

GRAPES 模式中的坡地辐射方案及其 对短期天气过程模拟的影响

沈元芳 胡江林

中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘要 为了改进太阳短波辐射参数化, 在非静力中尺度模式 GRAPES (全球/区域同化和预报系统) 中考虑了坡地辐射 (SLOPE), 并着重讨论其不同分辨率情况下对我国短期天气过程的影响。数值试验结果表明: 地形坡度和坡向对地表短波辐射 (GSW) 计算有较大的影响, 与没有考虑坡地作用的参考运行 (FLAT) 相比, 早晨和傍晚的 GSW 最小可减小 60% 以下, 最大也可增加 60% 以上, 比一天中其他时间和平均值大得多。在江淮流域一次梅雨锋降水过程中, 坡地辐射参数化方案的引入对降水模拟有较明显的影响, 特别在高分辨率 (6 km) 情况下, 降水的增加和减小不仅发生在 GSW 改变比较大的地区, 且与复杂地形有较好的相关性。另外, 由于地形坡度和坡向引起地表温度的改变与地表热通量的变化一致, 且也发生在地形起伏的多山地区。因此, 当水平分辨率较高且地形陡峭起伏时, 应当包含坡地辐射。

关键词 GRAPES 坡地辐射 短期天气过程 梅雨锋降水

文章编号 1006-9895(2006)06-1129-09

中图分类号 P435

文献标识码 A

Slope Irradiance Scheme in GRAPES and its Effect on Simulation of Short-Range Weather Processes

SHEN Yuan-Fang and HU Jiang-Lin

State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract Solar radiation is obviously an important factor in many aspects of surface forcing. Currently short wave radiation scheme in GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction System) is based on Dudhia (1989) and taken from MM5. It is a simple downward integration of solar flux, accounting for clear-air scattering (Lacis and Hansen 1974), water vapor absorption, cloud albedo and absorption, and uses look-up tables for clouds from Stephens (1978). Short wave radiation at the ground surface (GSW) is originally calculated under the assumption of horizontal surface. This method of estimating the GSW may lead to considerable errors when the model resolution becomes high and the model terrain steep. To improve solar short wave radiation parameterization, slope irradiance has been implemented into nonhydrostatic mesoscale model GRAPES. Topography height is taken from NCEP with a resolution of 1 km, and the slope and orientation of terrain are calculated by the staggered difference scheme. The focus of this paper is slope irradiances and the effect on the simulation for short range weather processes in the different resolutions, especially on the simulation of a Meiyu front precipitation process. The result shows that the influence of slope and orientation of terrain on the calculations of GSW is large. The radiation minima's are reduced up to 60%, and the maximums are up to 60% larger compared to the reference run, which are much larger than at other

收稿日期 2005-05-17, 2005-07-25 收修定稿

资助项目 国家“十五”科技攻关项目 2001BA607B0、国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418306、国家自然科学基金资助项目 40575050 和中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-213

作者简介 沈元芳, 男, 1943 年出生, 硕士, 研究员, 目前主要从事数值预报和大气辐射参数化的研究。E-mail: shenyf@cma.gov.cn

time during the day and the 12 or 24 h average. The impact of model resolution on GSW patterns has been investigated, the areas where the differences of GSW between two schemes are larger mostly occur in undulating mountains for high resolution (6 km), but there is no such connection for lower resolution (60 km). The result also shows that during a Meiyu front process in the Yangtze River and Huaihe River valleys the increase or decrease of precipitation accords with the decrease or increase of GSW due to slope irradiance, but it is difficult to see such relations with the complex terrain at a lower resolution (60 km). At a higher resolution (6 km) the increase or decrease of precipitation not only occurs in the areas where GSW changes are larger, but also has better correlation with the complex terrain, which indicates that the slope irradiance has the obvious effect on the simulation of precipitation. To investigate the effect of GSW on meteorological conditions in the planetary boundary layer, the surface energy budget has been studied. The heating or cooling takes place whenever net incoming fluxes are positive or negative, and the surface heat flux (SHF) is thus naturally important in the energy budget. The result shows that the changes of surface temperature due to the slope and orientation of topography accord with the SHF, there is better correlation between them, and also occur in undulating mountains at a higher resolution (6 km). Therefore, slope irradiance can normally be neglected in numerical models when the horizontal model resolution is low and the slopes are moderate, and should be included when the resolution becomes high and the terrain steep and undulating.

Key words GRAPES, slope irradiance, slope and orientation of topography, short-range weather processes, Meiyu front precipitation

1 引言

目前,大气数值模式已能较好地描述大尺度地形对大气的机械强迫、动力阻塞和摩擦作用等动力效应,也能较好地模拟由于地形和海拔不同所引起的大尺度热源热汇的空间分布、季节变化及其对天气气候效应的差异^[1, 2]。次网格地形对大气的动力作用也以包络地形^[3~4]和重力波拖曳^[5]参数化的形式进行处理。过去的学者也曾对一般的坡地辐射过程作过深入的研究,例如,早在 1958 年,傅抱璞^[6]曾讨论过坡地对日照和太阳辐射的影响,指出不同坡地、季节和纬度影响太阳短波辐射的程度不同,并从理论上解释了不同坡向的坡地对太阳辐射日变化的影响程度不同。Lqbal^[7]和翁笃鸣等^[8]较早给出了考虑地形坡度、坡向后计算地表短波辐射(GSW)的公式,但他们没有把坡地辐射作用放入数值天气预报模式中研究。最近,一些学者已在三维大气模式中考虑了坡地辐射,例如,Mahrer 等^[9]首先对不规则地形上空的气流作了数值研究;张正秋等^[10]研究了青藏高原地形对地表直接辐射和地面温度的影响;朱新胜和张耀存^[11]利用 $p-\sigma$ 区域气候模式的数值试验,表明次网格地形热力效应参数化方案的引入对东亚地区夏季气候,尤其是降水的模拟有明显的改进。Hauge 等^[12]认为在高压和无云情况下,可以更加详细地研究地形对辐射的作

用,他们的研究表明在 MM 5 模式中考虑坡地辐射后对温度和风场都有改进,在挪威的一次逆温崩溃期间坡地辐射对风的影响甚至比温度还要大。以上研究表明,如果能够在数值模式中将微观地形参数(如坡度、坡向)的热力效应参数化,通过改进地面热量平衡方程中各分量的计算,有可能使复杂地形区域天气系统相互作用过程更加接近实际,地面冷热源的分布更准确合理,进而可在一定程度上改进模式对复杂地形区域天气气候系统发生发展和演变过程的模拟和预测,更好地理解区域天气气候的形成和变化机理。

大气数值模式中坡地辐射的研究与模式的分辨率密切相关。观测网络的密度通常不能捕获中尺度和精细尺度的气象结构。这种结构大多是陆面强迫(地形、地表植被、土壤湿度和其他地表特性)的结果。当水平分辨率较高时,精细尺度的非静力中尺度 GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction System) 模式可以成为描述和预报这种结构的工具,应用这样的模式,我们就有可能获得观测以外的资料,捕获精细尺度的气象结构。一般认为,在数值模式中,当水平分辨率较低且坡地平缓时,通常可忽略坡地辐射;但当水平分辨率较高且地形陡峭起伏时,应当包含坡地辐射。

本文在非静力中尺度模式 GRAPES 中考虑了坡地辐射(SLOPE),并着重讨论其在不同分辨率

情况下对我国短期天气过程,特别是对一次梅雨锋降水过程模拟的影响。

2 GRAPES 模式中的坡地辐射方案

本文设计了两个数值试验方案: FLAT 为原方案,计算 GSW 时不考虑地形坡度、坡向的作用; SLOPE 为改进方案,计算 GSW 时考虑了地形坡度、坡向的作用。

GRAPES 模式中原短波辐射参数化取自 MM 5 模式的方案^[13],它简单地计算了由于晴空散射和水汽吸收^[14],以及云的反射和吸收(应用 Stephens 1978 年云的查找表)^[15]引起的向下短波辐射通量。在计算地表向下短波辐射通量时,假定地表是水平的,不考虑地形坡度、坡向的作用,

$$S = S_0 \sinh F, \quad (1)$$

式中, S_0 为太阳常数,函数 F 依赖于透射率、水汽、云和散射等。太阳高度角的正弦为

$$\sinh = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega, \quad (2)$$

式中, ϕ 、 δ 和 ω 分别为纬度、太阳赤纬和时角。当模式的水平分辨率较高,且地形陡峭起伏时, FLAT 方案会产生较大的误差。

SLOPE 为改进方案,根据文献[7, 8],考虑地形坡度、坡向时, GSW 的计算公式应为

$$S_{\beta, \alpha} = I \sinh_{\beta, \alpha}, \quad (3)$$

其中,

$$I = S_0 F, \quad (4)$$

$$\sinh_{\beta, \alpha} = u \sin \delta + v \cos \delta \cos \omega + w \cos \delta \sin \omega, \quad (5)$$

$$\begin{cases} u = \sin \phi \cos \alpha - \cos \phi \sin \alpha \cos \beta, \\ v = \cos \phi \cos \alpha + \sin \phi \sin \alpha \cos \beta, \\ w = \sin \beta \sin \alpha, \end{cases} \quad (6)$$

式中, I 是垂直于太阳光线面上的太阳短波辐射, α 、 β 分别为地形坡度、坡向。由此可知,到达坡地上的太阳短波辐射不仅与地理纬度、太阳赤纬和太阳时角有关,而且还随斜坡的坡向和坡度而改变。显然,水平面上的太阳高度角和向阳面及背阳面上的太阳高度角是不同的,因此,到达水平面上的太阳短波辐射通量和到达向阳面及背阳面上的太阳短波辐射通量也是不同的。

规定坡面的法线方向在水平面上的投影与正南方向的夹角为坡向,沿顺时针方向为正,范围是 $0 \sim 2\pi$,坡度是坡的陡峭程度,范围是 $0 \sim \pi/2$ 。 x 方向由西向东为正, y 方向由南向北为正,位于不同

方位的地形坡向可由下式计算:

$$\beta = \frac{3\pi}{2} - \arctan\left(\frac{\partial H}{\partial y} / \frac{\partial H}{\partial x}\right), \quad \text{当 } \frac{\partial H}{\partial x} < 0, \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{\partial H}{\partial y} / \frac{\partial H}{\partial x}\right), \quad \text{当 } \frac{\partial H}{\partial x} > 0. \quad (8)$$

坡度的计算公式为

$$\alpha = \arctan\left[\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

地形高度资料取自 NCEP,分辨率为 $30'' \times 30''$,采用交错差分格式^[16]计算地形坡度:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial x} \Big|_{i,j} = \frac{3}{8l_x} (H_{i,j+1} - H_{i,j-1}) + \frac{1}{16l_x} (H_{i+1,j+1} - H_{i+1,j-1} + H_{i-1,j+1} - H_{i-1,j-1}), \\ \quad (2 \leq i \leq N-1, 2 \leq j \leq M-1) \\ \frac{\partial H}{\partial y} \Big|_{i,j} = \frac{3}{8l_y} (H_{i+1,j} - H_{i-1,j}) + \frac{1}{16l_y} (H_{i+1,j+1} - H_{i-1,j+1} + H_{i+1,j-1} - H_{i-1,j-1}), \\ \quad (2 \leq i \leq N-1, 2 \leq j \leq N-1) \end{cases} \quad (10)$$

M 、 N 分别是 x 、 y 方向上的格点数, x 方向是自西向东, y 方向为自南向北, l_x 、 l_y 分别是 x 、 y 方向上的格距。以上考虑了次网格尺度的地形作用,因为在计算地形坡度和坡向时使用的地形分辨率相当于 1 km,而模式网格的地形坡度和坡向无论在试验 1 (60 km) 或在试验 2 (6 km),都是根据 1 km 时计算的地形坡度和坡向求算术平均得到的。

为了研究短波辐射对行星边界层 (PBL) 气象状况的影响,地表能量平衡方程为

$$C_g \frac{\partial T_s}{\partial t} = R_n - H_m - H_s - L_v E_s, \quad (11)$$

式中, C_g 为土壤薄层的热容量, T_s 为地表温度, R_n 为地表净辐射, H_m 为流入土壤深层的热量, H_s 为进入大气的感热通量, L_v 为蒸发潜热, E_s 为地表水汽通量。方程整个右边项为地表热通量 (SHF), 加热或冷却就发生在净通量为正或负的情况。因此, SHF 在能量收支和相应的 T_s 中是十分重要的。

3 GRAPES 模式数值试验的个例分析

3.1 GRAPES 模式简介和数值试验方案

GRAPES 模式是由中国气象局数值预报创新基地研制和发展的一个全球与有限区通用、静力与

非静力可选的多尺度数值预报模式。该模式采用了全可压原始方程、半隐式半拉格朗日的时间平流方案、经纬度格点的网格设计、高度地形追随坐标和水平方向 Arakawa-C 跳点格式等设置。模式引入一些物理参数化方案,如微物理,积云参数化,长、短波辐射, PBL 湍流, 地表层, 陆面参数化和次网格涡动扩散。本文试验中,微物理采用 NCEP 简单冰方案,长、短波辐射分别采用 RRTM 和 Dudhia 的云方案,积云对流选择 KF 方案,地表层和陆面过程分别为相似理论和热扩散方案, PBL 参数化采用 MRF 方案。

数值试验所用的初始场和侧边界条件来自 T213L31 的分析场,侧边界条件每 6 小时更新一次。为了讨论坡地辐射在不同分辨率情况下对我国短期天气过程,特别是对一次梅雨锋降水过程模拟的影响,选择个例的初值为 2003 年 7 月 8 日 00 时(国际协调时,下同),有 2 次积分区域和分辨率不同的试验:试验 1 为东亚(15°N~60°N, 70°E~145°E)低分辨率(60 km)情况下的 24 h 预报,试验 2 为江淮流域(25°N~35°N, 105°E~125°E)梅雨锋区域高分辨率(6 km)情况下的 12 h 预报。表 1 给出了个例试验所取的参数。

以上不同分辨率的试验各包含了改进方案 SLOPE 和原方案 FLAT,即计算 GSW 时考虑和没有考虑地形坡度、坡向作用的试验。由于考虑地形坡度坡向后,模式模拟的 GSW 差异只发生在白天,所以在高分辨率(6 km)情况下,只给出前 12 h 的预报(00 时~12 时)。

3.2 地表短波辐射

地形坡度坡向对 GSW 计算的影响较大,为了分析考虑地形坡度坡向后 GSW 的变化,我们定义短波辐射变化的百分率为

$$C = \frac{A - B}{B} \times 100,$$

其中 A、B 分别为考虑和不考虑地形坡度、坡向时的 GSW。图 1 给出试验 1 东亚范围低分辨率(60 km)情况下,2003 年 7 月 8 日 00 时(相当于北京时间 08 时)为初值 24 h 预报的 GSW 变化百分率的空间分布。从图 1 中可以发现,两种方案 24 h 预报的 GSW 差异比 24 h 预报的平均大得多,地形坡度坡向对 GSW 计算的影响在 00 时最大可以达到 60% 以上;而 24 h 预报的平均 GSW 变化百分率大多在 3% 以内,最大为 10%,且最大值分布的范围也要小得多。GSW 较大的差别表明地形坡度和坡向对短波辐射计算的影响,与没有考虑坡地作用的参考运行(FLAT)相比,早晨和傍晚的 GSW 最小可减小 60% 以下,最大也可增加 60% 以上,比一天中其他时间和平均值大得多。

一般,地形复杂的多山地区应是 GSW 改变较大的地区,但由于辐射参数化方案 GSW 的计算考虑了多种因子,特别是云与辐射的相互作用,使得我们不易分清地形坡度和坡向对辐射的影响。图 1 在分辨率较低的情况下,我们就很难看出这种关系。因此,在数值模式中,当水平分辨率较低(>10 km)、且坡地平缓时,通常可忽略坡地辐射,但当水平分辨率较高且地形陡峭起伏时,SLOPE 的

表 1 个例试验所取的参数

Table 1 Parameters used in the tests

	试验 1 Test 1	试验 2 Test 2
分辨率 Resolution	0.5625° (60 km)	0.05625° (6 km)
区域范围 Area coverage	东亚 East Asia (15°N~60°N, 70°E~145°E)	江淮流域梅雨锋区域 Yangtze-Huaihe Meiyu front areas (25°N~35°N, 105°E~125°E)
区域中心 Area center	(37.50°N, 107.25°E)	(30.00°N, 115.00°E)
东西向格点数 Grid number in x direction	133	357
南北向格点数 Grid number in y direction	81	179
模式层数 Model layers	31	31
时间步长 Time step	600 s	180 s
辐射步长 Radiation step	3600 s	1800 s

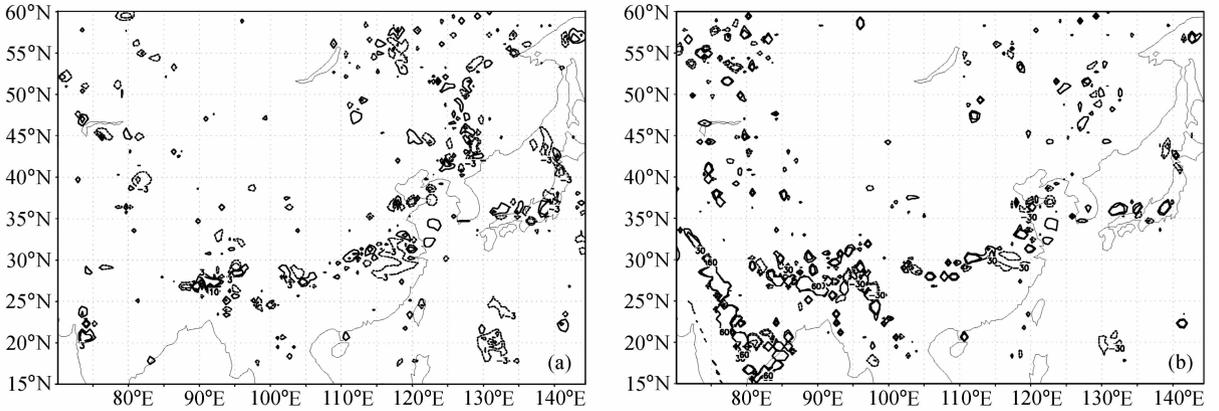


图1 东亚范围低分辨率(60 km)情况下, 2003年7月8日00时为初值24 h预报的GSW变化百分率(%)的空间分布图: (a) 24 h预报的平均; (b) 24 h预报

Fig.1 Percentages (%) of GSW (short wave radiation at the ground surface) changes at lower resolution (60 km), initial time is 0000 UTC 8 Jul 2003; (a) Average of 24 h forecasts; (b) 24 h forecasts

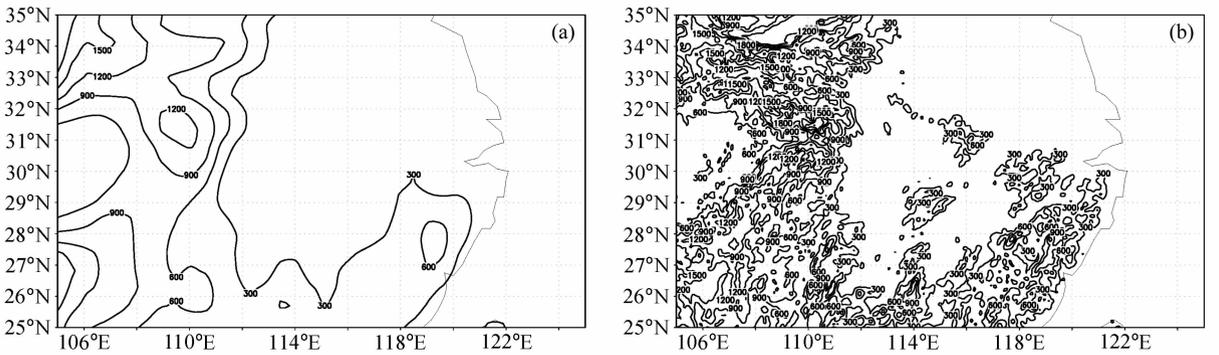


图2 江淮流域梅雨锋区域不同分辨率情况下的地形分布(单位:m): (a) 60 km; (b) 6 km

Fig. 2 Topographic height (m) in the Yangtze-Huaihe Meiyu front areas at different resolutions; (a) 60 km; (b) 6 km

作用变得重要起来。图2给出江淮流域梅雨锋区域在60 km和6 km不同分辨率情况下的地形分布, 从中可以清楚地看到6 km比60 km的地形结构细致得多, 特别是在云贵高原、秦岭、大巴山、大娄山、大别山、武夷山和南岭等有山地区, 可以较准确地反映出该地区的次网格地形特征。因为考虑地形坡度坡向后, 模式模拟的GSW差异只发生在白天, 所以试验2只给出12 h预报。图3(见文后彩图)为江淮流域梅雨锋区域在较高分辨率(6 km)下, 2003年7月8日00时为初值预报的GSW变化百分率的空间分布。由图3可知, 两种方案9 h预报的GSW差异比12 h预报的平均大得多, 地形坡度坡向对GSW计算的影响在09时(相当于北京时间17时)最大可以达到60%以上; 而12 h预报的平均的GSW变化百分率最大仅为10%, 且最大值分布的范围也要小得多。以上结果与 Hauge

等^[12]研究的结论类似, 不过后者是在高压和无云情况下, 而本文是在有预报云的情况下进行的, 因此地形对辐射的作用更为复杂。早晨和傍晚的GSW变化百分率较大, 显然是由于早晨和傍晚的太阳斜射, 使得考虑地形坡度、坡向后的SLOPE方案的向阳坡比背阳坡得到较多的太阳辐射所引起的。除了上述与试验1(60 km)相似的特点外, 我们可以清楚地看到在高分辨率(6 km)情况下, 两种方案GSW差异比较大的地区大多发生在地形复杂的多山地区, 表明地形坡度和坡向对辐射的影响, 而在分辨率较低(60 km)情况下, 我们就很难看出这种关系。

3.3 坡地辐射对降水场的影响

因为考虑地形坡度坡向后模式模拟的GSW差异发生在白天, 所以下只给出前12 h的预报。图4(见文后彩图)为江淮流域梅雨锋区域(25°N~

35°N, 105°E~125°E) 12 h 预报的平均 GSW 变化百分率与降水差 (SLOPE-FLAT) 的空间分布, 由图中可以看到, SLOPE 和 FLAT 两种方案模拟的降水差异在 20 mm 以下, 降水的增加和减小与坡地辐射引起 GSW 的减小和增加是一致的, 且多数发生在 GSW 变化百分率大于 3% 的情况下。在试验 1 低分辨率 (60 km) 情况下, 降水量增加 10 mm 以上的区域发生在 GSW 变化百分率大于 10% 的地方, 但参照图 2 的地形分布, 我们看不出与山脉地形的关系。在高分辨率 (6 km) 情况下, 降水的增加和减小不仅发生在 GSW 差异比较大的地区, 且与地形复杂的多山地区有较明显的相关性, 表明地形坡度和坡向对降水场的影响。

分析以上结果可以认为, 在晴空情况下 GSW 的减少或增加是由于地形坡度、坡向引起的。但在有云和降水情况下, 过程可能是复杂的, 因为倘若降水发生, 云量和地表湿度会改变反照率, 从而反过来影响辐射, 减少坡度的效应。本文试验中降水方案没有改变, 降水的增加或减少应该是由 GSW 计算中考虑了地形坡度、坡向而引起的, 但反过来降水的增加或减少又影响了坡地辐射。因

此, 降水和坡地辐射相互作用, 它们之间的复杂关系应是当前物理过程重要的研究课题。当水平分辨率较高且地形陡峭起伏时, SLOPE 的作用变得重要起来, 因此在高分辨率 (6 km) 情况下, 降水的增加和减小与地形复杂的多山地区有较明显的相关性。

与实况相比, 在这个个例中, 最明显的天气过程为江淮流域的梅雨锋。受梅雨锋影响, 从 2003 年 7 月 8 日 00 时至 9 日 00 时 24 小时内, 贵州、湖南、湖北、安徽和江苏各省沿长江至淮河流域普降暴雨和大暴雨, 其中存在几个强降水中心, 24 小时雨量超过 100 mm 降水的地方有: 安徽蚌埠 (58221) 105 mm, 湖南石门 (57562) 183 mm, 湖南桑植 (57554) 144 mm, 湖北武汉 (57494) 100 mm, 图 5 给出这次过程的 24 小时降水量实况, 以及试验 1 和试验 2 模拟的降水分布, 实况是根据测站的降水观测资料插值到 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格得到的。从试验 1 SLOPE 方案模拟的 24 h 降水分布图上可以看到, 这次过程的雨带也位于江淮流域, 最大强降水中心的雨量大于 150 mm, 与观测比较接近, 但强降水中心位置略有偏差。从 12 h 预报的降水量来看, 试验 2 模拟的降水比试验 1 强, 出现了 12 h 雨量超

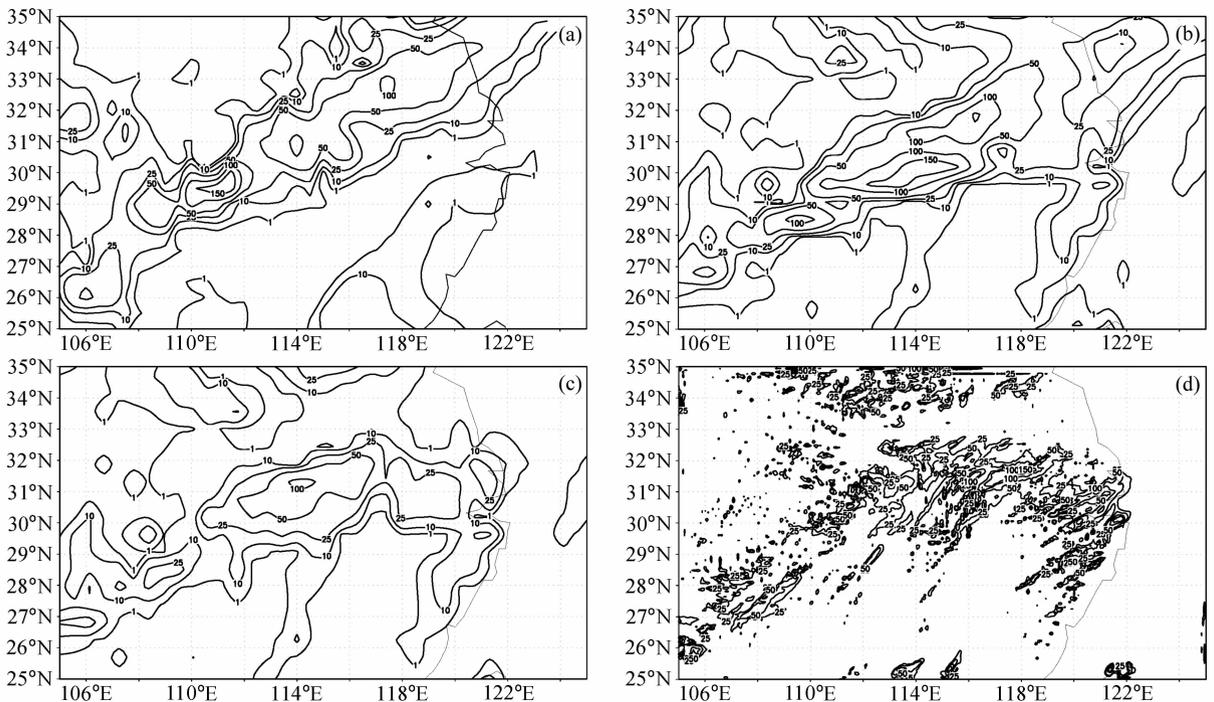


图 5 24 h 降水量实况 (a) 以及试验 1 模拟的 24 h (b)、12 h (c) 和试验 2 模拟的 12 h (d) 降水分布。初值为 2003 年 7 月 8 日 00 时 (单位: mm)

Fig. 5 Observational precipitation (mm) for 24 h (a); simulated precipitation (mm) in test 1 for 24 h (b), 12 h (c) and simulated precipitation (mm) in test 2 for 12 h (d). Initial time is 0000 UTC 8 Jul 2003

过 150 mm 的降水中心, 而试验 1 只有 100 mm 范围很小的降水中心。

3.4 坡地辐射对地表热通量和地表温度的影响

由地表能量平衡方程(11)式可知 GSW 对 PBL 气象状况的影响, 方程整个右边项为 SHF, 加热或冷却就发生在净通量为正或负的情况。因此, SHF 在能量收支和相应的 T_s 中是十分重要的。另外从以上 3.2~3.3 节分析可知, 在分辨率较低 (60 km) 情况下, 我们较难看出地形坡度和坡向对 GSW 和降水的影响与地形复杂的多山地区的关系, 对 SHF 和 T_s 的影响也是同样的(图略)。因此, 以下只给出高分辨率 (6 km) 情况。

图 6 (见文后彩图) 为试验 2 江淮流域梅雨锋区域高分辨率 (6 km) 情况下, 2003 年 7 月 8 日 00 时为初值 12 h 预报平均的 SHF 和 T_s 差 (SLOPE-FLAT)。由图可以清楚地看出, T_s 的变化与 SHF 是一致的, T_s 变化大于 0.2°C 的区域对应于 SHF 变化大于 5 W/m^2 地方, 它们之间有较好的相关性。对照图 2b 高分辨率情况下的地形分布, 我们可以看到由于地形坡度和坡向引起的 SHF 和 T_s 较大的改变大都发生在地形复杂的云贵高原、秦岭、大巴山、大娄山、大别山和武夷山等多山地区。

为了研究试验 2 江淮流域梅雨锋区域不同地区 T_s 和 SHF 的日变化, 我们选择了位于秦岭地区的一网格点 (34°N , 110°E), 地形高度为 1089 m。从 SLOPE 方案 SHF 和 T_s 随时间 (0~12 h 预报) 的变化 (图略) 来看, T_s 的日变化趋势与 SHF 一致, 06 时后虽然有些小的降水 (累积降水仅为 3.4 mm), 但 T_s 和 SHF 的这种关系没有变化。另一个网格点 (31.5°N , 117°E) 位于大别山以东比较平坦的区域, 地形高度仅为 19.3 m, 有较大的降水 (03 时~12 时的累积降水为 187.8 mm), 情况复杂些, 但基本情况仍是这样。不仅如此, 我们还可以从两种方案的 T_s 差和 SHF 差 (SLOPE-FLAT) 随时间的变化 (图 7) 清楚看出, 由坡地辐射引起两种方案的 T_s 差随时间变化的趋势也与 SHF 差一致。特别是伴随着大雨和暴雨的发生, T_s 差的较大负 (06 时) 或正 (09 时) 变化仍与 SHF 差较大的下降或上升一致。以上分析表明, 无论在地形陡峭或比较平坦的地区, 也无论有无降水发生的情况, T_s 随时间变化的趋势总是与 SHF 一致, 只不过 SHF 和 T_s 较大的变化大都发生在地形复杂的多山地区, 它

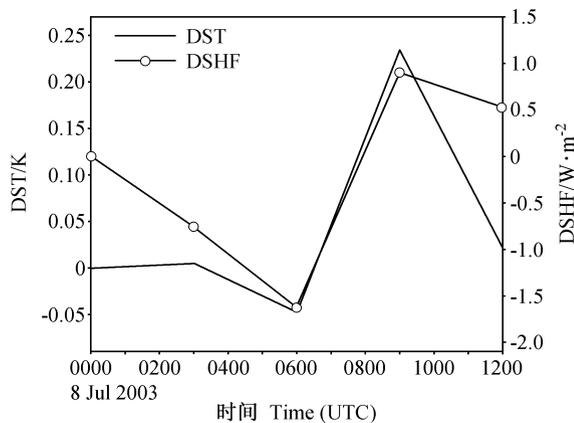


图 7 (31.5°N , 117°E) 格点的地面温度差(DST)和地表热通量差(DSHF) (SLOPE - FLAT) 随时间的变化 (初值为 2003 年 7 月 8 日 00 时)

Fig. 7 Time evolution for differences (SLOPE-FLAT) of the surface temperature (DST) and surface heat flux (DSHF) at (31.5°N , 117°E), initial time is 0000 UTC 8 Jul 2003

们之间较好的相关性说明 SHF 在能量收支和相应的 T_s 分析预报中十分重要, 也说明了坡地辐射的引入对改善 PBL 气象状况的影响。

4 结论

本文在非静力中尺度模式 GRAPES 中考虑坡地辐射参数化, 通过数值试验讨论了地形坡度和坡向对短波辐射计算的影响, 并着重研究了坡地辐射在不同分辨率情况下对我国短期天气过程, 特别是对一次梅雨锋降水过程模拟的影响, 从中可以看出:

(1) GSW 较大的差别表明地形坡度和坡向对短波辐射计算的影响, 与没有考虑坡地作用的参考运行 (FLAT) 相比, 早晨和傍晚的 GSW 最小可减小 60% 以下, 最大也可增加 60% 以上。

(2) 在高分辨率 (6 km) 情况下, 两种方案 GSW 差异比较大的地区大多发生在地形复杂的多山地区, 而在分辨率较低 (60 km) 情况下, 就很难看出这种关系。

(3) 在一次梅雨锋降水过程中, 降水的增加和减小与坡地辐射引起 GSW 的减小和增加是一致的, 但在低分辨率 (60 km) 情况下, 很难看出与复杂山脉地形的关系。在高分辨率 (6 km) 情况下, 降水的增加和减小不仅发生在 GSW 差异比较大的地区, 且与地形复杂的多山地区有较明显的相关

性,表明地形坡度和坡向对降水场的影响。

(4) 在高分辨率(6 km)情况下, T_s 的变化与 SHF 是一致的,它们之间有较好的相关性,且大都发生在地形复杂的多山地区,表明 SHF 在能量收支和相应的 T_s 分析预报中十分重要,也说明了坡地辐射的引入对改善 PBL 气象状况的影响。

通过以上分析,我们可以认为在数值模式中,当水平分辨率较低且坡地平缓时,通常可忽略坡地辐射,但当水平分辨率较高且地形陡峭起伏时,应当包含坡地辐射。

参考文献 (References)

- [1] 钱永甫, 颜宏, 王谦谦, 等. 行星大气中地形效应的数值模拟. 北京: 科学出版社, 1988
Qian Yongfu, Yan Hong, Wang Qianqian, et al. *The Numerical Simulation of Terrain Effect in Planet Atmosphere* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1988
- [2] 王开存, 周秀骥, 刘晶淼. 复杂地形对计算地表太阳短波辐射的影响. 大气科学, 2004, **28** (4): 625~633
Wang Kaicun, Zhou Xiuji, Liu Jingmiao. The effects of complex terrain on the computed surface solar short wave radiation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (4): 625~633
- [3] Wallace J M, Tibaldi S, Simmons A J. Reduction of systematic forecast errors in the ECMWF model through the introduction of an envelope orography. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1983, **109**: 683~718
- [4] Li Long, Zhu Baozhen. The modified envelop orography and the air flow over and around mountains. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1990, **7** (3): 249~260
- [5] Palmer T N, Shutts G S, Winbank R S. 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
- [6] 傅抱璞. 坡地对于日照和太阳辐射的影响. 南京大学学报, 1958, **2**: 22~45
Fu Baopu. The effect of slope on sunlight and solar radiation. *Journal of Nanjing University* (in Chinese), 1958, **2**: 22~45
- [7] Lqbal M. *An Introduction to Solar Radiation*. Academic, San Diego, Calif., 1983
- [8] 翁笃鸣, 陈万隆, 沈觉成. 小气候和农田小气候. 北京: 农业出版社, 1981. 6~11, 116~135
Weng duming, Chen Wanlong, Shen Juecheng. *Microclimate and Farmland Microclimate* (in Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1981. 6~11, 116~135
- [9] Mahrer Y, Pielke R A. A numerical study of airflow over irregular terrain. *Beitr. Phys. Atmos.*, 1977, **50**: 98~113
- [10] Zhang Zhengqiu, Zhou Xiuji, Li Weiliang. Preliminary numerical study of topographic effects of the Tibetan plateau on surface direct radiation. *Acta Meteor. Sinica*, 2002, **16**: 50~61
- [11] 朱新胜, 张耀存. 次网格地形坡度坡向参数化及其对区域气候模拟的影响. 高原气象, 2005, **24** (2): 136~142
Zhu Xinsheng, Zhang Yaocun. Parameterization of subgrid topographic slope and orientation in numerical model and its effect on regional climate simulation. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2005, **24** (2): 136~142
- [12] Hauge G, Hole L R. Implementation of slope irradiance in Mesoscale Model version 5 and its effect on temperature and wind fields during the breakup of a temperature inversion. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D2): doi: 10.1029/2002JD002575
- [13] 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
- [14] 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
- [15] Stephens G L. Radiation profiles in extended water clouds. Part 2: Parameterization schemes. *J. Atmos. Sci.*, 1978, **35**: 2123~2132
- [16] 李占清, 翁笃鸣. 一个计算山地地形参数的计算机模式. 地理学报, 1987, **42** (3): 269~278
Li Zhanqing, Weng Duming. A computer model determine topographic parameters. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1987, **42** (3): 269~278

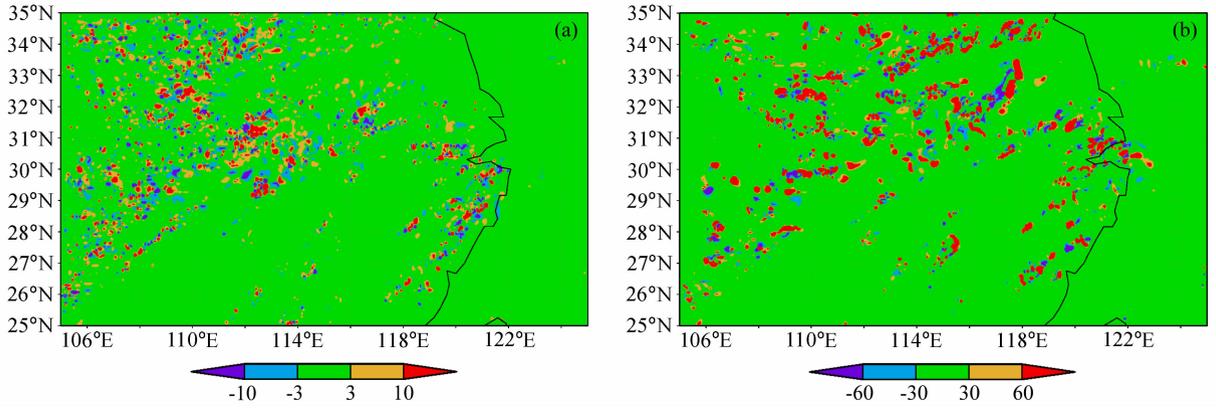


图 3 江淮流域梅雨锋区域高分辨率 (6 km) 情况下, 2003 年 7 月 8 日 00 时为初值预报的 GSW 变化百分率 (%) 的空间分布: (a) 12 h 预报的平均; (b) 9 h 预报

Fig. 3 Percentages (%) of GSW changes in the Yangtze-Huaihe Meiyu front areas at a higher resolution (6 km), initial time is 0000 UTC 8 Jul 2003; (a) Average of 12 h forecasts; (b) 9 h forecasts

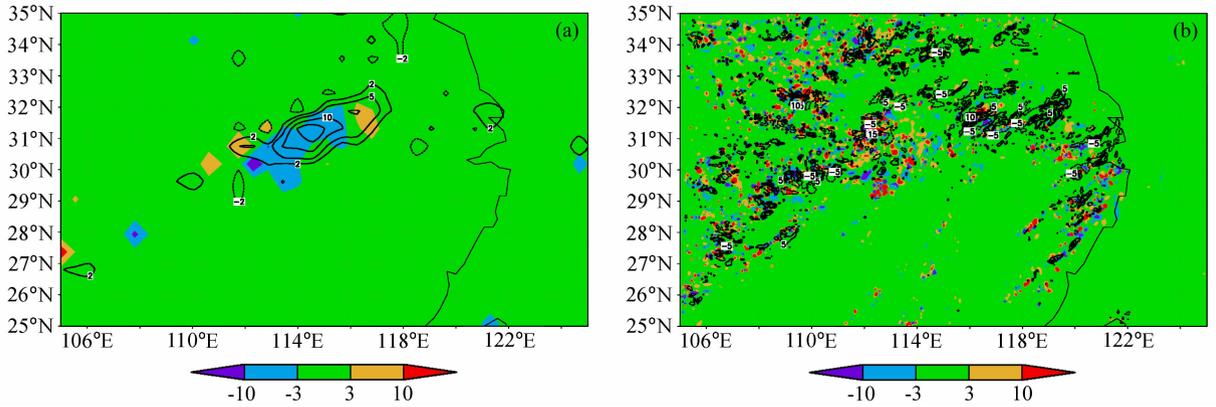


图 4 江淮流域梅雨锋区域 12 h 预报的平均 GSW 变化百分率 (% , 彩色阴影) 与降水差 (单位: mm, 等值线) 的空间分布图 (初值为 2003 年 7 月 8 日 00 时): (a) 试验 1 低分辨率 (60 km); (b) 试验 2 高分辨率 (6 km)

Fig. 4 Percentages (% , shadow) of GSW changes averaged for 12 h forecasts and differences of precipitation (mm, isoline) for 12 h forecasts in the Yangtze-Huaihe Meiyu front areas, the initial time is 0000 UTC 8 Jul 2003; (a) Test 1 for a lower resolution (60 km), (b) test 2 for a higher resolution (6 km)

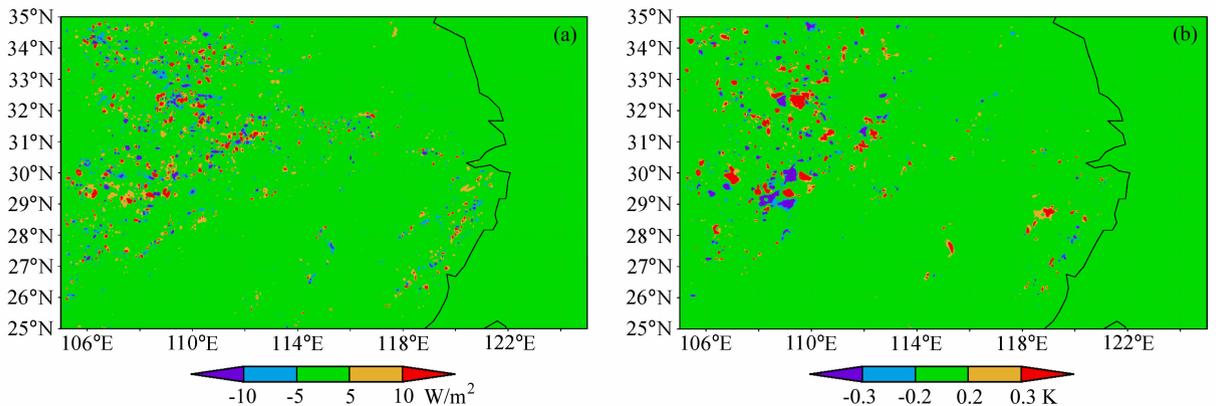


图 6 江淮流域梅雨锋区域高分辨率 (6 km) 情况下, 2003 年 7 月 8 日 00 时为初值 12 h 预报的平均地表热通量 (a) 和地表温度差 (b)
Fig. 6 Differences (SLOPE-FLAT) of (a) the surface heat fluxes and (b) the surface temperatures in the Yangtze-Huaihe Meiyu front areas at a higher resolution (6 km) for average of 12 h forecasts, initial time is 0000 UTC 8 Jul 2003