

边界层参数化对“雅安天漏” 降水数值模拟的影响

蔡芎宁¹ 周庆亮¹ 钟 青² 寿绍文³

(1. 国家气象中心,北京 100081; 2. 中国科学院大气物理研究所;
3. 南京信息工程大学大气科学系)

提 要: 选取了 2001 年 7 月 3 个“雅安天漏”个例,采用非静力中尺度数值模式 MM5V3 进行模拟,着重研究了 MRF 边界层参数化方案对雨量中心强度和雨区分布的影响,结果发现 MRF 方案的总体预报效果较好,并能很好地刻画雅安暴雨时的纬向垂直环流结构;在复杂地形条件下,特别是降水有明显日变化的地区,边界层的作用非常重要。

关键词: 边界层参数化 “雅安天漏” 复杂地形 数值模拟

Impact of Boundary Layer Parameterization on Numerical Simulation of “Ya-An-Tian-Lou”

Cai Xiangning¹ Zhou Qingliang¹ Zhong Qing² Shou Shaowen³

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081; 2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences;
3. Department of Atmospheric Sciences, NIM)

Abstract: Using nonhydrostatic mesoscale numerical model MM5V3 to conduct simulation for 3 “Ya-An-Tian-Lou” cases, special analysis is made to see the impact of boundary layer (BL) parameterization scheme MRF on the maximum intensity of rainfall and the distribution of rain area. The results show that MRF scheme has good forecast effect, and can describe the zonal-vertical circulation structure when rainstorm occurs in Ya’an; Under the condition of complex topography, the role of BL is very important, especially where the precipitation has obvious daily change.

Key Words: boundary layer parameterization “Ya-An-Tian-Lou” complex topography numerical simulation

引言

雅安(30°N、103°E)位于我国四川省西部,东邻川西平原,西接青藏高原,为盆地到高原的过渡地带。雅安的地形兼有“迎风坡”和“喇叭口”特点(图1),常受高原西来气流和盆地暖湿气流的交互影响,使雅安不但雨日多、雨时长,而且雨量大。无论是年雨量、雨日和暴雨日数,都是高原东侧的最大值区,历来素有“天漏”之称。雅安的年雨日高达218天,且降水强度大,多为局地性降水^[1-2]。过去的研究工作^[3]从天气学分析的角度,初步弄清了“雅安天漏”与地形的关系,以及“雅安天漏”的物理量和降水特征,但由于受到观测资料的限制(比如雅安地区没有高空站),有些结论还需要进一步研究。宇如聪等^[4]和曾庆存等^[5]用一个有限区域数值预报模式,对10个“雅安天漏”个例进行了数值预报试验,但其中采用的是简单的总体空气动力学方案(Bulk Aerodynamic PBL),该方案把整个边界层作为一个简单的混合层来处理,只能描述边界层的整体特性^[6],而实际边界层中存在各种尺度的大气过程,所以有必要考虑多个层次的边界层结构^[7-8]。MRF方案是一种高分辨率边界层参数化方案,它在近中性及稳定层结的情况下采用K理论,K应用Holtslag等的三次函数形式^[6],并加入了

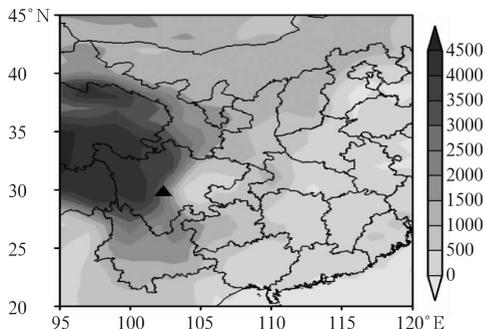


图1 雅安地形图(单位:m)

(本文所有图中黑色小三角均为雅安所在地)

反梯度传输项;而白天根据自由对流特征建立的传输模式描写不同高度大气的交换。本文利用数值模拟方法,期望细致地揭示物理量空间分布及时间演变特征,通过MRF方案对3个“雅安天漏”个例进行数值模拟试验,考察雅安复杂地形条件下,边界层物理过程与自由大气运动的相互作用对暴雨的影响。

1 数值试验方案

本文个例的模拟设计均采用全物理过程模拟方案。

(1) 双向作用嵌套网格系统:母域中心定位于(35°N、105°E);粗、细网格距分别为45km和15km。

(2) 模式顶气压为100hPa;垂直 σ 方向上分为24层。本文研究重点在边界层,所以垂直方向采取非均匀分层,并且在边界层内分得密一些。

(3) 初始条件:1.0°×1.0°NCEP再分析资料以及实时探空资料和地面观测资料。

(4) 边界层参数化采用MRF方案,积云对流采用Grell方案;辐射采用CCM2方案。MM5中有多个边界层方案可选,但过去的试验表明^[9],MRF方案的总体预报效果较好,因此本文将作为控制试验。另将不考虑边界层作用的试验定义为None方案。

(5) 所选的天漏个例降水均达暴雨级别以上:2001年7月10—11日、24—25日以及27—28日。为了后面讨论方便,现将这3个个例(简称CY1、CY2、CY3)按表1分别给出,模拟时间均为24h。本文若无特别说明,所有时间均为北京时间。

2 降水场和形势场模拟结果分析

2.1 个例1

2001年7月10—11日,雅安出现了特大

表 1 3 个个例简称及相应的 24h 降水实况和模拟结果

个例	起始时间	终止时间	24h 降水实况(mm)	MRF 方案(mm)	None 方案(mm)
CY1	2001 年 7 月 10 日 08 时	2001 年 7 月 11 日 08 时	63	40	20
CY2	2001 年 7 月 24 日 08 时	2001 年 7 月 25 日 08 时	173	160	65
CY3	2001 年 7 月 27 日 08 时	2001 年 7 月 28 日 08 时	56	45	7

暴雨。这是一次典型的副高边缘、西风短波槽触发的暴雨过程,也是造成“雅安天漏”最多的天气过程。由图 2 可见,10 日 08 时整个对流层的风场较弱,中纬度为稳定的“东

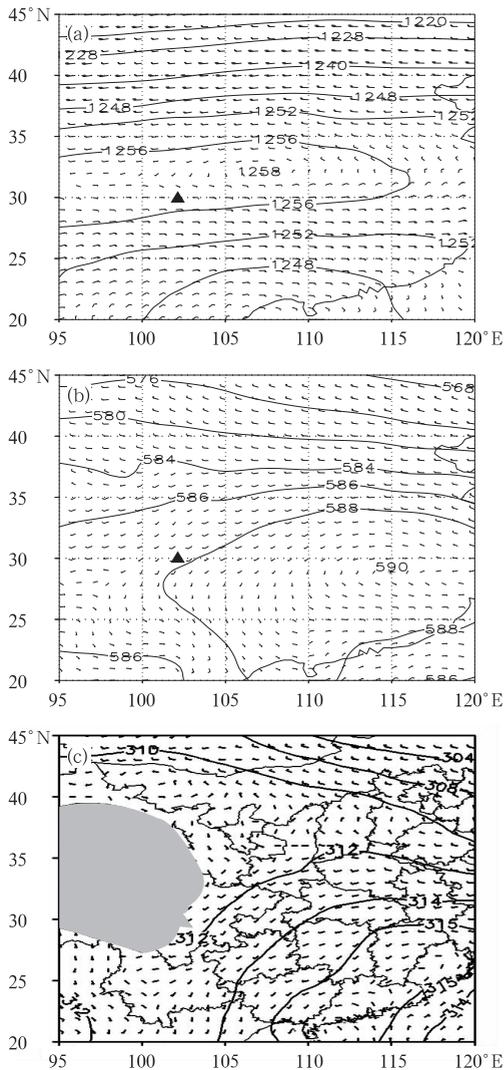


图 2 2001 年 7 月 10 日 08 时 CY1 的初始场 (a) 200hPa 形势; (b) 500hPa 形势; (c) 700hPa 形势(图中阴影部分为地形)(单位: dagpm)

高西低”形势,副高 588 线控制在川东一带,风向主要为西南风,带来了大量暖湿气流,雅安位于西太平洋副热带高压脊线西至西北侧湿润的西南气流中。700hPa 形势图中,雅安位于低涡右前方、副高西北边缘的一个西风短波槽内。200hPa 层上,南亚高压东西脊线位于 32°N 附近,雅安位于脊线南侧,受高压中心附近的偏东气流控制。24h 后,即 11 日 08 时,整个天气形势变化不大。比较预报的 24h 天气形势和实况可知,预报结果和实况大体相似。200hPa 和 500hPa 位势高度场与客观分析场相比存在一定的偏差,强度偏弱。由于地形高度的影响,700hPa 位势高度场在雅安附近及青藏高原一带都没有等高线。图 3 和图 4 分别给出了这个过程的 24h 降水实况和预报的降水量(降水中心值见表 1)。无论是降水范围还是降水量,MRF 方案预报的雅安及其附近的降水还是比较成功的,与实况大体接近。

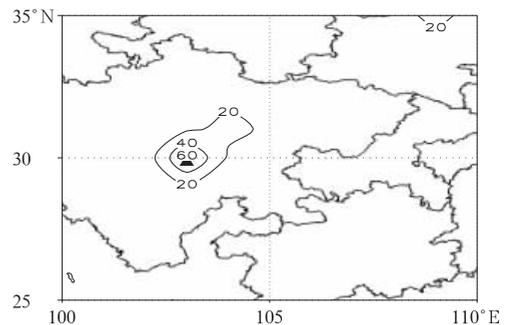


图 3 2001 年 7 月 10—11 日 CY1 的 24h 实测降水量(单位:mm)

2.2. 个例 2 和个例 3

由于篇幅所限,本文重点针对有代表性

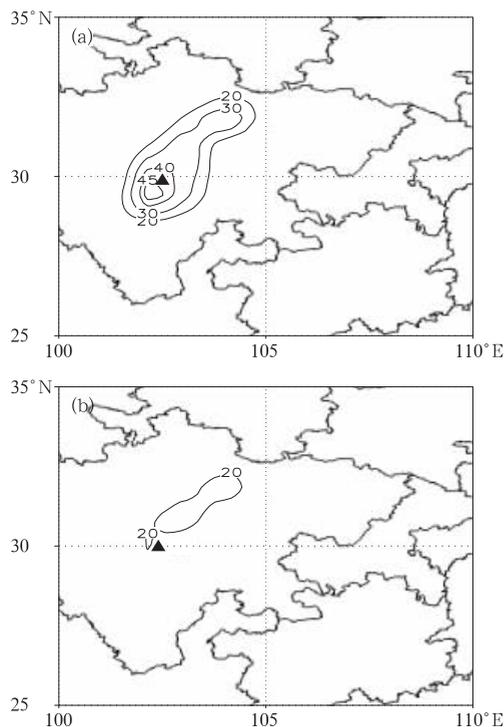


图 4 MRF 方案(a)和 NONE 方案(b)预报 CY1 的 24h 降水量(单位:mm)

的 CY1 进行分析,其余个例的图略,降水量预报结果见表 1。CY2 在 24 日 08 时 500hPa 图上,雅安东部为副高控制,但副高偏弱,副高西北侧有明显的西风槽,该西风槽未来 24h 东移南下引起降水。从 24h 的降水实况分布来看,此西风槽引起的降水在雅安及其北部有 2 个中心。模拟结果也基本上表现出了这 2 个降水中心(表 1 中给出的是雅安附近的降水中心值),且对雅安附近降水中心强度和位置的预报更接近实况。

CY3 在 27 日 08 时的天气形势表现为整个对流层风场较弱,雅安地区 500hPa 为弱的低槽控制,700hPa 为低涡控制。24h 后的天气形势变化不大。预报的 24h 形势场与客观分析场基本相似。比较这次降水的实况和预报结果可见,预报的 24h 降水中心位置和强度比较接近实况。

3 “雅安天漏”中的物理量结构

“雅安天漏”作为一种特有的局地性降水现象,降水过程中的物理量结构一定存在某种特征。由 CY1 的逐时雨强变化发现(图 5),雨强在午夜 02 时左右达到最大,降水具有明显的日变化。以下就用模式的 18h 输出结果作为暴雨的特征时刻,沿 30°N 做垂直剖面,分析雅安暴雨中的物理量结构。

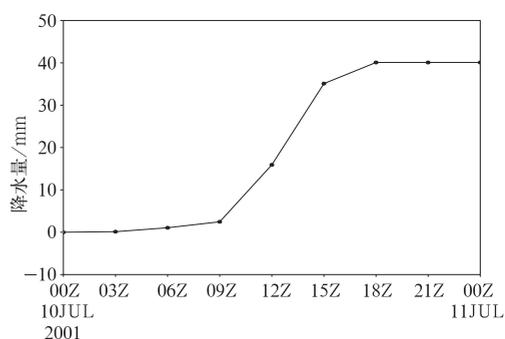


图 5 MRF 方案预报的 CY1 降水的日变化

200hPa 上川西受辐散场控制,400hPa 以下雅安附近为辐合区(图 6a)。川东在整个对流层内几乎都为辐散下沉,而川西上空为较强的上升运动,补偿的下沉气流主要在川东一带。类似地比较涡度结构(图 6b),雅安附近 400hPa 以上为负涡度,500hPa 以下均为正涡度。另外,暴雨盛期,在暴雨中心附近,这些物理量的量级具有中尺度特征。这些结果与 11 日 02 时雅安暴雨中的物理量实况场比较相似。

对 CY2 和 CY3 物理量结构分析表明,它们基本上都有 CY1 所述的特征。参照对 CY1 的具体分析,可将雅安暴雨中物理量结构概括为:500hPa 以下为正涡度和较强辐合,200hPa 为负涡度和较强辐散,涡度场随暴雨过程同步增强,且这一时期正对应于该区域散度的辐合;对流层内几乎都为上升运

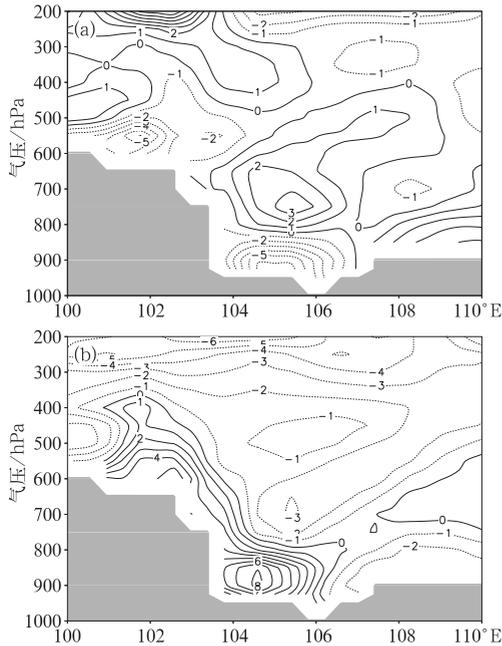


图 6 MRF 方案预报的 CY1 降水中的散度(a)、涡度(b)沿 30°N 的垂直剖面(午夜 02 时预报结果,阴影部分表示地形)(单位: 10^{-5}s^{-1})

动,最大上升运动在 500hPa 以上,平均无辐散层在 350hPa 附近;雅安上空上升运动较强,补偿的下沉气流主要在川东一带;气流上升到 200~100hPa 后向四周辐散、下沉。

4 边界层对“雅安天漏”的作用

4.1 不考虑边界层作用的模拟结果

为了能直观地认识边界层对“雅安天漏”的作用,将原预报模式中的边界层作用去掉,又对这 3 个个例进行了不考虑边界层作用的数值模拟试验。结果发现(由于 3 个个例结果相似,本文只给出 CY1 的情况,见图 4b,其余值见表 1),3 个个例最大降水量与实况相差很大,且雅安附近是无雨或小雨。图 7 给出 CY1 在无边界层作用的情况下预报的散度和涡度沿 30°N 的垂直分布。由图 7a 可见,500hPa 雅安四周为弱的辐合,但雅安附近有一弱的辐散中心;对应高空 200hPa 亦

为辐散,但强度非常弱。边界层强辐合中心的出现是强降水发生、发展的重要条件,可见 MRF 方案更好地表现出了中尺度暴雨系统中“低层辐合,高层辐散”的概念模型。同样考察涡度结构(图 7b),发现雅安附近的涡度也非常弱。再比较无边界层作用的情况下预报的 500hPa 形势场(图 8)与客观分析场(图 2b)可见,客观分析场上雅安处于副高边缘,并且在副高西北侧迭加着一个西风短波槽;而预报的副高强度偏弱,雅安以北均为平直西风气流,没有预报出典型的“雅安天漏”环流形势。由上述分析可见,在地形陡峭、结构比较复杂的雅安地区,降水有明显的日变化,边界层的作用十分重要。

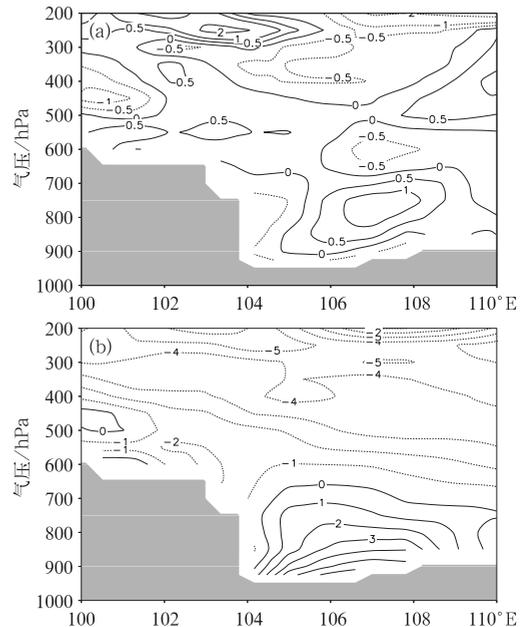


图 7 NONE 方案预报的 CY1 降水中的散度(a)、涡度(b)沿 30°N 的垂直剖面(说明同图 6)

4.2 “雅安天漏”的纬向垂直环流结构

下面以 CY1 为例,分析 MRF 方案刻画的雅安暴雨时的纬向垂直环流结构。初始时刻(08 时,见图 9),雅安东部处在背风坡的下沉气流中;往后高原东坡雅安低层出现上升运动,东部偏东气流加强,当偏东风西升至雅

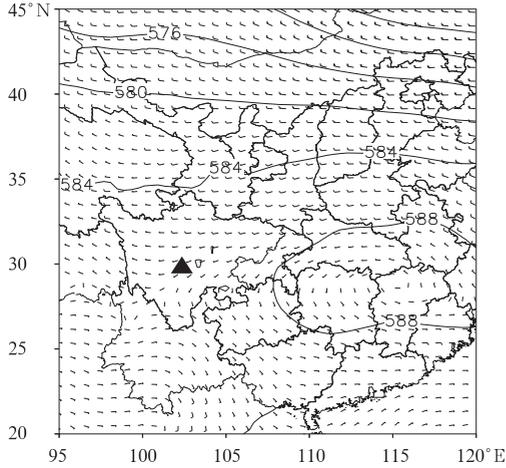


图 8 NONE 方案预报的 2001 年 7 月 10 日 08 时 CY1 的 500hPa 形势场(单位: dagpm)

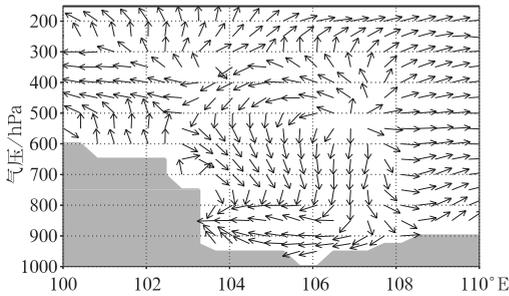


图 9 初始时刻(08 时)CY1 沿 30°N 的垂直剖面
其中阴影部分表示地形,
箭头是纬向风和垂直速度构成的垂直环流

安时,即东风沿雅安陡峭的地形爬坡上升,上升气流超过高原顶部后,一部分与越过高原的西风合并向东下沉,在 850~500hPa 之间形成一支纬向垂直环流圈;到 20 时(图 10a)左右,雅安及其东部低层的东风进一步增加,另一部分超过高原顶部的上升气流与西部来自高原上的西风合并,使得上升增强,到 200hPa 后,随南亚高压的偏东气流西去下沉,从而在 500~200hPa 之间形成第二支垂直环流圈。后来随着降水加强,低层偏东风加强,垂直上升也越来越强,大约到次日 02 时(图 10b)垂直上升运动最强,垂直环流也达到最强;往后东风爬坡气流开始减弱,到次日 08 时,雅安地面已转为西风,东部又为西风背风坡下沉,低层的垂直环流基本消失。

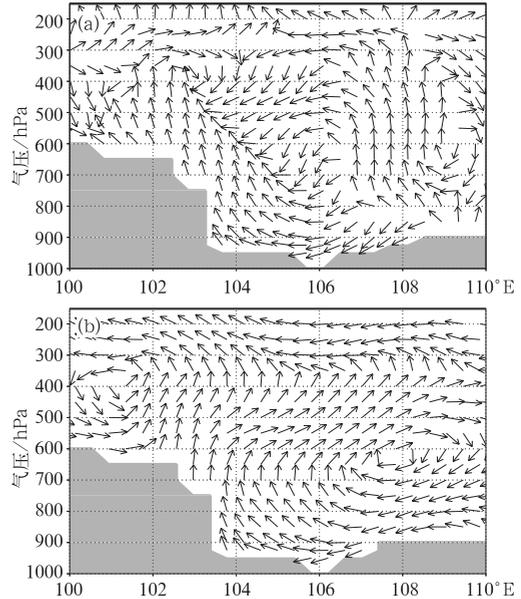


图 10 MRF 方案预报的 20 时(a)和 02 时(b) CY1 沿 30°N 的垂直剖面(说明同图 9)

不考虑边界层作用时,雅安附近的散度场和涡度场非常弱,不足以产生大的降水,降水中的纬向环流完全是由于动力补偿作用形成的地形局地环流,并且垂直上升运动限制在 600hPa 以下(图 11)。

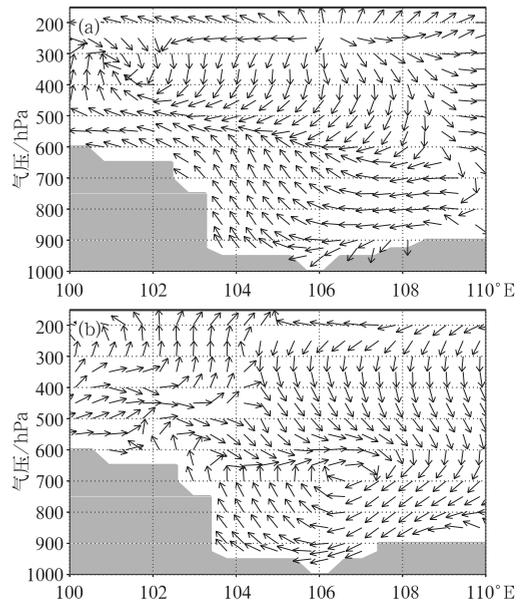


图 11 NONE 方案预报的 20 时(a)和 02 时(b) CY1 沿 30°N 的垂直剖面(说明同图 9)

为了进一步分析雅安暴雨时的纬向垂直环流结构,给出了 MRF 方案预报的降水中沿 30°N 的 θ_{se} 场垂直剖面(图 12)。通常用 ρ 、 p 表示力管项的作用,也可以用 θ_{se} 、 p 表示。白天(图 12a),山坡附近的空气升温比同一气压高度上离山谷较远的地方空气升温快,同一等压面上暖区空气密度小,冷区空气密度大,等 θ_{se} 面向暖区倾斜。于是大气的斜压性增强,并且由于力管的作用,顺时针方向的环流不断加强。暖区上空,气压梯度力促使空气向冷区流动,而在冷区低空,气压梯度力促使空气向暖区流动,即气压梯度力有促使等 θ_{se} 面变成平行于等压面的趋势。加上摩擦效应总是和力管的动力作用相反,并且随着环流的加强会逐渐加大,最后与力管的作用相抵消而形成一个稳定的闭合环流(图 12b)。

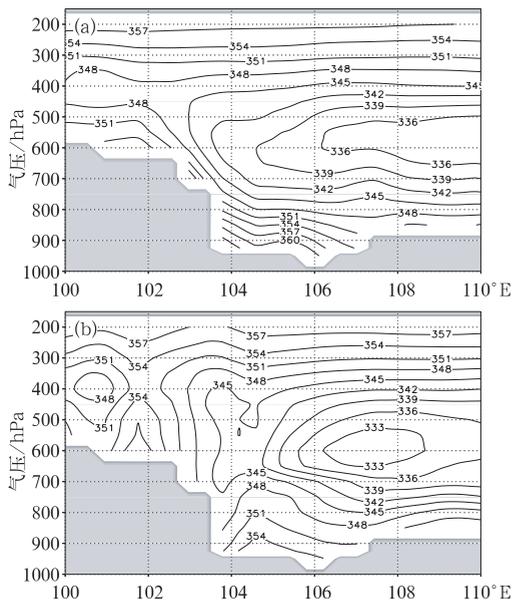


图 12 MRF 方案预报的 14 时(a)和 02 时(b) CY1 沿 30°N 的 θ_{se} 场垂直剖面(单位:K)

由于雅安所处的特殊地形有很陡峭的地形梯度,山体屹立在自由大气中,山谷环流表现得很明显。而边界层中的热力、动力作用则可以使垂直上升运动达到 200hPa 以上,从而形成深厚的环流。对于复杂地形和下垫

面地区,地形的动力作用会使流场发生形变,产生气流的辐合与辐散,增强气流的切变。地形或下垫面的加热不均会引起某些局地环流,如山谷风和城市热岛环流等。这些作用都会影响气流的轨迹和大气湍流强度。下垫面对大气运动的动力和热力强迫,实际上是大气(主要是低层大气)运动和下垫面的相互作用。它将导致跨越地形的爬升、环绕地形的绕流,在特定地区产生辐合带、辐合中心,其所导致的上升运动,在水汽供应和位势不稳定层结充分具备的条件下,将启动积云对流的发生和不稳定能量的释放,这正是暴雨产生的一种触发机制。下垫面强迫的辐合带、辐合中心的持续是形成大暴雨的重要因子之一。另外山地与毗邻平原之间的热力差异对地面流场也有较大的影响,其作用有明显的日变化,这对雅安降水夜间强度加大也有一定的贡献。

5 结 论

(1) 边界层参数化方案对雨量中心强度、雨区分布、散度和涡度的预报均有一定的影响。从各种物理量的预报结果和配置来看,MRF 边界层参数化方案的预报结果十分接近实况。

(2) 暴雨的发生发展,不仅依赖于大尺度形势场,而且与边界层过程有着紧密联系。暴雨是深厚的垂直环流作用的产物,而边界层对垂直环流的影响很大,从而对暴雨的影响也很大。因此,边界层方案是影响暴雨模拟的敏感因子。在陡峭的复杂地形条件下,边界层的作用是十分重要的,而且降水会有明显的日变化。

(3) “雅安天漏”具有两个纬向垂直环流圈与之配合,暴雨的发生、发展和减弱与环流圈的形成、加强和消散有密切关系。暴雨强盛期,雅安上空的垂直环流圈发展完整,低层

雅安东部四川盆地的偏东气流沿雅安陡峭的地形爬坡上升,上升气流超过高原顶部后,一部分与越过高原的西风合并向东下沉,在850~500hPa之间形成一支纬向垂直环流圈;而另一部分与西部来自高原上的西风波动叠加,使得上升增强,到200hPa后,随南亚高压的偏东气流西去下沉,从而在500~200hPa之间形成第二支垂直环流圈。这两支垂直环流的迭加构成了雅安暴雨中强烈的垂直上升气流,而力管项则起到了加速垂直环流的作用。

致谢:本文得到许焕斌教授的悉心指导,宇如聪研究员提供了2001年3个“雅安天漏”个例,在此一并深表感谢!

参考文献

- [1] 彭贵康,李志友,柴复新.雅安地形与降水的气候特征[J].高原气象,1985,3:230-240.
- [2] 吕炯.巴山夜雨[J].气象学报,1942,16:36-53.
- [3] 彭贵康,柴复新,曾庆存,等.“雅安天漏”研究 I:天气分析部分[J].大气科学,1994,18(4):466-475.
- [4] 宇如聪,曾庆存,彭贵康,等.“雅安天漏”研究 II:数值预报试验[J].大气科学,1994,18(5):535-551.
- [5] 曾庆存,宇如聪,彭贵康,等.“雅安天漏”研究 III:特征、物理量结构及其形成机制[J].大气科学,1994,18(6):649-659.
- [6] Garrett J R. Sensitivity of climate simulations to land-surface and atmospheric boundary layer treatments — a review[J]. *J. Climate*, 1993,6:419-449.
- [7] Xu LiRen, Zhao Ming. The influence of boundary layer parameterization schemes on mesoscale heavy rain system[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 2000, 17: 458-472.
- [8] 王康康,张维桓,张礼平. η 模式边界层方案的优化及其对暴雨的数值试验[J].气象,2003,29(2):7-12.
- [9] 蔡芎宁,寿绍文,钟青.边界层参数化方案对暴雨数值模拟的影响[J].南京气象学院学报,2006,29(3):364-370.