维普资讯 http://www.cqvip.com

第27卷 第2期 气 象 科 学 Vol. 27, No. 2
2007年4月 SCIENTIA METEOROLOGICA SINICA Apr., 2007

利用WRF对兰州冬季大气边界层的数值模拟

缪国军[1,2] 张 镭[1] 舒 红[3]
(1 兰州大学,兰州 730000)(2 73011部队,湖州 313006)(3 江阴市南菁高级中学,江阴 214432)

摘 要 本文介绍了WRF中尺度模式的有关概况,分析了模式的物理结构,并利用WRF中尺度模式对河谷城市兰州冬季大气边界层的风场和温度场进行了数值模拟研究。模拟结果与观测事实基本一致,表明WRF模式具有良好的稳定性能。

关键词 WRF模式 参数化方案 大气边界层 数值模拟
分类号 P404 **文献标识码** A

引 言

WRF(Weather Research and Forecast)模式系统是由许多美国研究部门及大学共同参与开发研究的新一代中尺度预报模式和同化系统[1]。重点解决水平分辨率为1～10 km、时效为60 h以内的有限区域天气预报和模拟问题。具有全球各地设置使用、实时输入资料、采用先进的物理过程参数化方案、可在不同的计算机平台上运行等诸多特点。WRF模式在天气预报、大气化学、区域气候、纯粹的模拟研究等方面有广泛的应用前景,它使新的科研成果运用于业务预报模式更为便捷[2-3],有助于开展针对我国不同类型、不同地域天气过程的高分辨率数值预报和模拟研究。

1 WRF模式基本方程组

根据Laprise的推导方法[4],方程取地形追随静力气压垂直坐标,即垂直质量坐标η(修正的σ面坐标)[5],形式为

$$\eta=(p_h-p_{ht})/\mu \tag{1}$$

其中,$\mu=p_{hs}-p_{ht}$,p_h为气压的静力平衡分量,p_{hs}和p_{ht}分别为地形表面和边界顶部的气压。由于$\mu(x,y)$可看作为模式区域内(x,y)格点上的单位水平面积上气柱的质量,所以近似的通量形式的保守量则可写为

$$\bar{V}=\mu\bar{v}=(U,V,W),\Omega=\mu\eta,\Theta=\mu\theta \tag{2}$$

定义扰动量对参考态的偏差,即

$$\begin{aligned} p&=\bar{p}(z)+p'\\ \varphi&=\bar{\varphi}(z)+\varphi'\\ \alpha&=\bar{\alpha}(z)+\alpha'\\ \mu&=\bar{\mu}(x)+\mu' \end{aligned} \tag{3}$$

由于η坐标的坐标面一般都不是水平的,因此参考状态量$\bar{p},\bar{\varphi},\bar{\alpha}$通常是$(x,y,\eta)$的函数。利用这些扰动量,在不做任何近似的情况下,去除掉静力平衡部分,利用上述保守量,Laprise方程组可写成如下通量预报形式

$$\frac{\partial U}{\partial t}+(\nabla\cdot\bar{v}U)_\eta+\mu\alpha\frac{\partial p'}{\partial x}+(\eta\mu\frac{\partial\bar{p}}{\partial x})\alpha'+\mu\frac{\partial\varphi'}{\partial x}+\frac{\partial\varphi}{\partial x}(\frac{\partial p'}{\partial\eta}-\mu')=F_U \tag{4}$$

收稿日期:2005-11-13;**修改稿日期**:2006-03-10
基金项目:本文由国家自然科学基金项目(编号:40275039)资助
第一作者简介:缪国军(1972-),男(汉),江苏如东,工程师,硕士,现在浙江湖州市73011部队,主要从事数值天气预报与研究
E-mail:armymgj@126.com

维普资讯 http://www.cqvip.com

$$\frac{\partial V}{\partial t}+(\nabla\cdot\bar{v}V)_\eta+\mu\alpha\frac{\partial p'}{\partial y}+(\eta\mu\frac{\partial\bar{\mu}}{\partial y})\alpha'+\mu\frac{\partial\varphi'}{\partial y}+\frac{\partial\varphi}{\partial y}(\frac{\partial p'}{\partial\eta}-\mu')=F_V \tag{5}$$

$$\frac{\partial W}{\partial t}+\nabla\cdot(\bar{v}W)_\eta-g(\frac{\partial p'}{\partial\eta}-\mu')=F_w \tag{6}$$

$$\frac{\partial\Theta}{\partial t}+(\nabla\cdot\bar{v}\Theta)_\eta=F_\Theta \tag{7}$$

$$\frac{\partial\mu}{\partial t}+(\nabla\cdot\bar{v}V)_\eta=0 \tag{8}$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t}+(\bar{v}\cdot\nabla\Phi)_\eta=gw \tag{9}$$

方程组要求满足诊断关系

$$\frac{\partial\varphi'}{\partial\eta}=-\bar{\mu}\alpha'-\alpha\eta' \tag{10}$$

和气体状态方程

$$p=\left(\frac{R\Theta}{p_0\mu\alpha}\right)^\gamma \tag{11}$$

其中，g 为重力加速度，$\gamma=c_p/c_v=1.4$ 为 Poisson 指数，其他为气象学通用量。

2 数值模拟设计

2.1 模拟区域基本参数

本文模拟区域为 35.98～36.22 °N，103.51～104.02 °E；东西长 46 km，南北宽 27 km，包括兰州河谷盆地及周围山区；模拟区域中心点为 36.10 °N，103.76 °E；东西向格点数为 46，南北向格点数为 27；模式的水平网格距 D=1km；模式的垂直分辨率 $k_\eta=33$ 层；模式大气顶气压 $P_t=100$ hPa；模式时间步长 $\Delta t=5$ s。模式 η 分层为：

1.000，0.993，0.967，0.941，0.913，0.885，0.856，0.826，0.796，0.765，0.733，0.701，0.669，0.635，0.602，0.568，0.534，0.499，0.465，0.430，0.396，0.361，0.328，0.294，0.261，0.229，0.198，0.168，0.139，0.111，0.084，0.036，0.000；

2.2 模式参数化方案选择

(1) 积云对流参数化方案：由于本文模拟的网格距小于 5 km，且模拟期间天气过程以晴天无云为主，故不使用积云参数化方案[6]；

(2) 近地面层方案：MYJ Monin-Obukhov 近地面层方案；

(3) 边界层参数化方案：Eta Mellor-Yamada-Janjic TKE 边界层方案；

(4) 微物理过程参数化方案：NCEP 5 类方案；

(5) 辐射参数化方案：RRTM 长波辐射方案和 Goddard 短波辐射方案；

(6) 陆面过程参数化方案：OSU/MM5 陆面过程方案。

2.3 模式初始条件及侧边界条件

大尺度资料为由 NCEP/NCAR 提供的再分析资料 NNRP2，取冬季 12 月份陆面特征强迫大气，同时以相应时间大尺度资料作为初始场。模式初始值为 1989 年 12 月 14 日 00 UST，采用特定边界条件(真实大气方案模式自动寻找)，4 点双线性插值。积分时间为 48 h，每隔一个小时输出一次模拟结果。

2.4 模式模拟区域地形和下垫面分类

模式使用 NCEP 提供的全球 30 s 地形资料及全球 30 s USGS 下垫面分类资料，模拟区域地形见图 1

2.5 个例选择及简单的天气背景分析

1989 年 12 月 14—16 日期间，亚欧 500 hPa 位势高度上，中高纬度为纬向型环流，西北地区上空受西北气流控制，天气以晴为主，模拟期间无降水。

维普资讯 http://www.cqvip.com

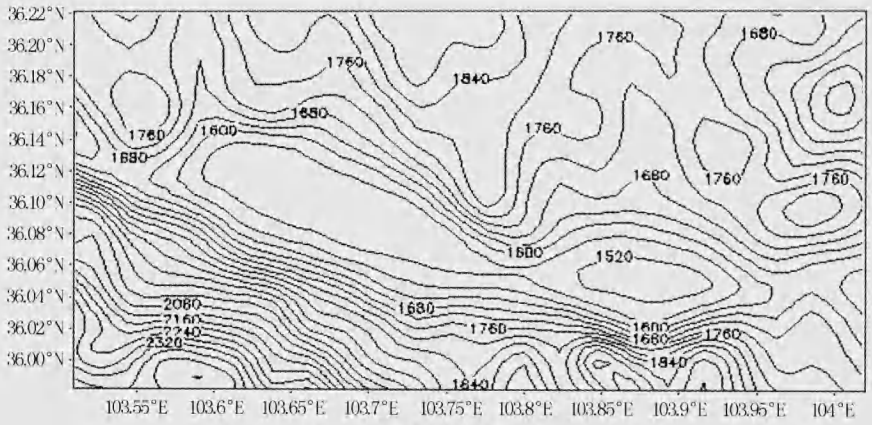


图 1　模拟区域地形图(单位:m)

Fig. 1　The landform of simulated area

3　WRF 模拟结果分析

3.1　近地面水平风场分析

图 2a 为 1989 年 12 月 15 日 13 时(积分 29 h)的兰州地区近地面模拟风场:

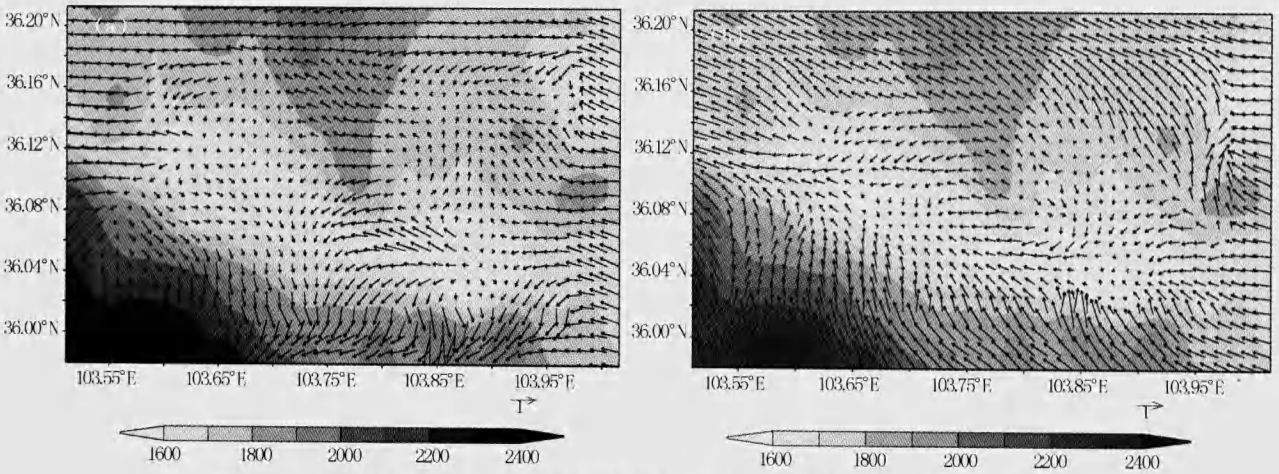


图 2　1989-12-15T13:00(北京时)近地面风场矢量图(a)和 12-16T01:00 近地面风场矢量图(b)

Fig. 2　The vector field of wind near the ground at 13 BST(a) and 01 BST(b)

由图 2a(北京时下午 13 时)可见,白天兰州市区周围山体总的来说盛行偏东风,尤其是东、西部山顶更明显,东、西部谷外风速在 1.0 m/s 左右。市内近地面流场由市区向周围山体辐散,市区内除西关附近外风速均小于 0.5 m/s,东西盆地中心是静风区,东部盆地以兰州大学(36.06 °N,103.86 °E)为代表的城关区,风速小于 0.2 m/s,向四周辐散;西部盆地以西固区为代表是风速小于 0.2 m/s 的偏西风,这一方面是由于偏东风遇山体阻拦转向所致,另一方面为较弱热岛环流所致。市区的西关为市内峡口,因峡谷风效应偏东气流流经此处突然增速,风速约为 0.7 m/s。市区南边的皋兰山坡是偏北风,风速约为 0.8 m/s,皋兰山顶则以偏东风为主,市区城关区北部山坡和安宁区西北部山坡是从市区上山的风速小于 0.3 m/s 的偏南风,北山山顶仍以偏东风为主。由此可见,白天市区地面流场是以山谷风环流造成的辐散场为主,而城市热岛效应造成的较弱热岛环流亦部分抑制了山谷风环流的作用。

图 2b 为 1989 年 12 月 16 日 01 时(积分 41 h)的兰州地区近地面模拟风场。可以看出,夜间兰州市主导风向仍为偏东风,周围山顶表现得更明显。市区近地面层是较强的辐合流场,由周围山体向谷中辐合。东部盆地辐合中心位于城关区的兰州大学附近,西部盆地分别在安宁区和西固区西北部有两个小的辐合中心,市区东、

维普资讯 http://www.cqvip.com

西盆地辐合中心风速均小于0.4 m/s,而西关附近同样由于峡谷效应,风速略大,风向为东风。兰州东部谷口处偏东风,风速约1.1 m/s,西部谷口处也为偏东风,风速在0.9 m/s左右,市区北部山坡风以东偏南风为主,南部山坡风为东南到南风,向市中心辐合。这一方面是由于夜间谷坡下垫面辐射冷却,近坡面空气迅速变冷,沿山坡下滑形成了下坡山风;另一方面,由于城市热岛效应所引起的热岛环流使得城市周围的空气流入城市,向热岛中心辐合,山谷城市兰州夜间的辐合流场是由于山谷风环流和城市热岛环流共同作用的结果。

据兰州市历年气象资料统计[7],兰州冬季低层风场主要盛行ESE风,冬季地面平均风速为0.3 m/s,静风频率为81%,其特殊气象条件表现为盆地内的风速较盆地外小。从以上两幅近地面风场模拟图分析可见,具有复杂地形的兰州市在冬季典型天气形势下,由于受到其特殊的下垫面边界条件影响,白天地面是辐散流场,风速很小,存在静风区域;夜间市区风速略大于白天,地面附近有较强的辐合流场,这是由于山谷风环流和城市热岛环流白天在低层方向相反,夜间低层环流方向一致造成的。上述模拟结果也与陈臻妹、王世红等[8]的观测事实一致。

3.2 垂直速度场分析

图3a、图3b为模拟29 h和41 h经过兰州大学(36.06 °N,103.86 °E)沿103.86 °E线,在皋兰山(S)与北山(N)间的经向剖面垂直速度场的分布情况。从图3a(1989年12月15日北京时13时)可以看到,皋兰山和北山上是气流上升运动区,垂直速度最大值达到0.25 m/s。市区上空基本上是气流下沉运动区,在兰州大学南北各有一个下沉运动高值区,中心位置距地面相对高度约为500 m左右,最大下沉速度分别为0.2 m/s和0.25 m/s,同时在市区北侧靠近北山上空相对高度1 200 m以上又出现了上升运动区。

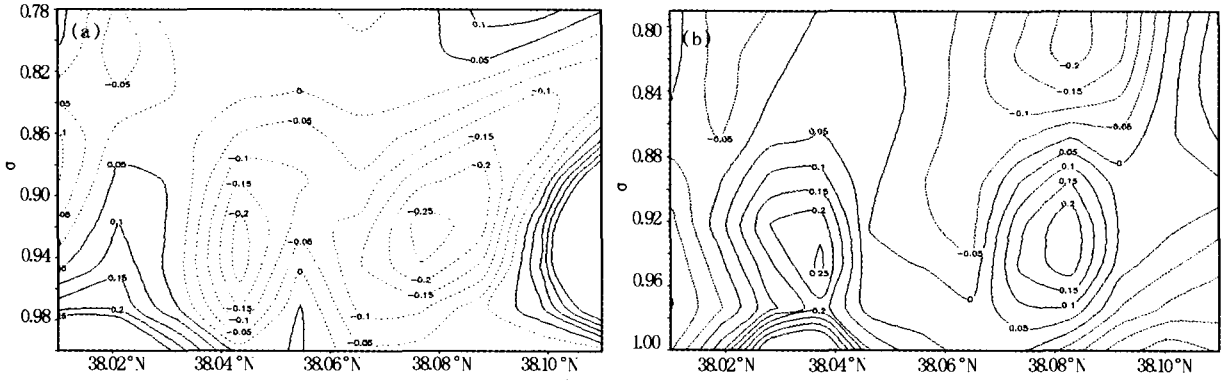


图3 1989-12-15T13:00垂直速度南北剖面图(a)和12-16T01:00时垂直速度南北剖面图

Fig. 3 The section of S-N vertical speed at 13:00 BST(a) and 01:00 BST(b)

由图3b(89年12月16日北京时01时)可见,夜间垂直运动与白天呈反相位。皋兰山和北山为下沉气流,垂直运动速度约0.1 m/s;市区上空为上升气流,同样在兰大南北两侧存在两个高值区,最大上升速度分别为0.25 m/s和0.2 m/s,其中在兰大南侧的高值区又有上下两个中心,相对地面高度分别为50 m和300 m,而在兰大北侧地面以上350 m左右是一个上升运动中心,相对高度900 m以上又是一个下沉运动区,表明兰州市区夜间虽然有上升气流,但上升运动区高度有限,在一定高度以上又会有下沉气流压下来。

从图2近地面风场和图3垂直速度剖面图可以明显的看到,兰州市区白天(北京时13时)地面流场辐散,市区上空是下沉气流;夜间(北京时01时)地面流场辐合,市区上空是上升气流,但在一定高度以上又有下沉运动。该模拟结果揭示了造成兰州市区污染物不易向外扩散,盆地内污染严重的重要气象条件,揭露了形成这种特殊气象条件的机制。

3.3 近地面气温与实测比较分析

图4a、b分别给出了兰州大学(36.06 °N,103.86 °E)点近地面位温和温度的模拟值与实测值的时间变化曲线。可以看到模拟值与实测值的日变化规律基本一致,最小值出现时间完全吻合,为北京时08时,但模拟最小值比实测最小值稍偏高;模拟最大值出现在北京时15时,位温最大值为290.82 K,温度最大值为5.1 ℃,模拟最大值比实测值稍偏低,最大值出现的时间与实测值不完全吻合,是因为实测值为2 h测一次,

维普资讯 http://www.cqvip.com

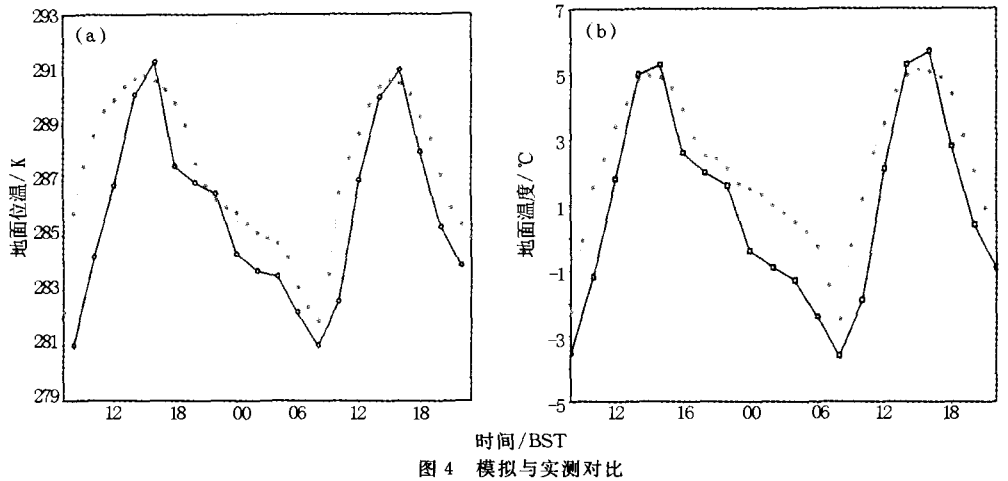


图 4　模拟与实测对比
(a)位温对比(K)　(b)温度对比(℃)
○ ○实测　* *模拟

Fig. 4　The comparing between simulation and observation

而模拟值是每小时输出一次,实测最大值可能并非如图中所显示。另外,由图中可以看到,位温和温度的变化趋势也基本一致。

3.4　模拟温度垂直廓线分析

图 5 给出了兰州大学(36.06 °N,103.86 °E)单站从地面到 500 hPa 高度的温度模拟廓线图,可以看到兰州市冬季晴好天气条件下,夜间逆温强度大持续时间长的特点。从其日变化看,兰州冬季近地面逆温在日落后开始形成,夜间 20 时出现较强的贴地逆温,从夜间 23 时到次日 08 时,逆温不但强度大而且可以到达地面,逆温层顶也伸展得比较高。值得一提的是,早晨 08 时边界层上、下层逆温特征非常明显。不但近地面层逆温强度大,而且在边界层中上层逆温层顶高度可达到 1 400 m 左右,但在边界层中部却不明显。日出后,逆温开始减弱,11 时逆温趋于脱地,在近地面层只存在一层脱地逆温。而下午 14 时以后,逆温变得很弱。17 时逆温完全消失。兰州冬季逆温生消规律与兰州冬季空气污染的日变化一致,即通常中午前后能见度较

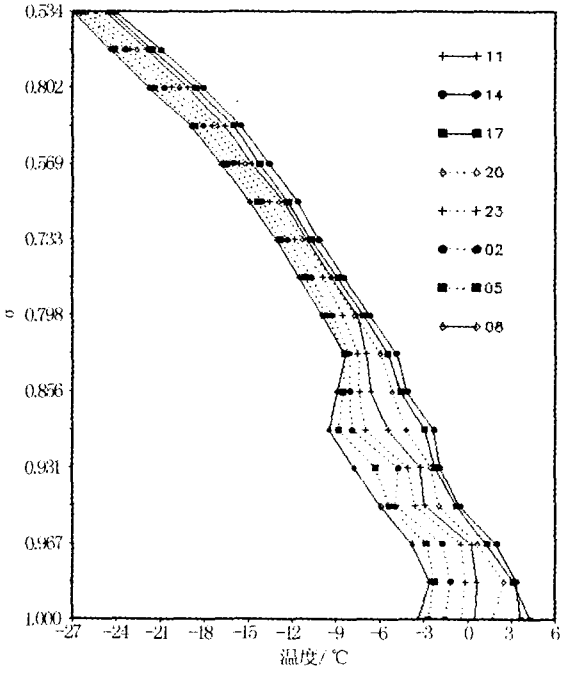


图 5　兰州大学单站温度廓线

Fig. 5　Temperature profile in the single site of Lanzhou University

维普资讯 http://www.cqvip.com

好，污染较轻；早晨或傍晚能见度很差，污染严重。表明了兰州冬季空气污染与逆温的生消规律有着直接的关联。

付培健、张镭等[9]根据兰州市多年气象观测资料的分析研究，认为受太阳辐射和城市烟雾层辐射等因素的影响，兰州城市边界层逆温层深厚、逆温强度大，持续时间长，全天约 15 h 维持整层逆温。混合层顶高度小，混合层形成发展快，一般得不到充分发展。图 5 模拟出的温度廓线分布再次证明了王海龙等的研究结论，表明 WRF 模式对温度场的模拟结果与观测事实是基本一致的。

4 小 结

本文利用 WRF 中尺度模式对河谷城市兰州冬季大气边界层的风场和温度场进行了数值模拟研究，模拟结果与现有理论及观测事实基本一致。模拟分析表明：

(1)WRF 模式在高分辨率(1 km)的情况下，模拟积分稳定，能够较好的模拟兰州地区冬季大气边界层特征。

(2)模式模拟出的地面流场主导风向为偏东风，具有明显的山谷风特征，冬季白天地面流场为辐散流场，夜间地面流场辐合明显，这是由于城市热岛效应和地形引起的下坡山风共同作用的结果，而且由于特殊山谷地形，地面静风频率很高，特别不利于污染物的向外扩散。

(3)模式模拟出的垂直速度场与近地面流场有很好的对应，白天市区的弱下沉运动对应地面流场的辐散，夜间市区的弱上升对应于地面流场的辐合。垂直运动场的模拟结果揭示了兰州冬季污染严重的重要原因之一。

(4)首次用 WRF 中尺度模式模拟了从地面到 500 hPa 高度的温度廓线，模拟结果表明，兰州冬季逆温特征明显，近地层逆温约在傍晚日落前后形成，夜间及凌晨较强，逆温特征最明显，白天 14—17 时逆温逐渐消失。

以上事实表明 WRF 中尺度模式可用于研究山谷城市的大气边界层情况。需要说明的是，本文模拟所使用的初始场资料是 NCEP/NCAR 再分析资料 NNRP2，对于山谷城市复杂下垫面的描写能力，尚需进一步检验；模式的许多物理过程参数化方案是直接从其它模式中移植过来的，对于城市和山谷特殊下垫面的模拟需进一步进行对比分析，并期待以后能发展和改进完全适合 1～10 km 分辨率的参数化方案。本文利用 WRF 中尺度模式研究山谷城市的大气边界层情况，仅仅作了一个初步的探索，今后仍需大量的个例试验工作，更加细致地模拟城市与山谷相互作用和影响的大气边界层特征。

维普资讯 http://www.cqvip.com

参 考 文 献

[1] 赵鸣,周炜丹,陈潜,汤剑平. 中尺度模式中辐射作用的的敏感性试验. 气象科学,2006,26(1):1-9.

[2] MICHALAKES,et al. . Development of a next-generation regional weather research and forecast model. // Argonne National Laboratory preprint,ANL/MCS-P868-0101,2001:8.

[3] Michalakes J,J Dudhia,D Gill J Klemp and W Skamarock. Design of a next-generation regional weather research and forecast model. // Towards Teracomputing World Scientific. River Edge. New Jersey,1999:117-124.

[4] Laprise René. The Euler Equations of Motion with Hydrostatic Pressure as an Independent Variable. Mon. Wea. Rev. ,1992,(120):197-207.

[5] Klemp,Skamarock,Dudhia. Conservative split-explicit time integration methods for the compressible nonhydrostatic equations. // Draft manuscript describing height and mass coordinates for the Eulerian WRF prototypes. 2000:238-247.

[6] 寇正,欧阳子济. 暴发性气旋发展中科压强迫与潜热释放作用的数值试验. 气象科学,1999,19(3):259-269.

[7] 王海龙,张镭,陈长,等. 兰州市东部地区冬季低空风场和温度场分析. 兰州大学学报(自然科学版),1999,35(4):117-123.

[8] 陈臻妹,王世红. 兰州市风场特征分析. 复杂地形上大气边界层和大气扩散的研究. 北京:气象出版社,1993:23-27.

[9] 付培健,张镭. 河谷城市冬季低空风温场观测研究. 复杂地形上大气边界层和大气扩散的研究. 北京:气象出版社,1993:12-17.

THE NUMERICAL SIMULATION OF THE WIND SPEED AND TEMPERATURE FIELD IN WINTER ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER IN LANZHOU BY USING WRF

Miao Guojun[1,2]　**Zhang Lei**[1]　**Shu Hong**[3]

(1*Lanzhou University*, *Lanzhou* 730000)(2*Army NO.* 73011, *Huzhou* 313006)

(3*Nanjing Senior High School*, *Jiangyin* 214432)

Abstract　The paper introduces the summary about WRF (Weather Research and Forecast) which is a middle scale model, and analyses the model's physical frame. Furthermore, the numerical simulation , which is about the wind speed and temperature field in the winter atmospheric boundary layer of Lanzhou city which lies in the hollow terrain, is carried out by using WRF . The result of simulation is nearly in accordance with the observation fact. It indicates that the WRF model has favorable steadiness.

Key words　WRF model　Parameterization scheme　Atmospheric boundary layer　Numerical simulation