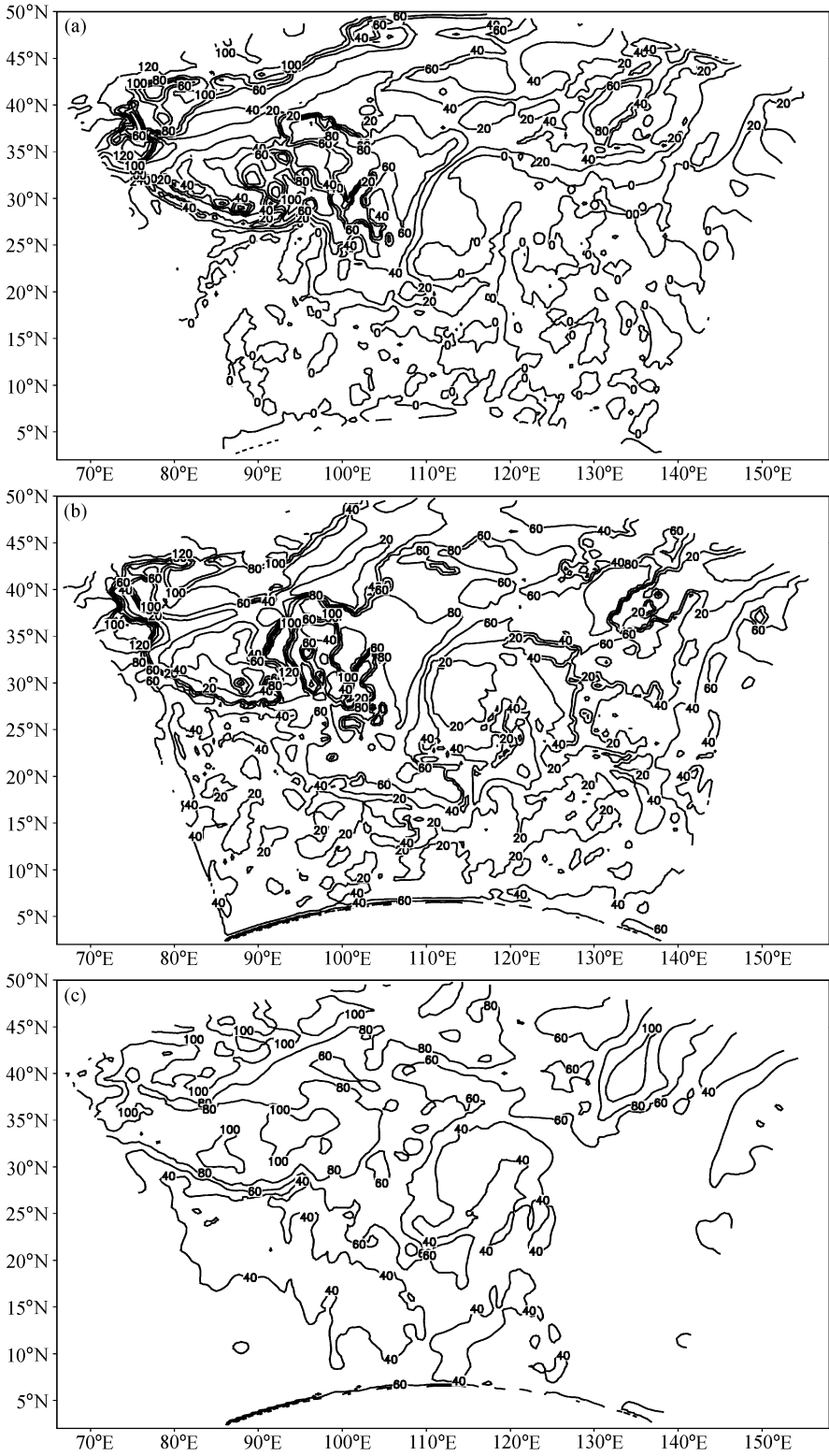


图 3 (a)A 方案 48 h 预报地面净长波辐射(单位: $W \cdot m^{-2}$, 2002 年 9 月 6 日 12 时为初值); (b) 同(a), 但为 B 方案; (c) 2002 年 9 月 8 日 12 时地面净长波辐射分析场

Fig. 3 (a) 48 h forecasted net long-wave radiation (LWR) at the surface(units: $W \cdot m^{-2}$) for scheme A, and the initial date is 1200 UTC 6 Sep 2002; (b) the same as (a), but for scheme B; (c) analysis field of net LWR at the surface (units: $W \cdot m^{-2}$) at 1200 UTC 8 Sep 2002

系更加细致, 台风眼和台风外围云系都是十分清楚的。两组方案模拟的 OLR 场对下垫面都比较敏感。在青藏高原, 地表温度较低, 两组方案都存在 OLR 低值区。相比之下, B 方案小值更小, 范围约在 $120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 附近, 低值范围比 A 大, 更接近青藏高原地形范围。由于 500 hPa 高度场与高云配合较好, 两组方案预报的 OLR 与 500 hPa 形势和高云都配合较好。在台风云系和低槽云系的地区 OLR 值比较小, 相比之下 B 方案最小值在台风地区更小, 达 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 而且小值范围更大, 与有云地方配合得更好, 特别是对台风云系反映更加清晰。这与 B 辐射方案模拟出较细致的高云相一致。晴空副高地区 OLR 为高值区。A、B 两组方案大于 $280 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 高值区范围和值都比较一致, 最大通量达 $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。也都与副高的位置配合一致。两组方案相比, 总的来说, B 方案对云的模拟更加逼真, 而且其 OLR 对云和地形反映比 A 方案更加细致, 也更加体现了晴空和有云地区 OLR 差别大的特征。

3.2.3 地面净长波辐射通量

图 3 是以 2002 年 9 月 6 日 12 时为初值 48 h 预报的地面净长波辐射(LWR)和 2002 年 9 月 8 日 12 时地面净 LWR 及高度场。从图 3a、b 看, A、B 两组方案的地面净 LWR 与 500 hPa 形势(见图 2)联

系没有像 OLR 那样紧密, 这说明地面净 LWR 不仅受到大气变化的影响, 而且很大程度上受到地形的影响。从图 3a~c 可以看出, 地面净 LWR 分布整体上具有西高东低的特点。这是因为西部海拔高, 东部相对低。海拔高的地区, 大气柱水汽含量少和温度低, 使得到达地面的大气逆辐射急剧减少所造成^[13]。比较 A、B 两组方案, B 方案预报的地面净 LWR 青藏高原高值区范围更大, 与分析场更加接近。天山和青藏高原之间两组方案预报的地面净 LWR 都存在低值区, 这是塔里木盆地低势地形和高度场低值区天气形势共同作用的结果。B 方案的低值范围较小, 与分析场更加一致。东部在台风地区两组方案都是低值区, B 方案与分析场更接近, 差值约为 $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 而 A 方案差值约为 $40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。副高地区两组方案都是高值区, 其中 B 方案与分析场量值和 500 hPa 副高范围一致, 而 A 方案副高地区出现了 $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 低值区域, 与分析场不相符。另外, 在 30°N 以南低纬地区 A 方案预报的地面 LWR 出现大范围的负值, 与实际情况不相符, 而 B 方案的则都是正值, 较合理。总体来说, 两组方案与分析场比较, 都具有西部高值区范围偏小, 东部低值区低值偏低的特征。相对而言, B 方案在这两个方面都更接近分析场。

图 4 为个例 2 两组方案 72 h 预报的地面净

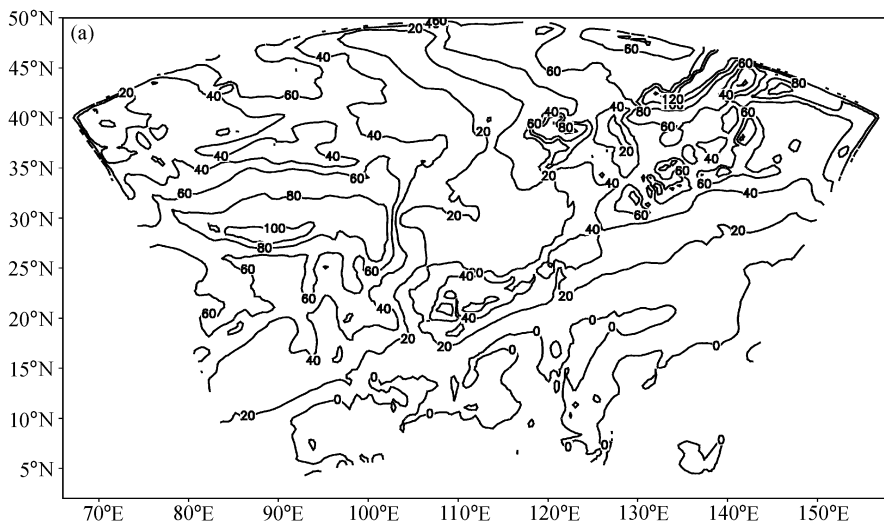


图 4 (a)A 方案地面净长波辐射(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)72 h 预报平均; (b)同(a), 但为 B 方案; (c)A 方案 72 h 预报平均低云量场; (d) A、B 两组方案低云量 72 h 预报平均的差值场。预报均以 2002 年 12 月 20 日 12 时为初值

Fig. 4 (a)Net LWR at the surface(units: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) for scheme A averaged over 72 h integrations; (b) the same as (a), but for scheme B; (c) low cloud cover of scheme A averaged over 72 h integrations, (d) difference (B-A) of low cloud cover averaged for 72 h integrations. The initial date is 1200 UTC 20 Dec 2002

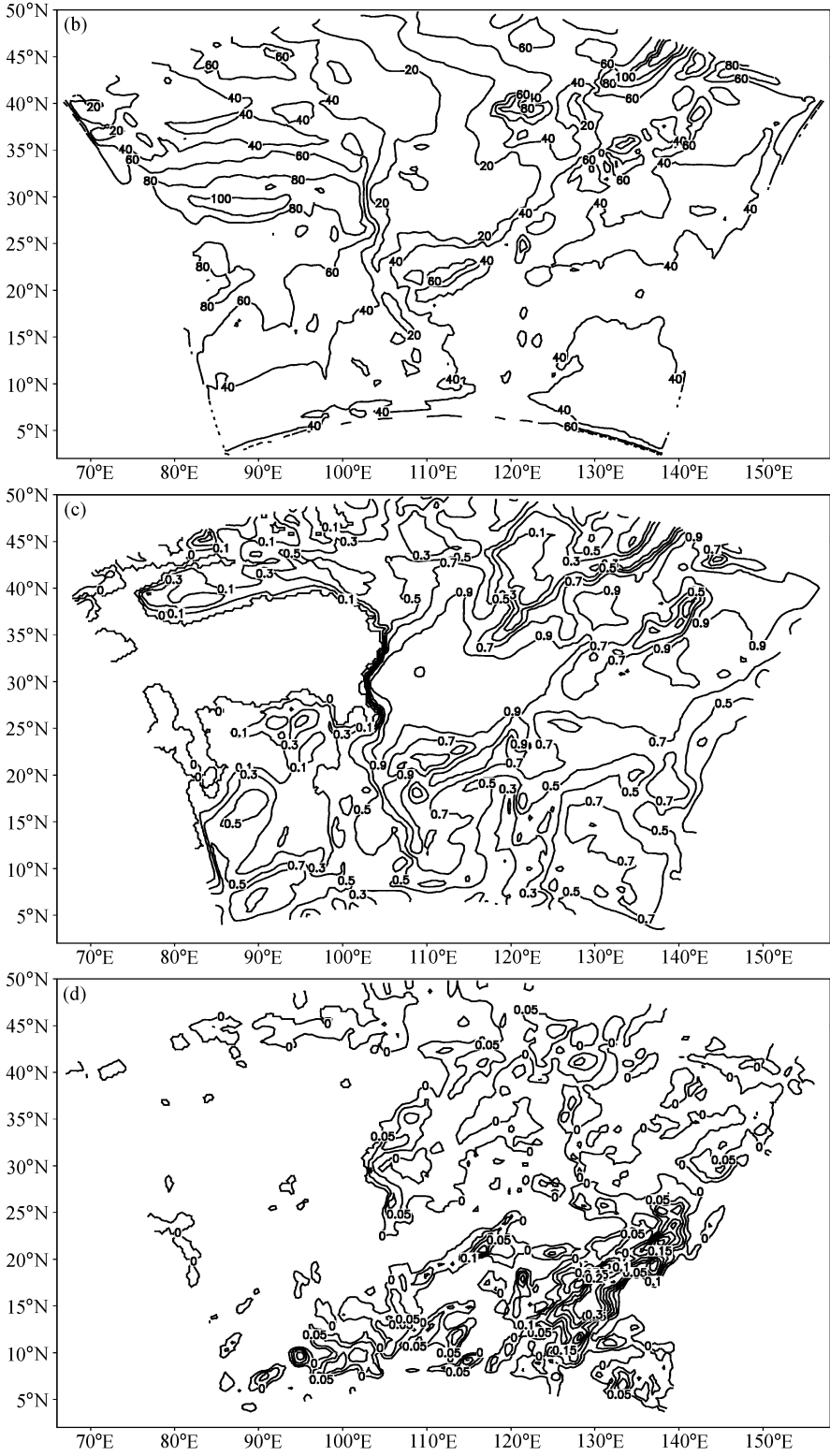


图 4 (续)
Fig. 4 (Continued)

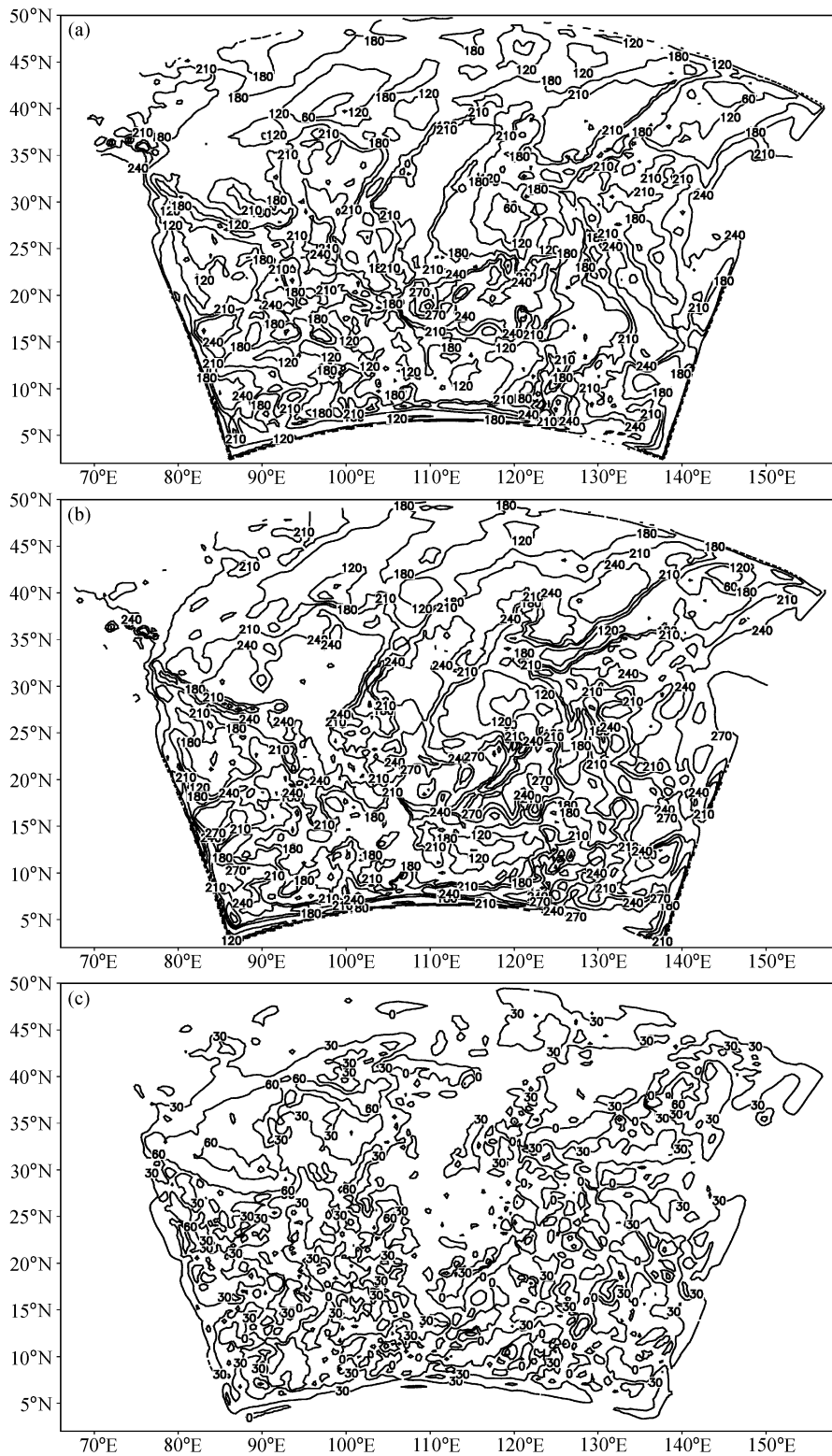


图 5 地面向下短波通量(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)场: (a) A 方案 48 h 预报平均; (b) B 方案 48 h 预报平均; (c) A、B 方案 48 h 预报平均差值。预报均以 2002 年 9 月 6 日 12 时为初值

Fig. 5 Downward short wave (SW) fluxes at the surface (units: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) averaged over 48 h integrations: (a) scheme A; (b) scheme B; (c) difference between B and A. The initial date is 1200 UTC 6 Sep 2002

LWR 平均和 72 h 预报低云量的平均图。可以看到,地面净 LWR 与个例 1 相似,不仅和天气形势相关,而且与地形紧密相连。有西高东低的特点,在青藏高原有一高中心,最大值达 $110 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右,东部地区相对西部高原较小,最小值为 $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下。相比较, B 方案预报的地面净 LWR 西部高值区与高原范围对应较一致。A 方案预报的地面净 LWR 在洋面上出现负值,同个例 1 一样,不符合实际情况; B 方案则没有出现负值,较合理。在华北、华中地区, B 方案预报的低值区范围较 A 方案大,与实际降水范围更加一致。为了更好地说明地面净 LWR 与天气形势的关系。通过与高中低云的比较分析,发现地面净 LWR 与低云量关系最密切。这与文献[13]“低云对 850 hPa 和地面净 LWR 的减弱作用较中、高云大”的结论一致。图 4c 给出了 B 方案 72 h 预报低云量的平均。可以看出,低云量在 0.9 以上地区,对应的地面净 LWR 的值在 $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下。图 4d 给出了两组方案模拟的低云量 72 h 平均的差值场,可以看到, B 方案预报的低云量较 A 方案多的区域与 B 方案在北方降水改进的区域相对应。

3.2.4 地面向下短波通量

同地面净 LWR 一样,地面向下短波通量 (GSW) 不仅受大气变化,而且受地形的影响,因为

地势高的地区,水汽少,气体吸收路径短,从而造成到达地面的短波通量大。为了消除 GSW 日变化,这里给出 GSW 的平均图。图 5 是个例 1 两组方案 48 h 预报平均的 GSW 和两组方案 GSW 的差值。从图 5a、b 看到,西部天山和青藏高原地区,副高无云地区(见图 2)两组方案 GSW 都是高值区, A 方案最大值达 $210 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, B 方案最大值达 $240 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。比较两组方案, B 方案的高值区范围更大,与地形更加一致。台风和日本附近低槽有云地区(见图 2), GSW 是低值区,两组方案范围和低值基本一致,最小为 $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。从图 5c 看到, B 方案到达地面的短波通量在整个区域中都比 A 方案大,差别最大的地方是在青藏高原西部到塔克拉玛干沙漠地区,达 $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上。副高晴空地区差别较小,差值在 $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下。总的来说, B 方案高值区范围更接近高地势范围,也体现了晴空和有云地区的差别大的特征。B 方案晴空和有云地区的差值约为 $210 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, A 方案约为 $180 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

图 6 是个例 2 两组方案 72 h 预报的平均 GSW 和 72 h 预报的平均中云量。从图 6a、b 看到,个例 2 中,两组方案的 GSW 不仅受地形的影响,同时与天气形势相关。西部青藏高原是 $90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上的高值区。B 方案预报的 GSW 有 $150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上高值区,而 A 方案没有。东部 GSW 的低值区

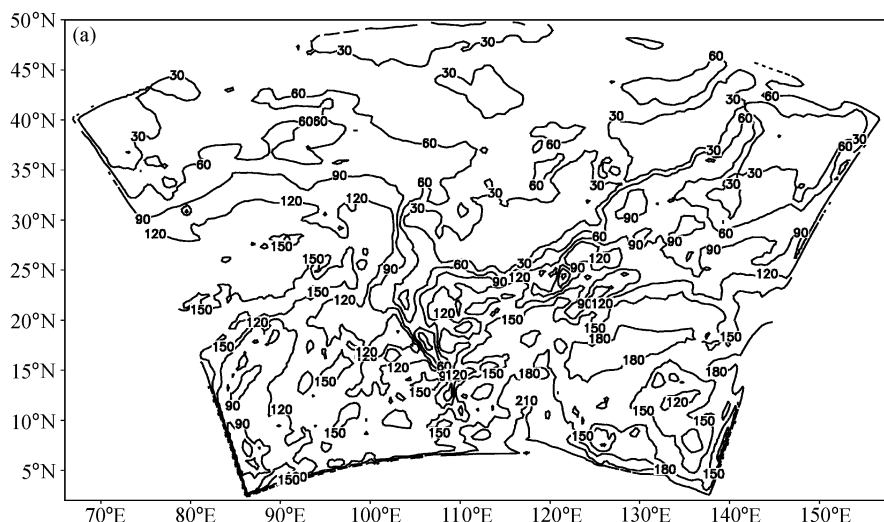


图 6 (a) A 方案地面向下短波通量(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) 72 h 预报平均; (b) 同(a), 但为 B 方案; (c) B 方案 72 h 预报平均中云量场; (d) A、B 方案 72 h 预报平均中云量场差值。预报均以 2002 年 12 月 20 日 12 时为初值

Fig. 6 (a) Downward SW fluxes at the surface (units: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) of scheme A averaged over 72 h integrations; (b) the same as (a), but for scheme B; (c) middle cloud cover of scheme B averaged over 72 h integrations; (d) difference (B-A) of middle cloud cover averaged for 72 h forecasts. The initial date is 1200 UTC 20 Dec 2002

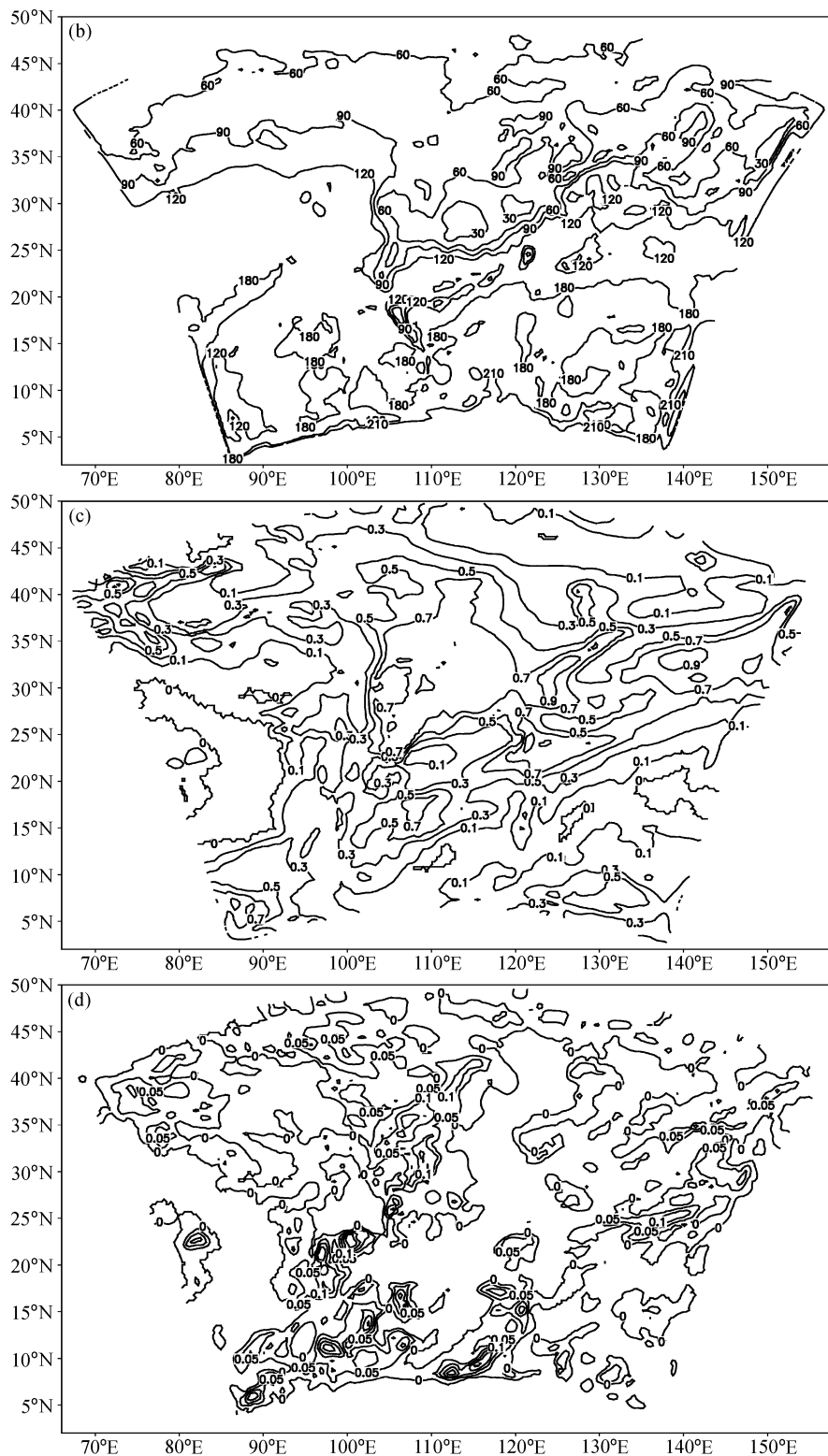


图 6 (续)

Fig. 6 (Continued)

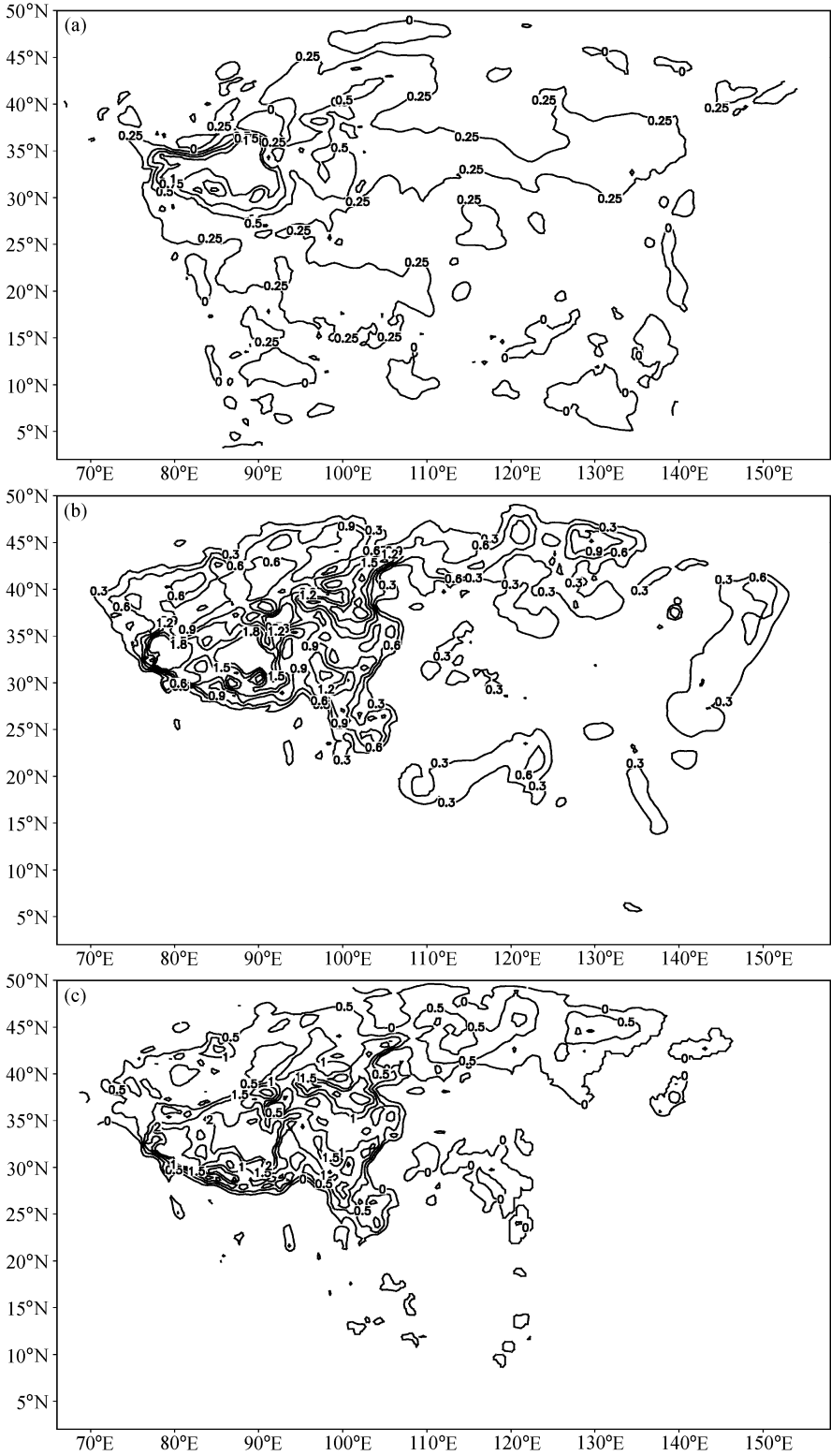


图 7 48 h 预报平均温度(单位: K)A、B 两组方案差值图(2002 年 9 月 6 日 12 时为初值): (a) 500 hPa; (b) 2 m; (c) 地面
Fig. 7 Difference (B-A) of temperature (units; K) averaged over 48 h integrations; (a) 500 hPa; (b) 2 m; (c) surface. The initial date is 1200 UTC 6 Sep 2002

与降水分布较一致。总的来看, B 方案预报的 GSW 在整个模拟区域都大于 A 方案, 这与个例 1 相似。为了更好地分析两组方案的差别, 我们分析了 GSW 与高、中、低云的关系, 发现 GSW 与中云的关系最为密切。因此, 我们用 B 方案模拟 72 h 平均的中云量图和两组方案的中云量差值(图 6c、d)。从图 6c 看到, GSW 与中云的分布配合较好。在中云大于 0.7 时, 对应的 GSW 为 $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的低值区, 在云量小于 0.1 的地区, 对应 GSW 为 $150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上的高值区。从图 6d 看, B 方案模拟的中云量在山西、陕西到湖北西部一带, 较 A 方案模拟的大。这里也是 B 方案预报的降水较 A 方案改进的区域, B 方案预报降水量较大, 与实况更加接近。

3.2.5 温度

图 7 是个例 1 中 A、B 方案在 500 hPa、2 m 高度和地面的 48 h 平均温度差值图, 可以看出: 辐射方案对温度的影响随高度减小, 500 hPa 的温度差别比较小, 青藏高原地区差别最大在 1 K 左右。2 m 高度和地面的温度差别最大也在青藏高原地区, 2 m 高度差值最大为 1.8 K, 地面温度差值最大达到 2 K。2 m 高度和地面温度差别分布比较相似, 在中国西部和东北地区差值较大, B 方案较 A 方案高 0.5 K 以上。地面上在晴空地区 B 方案温度较 A 方案偏低, 最大差值在四川省, 达 $-1 \sim -1.5 \text{ K}$ 。2 m 高度也有同样的特点, 但最大差值为 0.6 K, 范围也没有地面的大。这与地面短波通量紧密相关, 图 5 中 B 方案地面短波通量青藏高原地区较 A 方案大, 对应 B 方案青藏高原地区地面温度高, 通过近地面垂直扩散能影响到 2 m, 所以 2 m 高度与地面分布十分相似。但随着高度增加, 温度影响越来越小。所以温度在 500 hPa 总体差别比较小, 差别最大在青藏高原能达到 1 K, 因为青藏高原 500 hPa 高度与地面高度相近。在个例 2 中, 辐射方案对温度的影响也随高度减小。A、B 方案相比, 特点与台风个例相似。只是在这个个例积分 72 h, 两组方案 72 h 平均的温度差别都较个例 148 h 平均的差别大。在 500 hPa 的 72 h 平均温度最大差值在 1.6 K 左右, 而其 2 m 和地面差值最大在 3.5 K 左右(图略)。

3.2.6 降水分析

图 8 是台风区域 A、B 两组方案预报 12 h 到 36 h 累计降水和降水实况。从降水实况看, 整个中国主要降水在台风地区。A、B 两组方案模拟降水

范围与实况比较一致。虽然, 辐射方案对短期降水的影响是间接的, 但试验结果表明影响还是比较大的。从两组方案降水差值图(图 8c)看到, 整个区域 B 方案模拟的降水较 A 方案大。这是因为 B 方案计算的到达地面短波通量较 A 方案大, 造成地面温度高, 而高空是相对冷却的, 使对流发展更加旺盛, 从而造成降水增大。台风区域有 10~25 mm 差值区域, 最大的差值达 25 mm 以上。实况中, 福建出现 150 mm 以上的降水, B 方案能模拟出大于 150 mm 的中心, 而 A 方案模拟结果中最大降水为 100~150 mm, 所以说 B 方案模拟的降水更接近实况。在副热带地区, 印度到孟加拉湾、菲律宾及以东洋面上降水的差别也是较大的。存在 50 mm 以上的差值中心。个例 2 中, 在河北、山西、陕西、甘肃一带的 72 h 累计降雪量实况为 1~6 mm 范围, 两组方案的预报都较实况偏小。但 B 方案预报降水较 A 方案大 2 mm 左右(图略), 更接近实况。

3.2.7 高度、温度场均方根误差(RMSE)的统计分析

为了分析辐射方案在短期内对高度和温度场预报的影响。表 2 给出了两组方案 24 h 间隔的 24、48 和 72 h 高度场和温度场预报的 RMSE(区域范围是中国, 如图 2 所示)。由表 2 可知, 个例 1 中, B 方

表 2 两组方案 24 h 间隔的高度(H, 单位: gpm)和温度(T, 单位: K)预报的均方根误差统计(T_g : 地表温度)

Table 2 Root mean square error (RMSE) of geopotential height field (H, units: gpm) and temperature (T, units: K) for the two schemes for 24 h intermittent forecasts(T_g : ground surface temperature)

预报要素 Forecast factors	预报时数 Forecast time					
	24 h		48 h		72 h	
	A 方案 Scheme A	B 方案 Scheme B	A 方案 Scheme A	B 方案 Scheme B	A 方案 Scheme A	B 方案 Scheme B
个例 1 Case 1						
850 hPa H	7.01	9.56	12.65	13.50		
500 hPa H	5.98	6.28	9.81	13.20		
T_g	2.07	1.34	2.06	1.35		
850 hPa T	0.92	1.04	1.09	1.09		
500 hPa T	0.59	0.49	0.54	0.54		
个例 2 Case 2						
850 hPa H	6.89	5.42	11.91	10.57	14.73	11.33
500 hPa H	5.47	4.94	6.64	6.68	7.70	8.10
T_g	0.94	1.32	1.09	1.48	1.30	1.64
850 hPa T	0.69	0.60	1.20	0.94	1.56	0.94
500 hPa T	0.63	0.57	0.68	0.66	0.71	0.68

案在温度预报上总的来说较 A 方案好,而在高度场的预报上较 A 方案差。个例 2 相对个例 1 各要素的 RMSE 小。对温度的预报,在三个时次,850 hPa 和 500 hPa 都是 B 方案较 A 方案精确,而地面温度则相反。对高度场的预报,A 方案在 500 hPa 略好,在 850 hPa 三个时次都较 B 方案好。总的来说,两组方案预报的各要素 RMSE 都较小,并随预报时效的增加而增大,而且误差都在合理范围内。这说明辐射方案对短期模拟的高度和温度场的影响较小。

4 结论和讨论

利用移植的短波方案和 MM5 模式中原有的辐射方案,组合成两组辐射过程参数化方案,对夏秋台风个例和北方降雪个例进行数值试验。改变了模式的输出,使其可输出长短波加热率、地面净长波通量等有代表意义的辐射量,对这些辐射量和相关的量进行比较讨论。

(1) 从温度廓线上看到,B 方案的加热率无论是对流层还是平流层都比 A 方案大,在模式顶两者差别达到最大。这与 B 方案考虑平流层臭氧的增温作用相一致。冷却率是对流层 B 方案小,而到了平流层则是 A 方案的冷却率小。与逐线模式计算的结果相比,两个个例中,B 方案无论是加热率还是冷却率都更加与之接近。

(2) 长波方案计算的 OLR 与云和槽脊天气系统的分布紧密相连,晴空较大,对流云地区较小。同时跟地形也有关系,在青藏高原和天山存在低值区域。台风个例中,从与 500 hPa 的形势和高云量配合看,B 方案配合得更好,也更好地体现晴空和有云地区差别大的特征。北方降雪个例表现为与降水分布配合较好,也体现了降水 and 无雨区差别大的特征。

(3) 地面净 LWR 不仅和天气形势相关,而且与地形紧密相连。相比而言,B 方案西部低值区与高原范围对应较一致,在台风地区与分析场差别比 A 方案小。降雪个例分析,得到地面净 LWR 与低云关系密切。两组方案比较结果与台风个例相似。

(4) Goddard 短波方案与云短波方案计算的地面向下短波通量与地面净长波一样都受具体天气形势和地形的影响。台风个例中,对高原、台风、副高、槽脊反映都比较细致。降雪个例中,分析出 72

h 平均的 GSW 与 72 h 平均中云量有很好的对应关系。相对而言,Goddard 短波方案高值区与地形范围更一致,而且更好地体现晴空和有中云地区差别大的特征。

(5) 辐射方案对温度的影响随高度减小。台风个例中,500 hPa 的 48 h 平均温度最大差值在 1 K 左右,而其 2 m 和地面差值最大在 2 K 左右。这与地面短波通量密切相关。B 方案地面短波通量总体较 A 方案高,所以地面温度 B 方案的高。通过垂直扩散,2 m 的温度差别和地面温度差别相似,而到 500 hPa 这种影响就比较小,对应的温度差别也是小的。青藏高原地区差别较大,因为这里 500 hPa 高度与地面高度接近。北方降雪个例中,结论类似,只是在这个个例中积分 72 h,两组方案的温度差别更大。

(6) 虽然辐射方案对短期降水模拟的影响是间接的,但此次模拟中,两组方案模拟的降水差别还是很大的,台风个例最大差别达到 50 mm 以上。B 方案能模拟出 A 方案没有模拟出的大的降水中心。北方降雪强度也有所改进。

(7) 通过对两组辐射方案预报的高度场和温度场的均方根误差的统计,发现辐射方案在短期内对这两种要素场模拟的影响较小。

综上所述,通过两个个例模拟可以看出,辐射参数化方案对模式模拟中国短期天气过程存在明显的影响。RRTM 长波方案和 Goddard 短波方案组合的辐射方案描述的辐射量更加接近实际情况,而且对降水模拟更加精确。这次试验的台风个例中,MM5 积分 48 h,选择详细的辐射 B 方案模式所花费的时间较选择 A 方案增加了约 27%。虽然试验个例较少,但两个个例试验结果较一致,B 方案均比 A 方案有所改进,特别在较难预报的降水上也有较大的改进。如果今后用于业务预报当中,这个辐射方案的组合还有待于进一步的批量检验。

致谢 本文完成过程中,北京应用气象研究所许焕斌研究员给予热情指导,并提出许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心感谢!

参考文献(References)

- [1] 沈元芳,伊兰,陈宜,等. 辐射参数化的变化对模式中期和月预报的影响. 应用气象学报,2002,13(3): 299~311
Shen Yuanfang, Yi Lan, Chen Yi, et al. Impact of changes in radiation parameterization on model medium-range and

- monthly forecasting. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2002, **13**(3): 299~311
- [2] 沈元芳, Baer F, 王超. 初始场和长波辐射对气候模拟的影响. *应用气象学报*, 2003, **14**(3): 266~276
Shen Yuanfang, Baer F, Wang Chao. Impact of initial field and long wave radiation on climate modeling. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2003, **14**(3): 266~276
- [3] Lacis A A, Hansen J E. A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1974, **31**: 118~133
- [4] Stephens G L. Radiation profiles in extended water clouds. Part II: Parameterization Schemes. *J. Atmos. Sci.*, 1978, **35**: 2123~2132
- [5] Dudhia J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, 1989, **46**: 3077~3107
- [6] Hack J J, Boville B A, Briegleb B P, et al. Description of the NCAR Community Climate Model (CCM2). NCAR Technical Note, NCAR/TN-382+STR, 1993, 120pp
- [7] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(D14): 16663~16682
- [8] Chou M D, Suarez M J. A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) for atmospheric studies. 1999. <http://climate.gsfc.nasa.gov/~chou>
- [9] Arking A A, Grossman K. The influence of line shape and band structure in temperatures in planetary atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, 1972, **29**: 937~949
- [10] Koster R D, Suarez M J. Relative contribution of land and ocean processes to precipitation variability. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**: 13775~13790
- [11] Tao W K, Long S, Simpson J, et al. Cloud radiation mechanisms associated with a tropical and mid-latitude squall line. *J. Atmos. Sci.*, 1996, **53**: 2624~2651
- [12] Morcrette J J. Impact of changes to the radiation transfer parameterization plus cloud optical properties in the ECMWF model. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, **118**: 847~872
- [13] 沈元芳, 黄丽萍, 许国强, 等. 长波辐射对大气变化的敏感性和在 WRF 模式中的模拟检验. *气象学报*, 2004, **62**(2): 213~227
Shen Yuanfang, Huang Liping, Xu Guoqiang, et al. The sensitivity of long wave radiation of atmospheric changes and the simulating in the weather research and forecast (WRF) model. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62**(2): 213~227