

# 中尺度数值模拟中的边界层多尺度湍流参数化方案\*

朱蓉 徐大海

(中国气象科学研究院,北京 100081)

## 摘要

该文在多尺度湍流理论的研究成果基础上,将边界层湍流风谱与平均量的梯度相联系,建立了边界层多尺度湍流参数化子模式,之后放入 MM5 模式中进行了个例模拟研究,并与 MM5 模式附带的 MRF 边界层参数化、Blackadar 高分辨率边界层参数化的模拟结果进行比较和分析。结果表明,多尺度湍流理论能够反映出实际大气边界层中热量垂直输送的规律,将其用于中尺度数值预报模式的边界层物理过程参数化是可行的;多尺度湍流参数化在地表层和边界层内各个层次上都着重考虑含能量最大的涡的作用以及水平热力不均匀性的影响,因此在地形和下垫面比较复杂的区域,对中尺度天气系统的模拟有进一步发展的前景。  
关键词:多尺度湍流理论 非局地湍流理论 边界层参数化 中尺度数值模拟

## 引言

近年来人们越来越认识到,大气边界层中热量、水汽和动量的垂直输送对山谷环流、海陆风、对流风暴等中尺度天气系统的产生有一定的作用。根据国外业务和研究使用的中- $\alpha$  尺度数值模式(澳大利亚、加拿大、法国、日本和美国的 PSU/NCAR、FSU、NMC 及海军模式)对同一个例(1981年4月21~25日大西洋气旋的发生发展过程)进行的72h模拟预报(共作了42次试验)<sup>[1]</sup>的结果比较表明,影响中尺度预报的各个因子的重要性依次如下:边条件;湿物理过程;边界层参数化;初始条件;分辨率。可见,对中- $\alpha$  尺度系统的模拟来说,行星边界层参数化是较为重要的。因此,在中尺度数值预报模式的研究中,发展出了许多种边界层物理过程参数化方案。

在 Eulerian 网格的数值预报模式中,次网格尺度的垂直扩散是十分重要的,最常使用的垂直扩散技术是局地 K 理论<sup>[2]</sup>,即将湍流运动类比于分子运动,定义了湍流交换系数,把通量项与平均运动联系起来,然后用边界层的局地特性或相似理论进行参数化。因此,只有在湍流尺度相对于平均运动的尺度非常小时,这种局地一阶闭合方案才合理。在稳定和中性的大气层结条件下,这个条件还能满足,但是在不稳定层结条件下,起主导作用的涡旋尺度非常大,可以大到与对流边界层的厚度相当的尺度。对流边界层中的大多数湍流混合是由垂直运动完成的,这时平均梯度很小,甚至为零,大多数的湍流交换是由地表的浮力热羽引起的,可以达到对流边界层的顶部,有时还进入云盖逆温层,而且对流边界层还经常存在逆梯度输送现象,因此,无法用温度或风速等物理量的平均梯度进行模

\* 本文得到国家 973“我国重大天气灾害形成机理和预测理论研究”(973-06-02)资助。

2003-10-08 收到,2004-02-17 收到修改稿。

拟<sup>[3]</sup>。为了弥补这个缺陷,在全球环流模式和大尺度天气预报模式中出现了许多新的边界层物理过程参数化方案。

从 20 世纪 70 年代开始,在高分辨率的数值模式中经常采用二阶或三阶闭合方案。高阶闭合方案使模式中增加了一些新的方程,例如在包括湿度预报的二阶闭合方案中,增加了 15 个湍流预报方程,因而使模式能在更广泛的大气边界层条件下得到很好的应用。虽然高阶闭合方案能较真实地反映边界层中的物理过程,但是对大多数模式尤其是 GCM 模式来说,计算太复杂<sup>[4]</sup>。与此同时,越来越多的非局地湍流闭合方案不断的得到发展,用于模拟对流边界层的垂直扩散问题。非局地湍流闭合方案的提出是为了克服一阶闭合的缺点,同时又不使计算复杂。非局地闭合的概念是将湍流通量定义为大尺度梯度的函数,而不是  $K$  理论那样是局地梯度的函数,能更好地反映对流大气边界层中的物理过程,适合用于强对流天气过程的数值模拟。目前在区域数值预报模式的边界层物理过程参数化方案中较常用的非局地湍流理论有湍流穿越理论<sup>[5][6]</sup>和非局地  $K$  理论<sup>[3][7]</sup>。本文所研究和应用的多尺度湍流理论属于非局地湍流理论。

在湍流非局地闭合模式中,湍流混合不只发生在垂直方向上相邻的两个模式层之间,而且发生在不相邻的模式层之间。湍流穿越理论中的核心问题之一是确定穿越矩阵中的穿越系数,在理论上尚未完全解决。Stull 从实际应用的角度出发提出了几个方法,如 Stull 和 Driedonks<sup>[8]</sup>利用湍流动能方程的简单形式确定穿越系数矩阵的方法,同时用荷兰 Cabauw 塔上的一些个例资料对模式进行了调整和检验,证明了模式能够很好的模拟对流和稳定的边界层。但是,这种方法主要缺陷是所有的矩阵元素都是非零的,因而运算非常复杂。另一种方法是根据概念模式来确定穿越矩阵, Fiedler 和 Moeng<sup>[9]</sup>为对流边界层设计了一个湍流非局地闭合模式,模式在对流边界层中有 20 个等间距的垂直分层,穿越矩阵是  $20 \times 20$ ,它在对角线上的元素是非零的,最左侧的两列元素也是非零的,除此之外的元素都为零。表明最下两层与模式的其它层之间都有湍流交换。他们用这种方法能模拟出与大涡模拟相同的结果。Blackadar<sup>[10]</sup>为对流边界层设计了一个湍流非局地闭合模式,其概念与 Fiedler 和 Moeng 的方案相似,并且在 MM4 和 MM5 模式中得到了成功的应用。Blackadar 也是假设热羽起源于地表层之后,再向上输送到对流边界层中的每一层,同样对流边界层中的每一层又返回来与地表层发生混合,相邻两层间的湍流交换是不考虑的。目前国内在将湍流穿越理论用于数值模式边界层参数化研究方面也作了很多工作。例如,刘小红<sup>[11]</sup>将 Stull 提出的非均匀网格应用于大气边界层数值模式中,表明非均匀网格的湍流穿越模式能很好地模拟 Wangara 大气边界层平均量和湍流量的变化。蒋维楣等<sup>[12]</sup>在非局地闭合大气边界层模拟研究的基础上,建立了非局地闭合二维模式,并利用黑河试验资料对绿洲和沙漠交界地区的内边界层结构进行了模拟研究,得到了合理的 TIBL 结构的基本特征。

非局地  $K$  理论的闭合方案是由 Deardorff 提出的。Deardorff<sup>[7]</sup>根据热通量守恒方程,忽略热通量守恒方程中的传输项,同时将压强脉动项参数化,从理论上推导出了能反映感热通量逆梯度输送的表达式:

$$\overline{w'\theta'} = -k_h \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} - \gamma_c \right) \quad (1)$$

其中修正项  $\gamma_c$  为

$$\gamma_c = \frac{g}{\theta_0} \frac{\overline{\theta'^2}}{w'^2} \quad (2)$$

但式中的湍流扩散系数很难确定。随后,Deardorff 的这个感热通量表达式被用到了数值模式中。1982 年 Mailhôt 和 Benoit<sup>[13]</sup>将经过 Deardorff 修正的感热通量表达式,用于有限元边界层模式中,通过用 Wangara Australians 试验资料进行数值模拟,证明 Deardorff 的非局地 K 理论闭合方案比高阶闭合方案的模拟结果更接近实际,而且计算耗时少,内存空间占用小,适用于业务数值天气预报。此后,Deardorff 的感热通量表达式又被 Troen 和 Mahrt<sup>[14]</sup>在大尺度预报模式的边界层中使用,表明此方案在预报混合层厚度上取得了合理的结果。Hong 和 Pan<sup>[15]</sup>将非局地 K 理论闭合方案放入 NCEP 的 MRF 模式中进行敏感性试验和预报试验,并与局地相似理论方案对比。结果得到,在白天非局地边界层方案预报的边界层结构更接近于实际;逆梯度输送项使底层水汽向上输送,同时也使混合层趋于稳定;由于非局地 K 理论方案与地表物理过程匹配,所以在模式中能真实地处理地表过程和辐射传输过程。MM5 模式中也采用了 Hong 和 Pan<sup>[15]</sup>的非局地 K 理论的 MRF 边界层方案。

在研究边界层湍流运动中,湍流的尺度并非是单一的。因此大气边界层内的湍流交换也应该是处在不同空间位置上的大大小小的湍流共同作用的结果。徐大海<sup>[16-18]</sup>在湍流统计理论的基础上,从多尺度分解概念出发,建立了多尺度 Reynolds 方程组。证明了平均运动的 Reynolds 交换项应为各级子平均运动非线性项的平均和。将子尺度运动处理为描述质点个别运动的 Langevin 形式,推导出了感热输送通量的多尺度湍流统计理论表达式,其中特别包含了浮力对不同尺度的湍流的作用,在大涡和浮力的作用下,可产生逆梯度输送现象。在湍流输送过程中,所含能量大的或尺度大的湍流起的作用也大。此外,由于温度脉动使湍流在浮力作用下向边界层上层的输送,可以发生在边界层内的任何高度上,这与单纯的大涡输送概念是不完全相同的。徐大海的感热通量表达式与 Deardorff 的公式(1)形式完全相同,而且其中的湍流交换系数有了明确的表达,它能反映出地表的不均匀性和各种尺度的湍流相互作用对湍流交换的影响。多尺度湍流理论的感热通量表达式已被用来分析计算南极和青藏高原近地层热量输送的负粘性现象,表明多尺度湍流理论比经典相似理论有一定的进步<sup>[19][20]</sup>。

本文的目的是将多尺度湍流理论用于中尺度数值模拟,以研究湍流涡旋尺度谱的引入,能否提高对暴雨等中、小尺度的强对流天气系统的预报能力。本文编制了大气边界层多尺度湍流参数化子模式,然后放入中尺度数值预报模式 MM5 中对一些强降水过程进行了个例数值模拟,并与 MM5 模式本身带有的非局地理论的 Blackadar 高分辨边界层参数化方案和 MRF 边界层参数化方案的模拟结果相比较。

## 1 边界层多尺度湍流参数化方案的设计

按照多尺度湍流理论的感热通量公式,预报量的湍流扩散方程表示为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_c \left( \frac{\partial C}{\partial z} - \gamma_c \right) \right] \quad (3)$$

对于自由对流混合层

$$\gamma_c = \frac{g}{\theta_0} \frac{\sigma_\theta^2}{\sigma_w^2} \quad (4)$$

热量的湍流交换系数为

$$K_{zh} = \sigma_w^2 T_H \quad (5)$$

因此,下面需要确定的量是  $\sigma_\theta$ 、 $\sigma_w$  和湍涡尺度  $T_H$ 。除了可用高阶闭合求取这些量外,我们在此用经验公式进行计算,按文献[21]在自由对流混合层内,推广到全边界层的湍流量表达式为

$$\sigma_w = c_w \left( \frac{gh}{T_0} \frac{q_0}{c_p \rho} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{z}{h} \right)^{\frac{1}{3}} \left( 1 - \frac{z}{h} \right)^{\frac{1}{3}} \left( 1 + \beta \frac{z}{h} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (6)$$

$$\sigma_\theta = c_T \left( \frac{gh}{T_0} \right)^{-\frac{1}{3}} \left( \frac{q_0}{c_p \rho} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{z}{h} \right)^{-\frac{1}{3}} \left( 1 - \frac{z}{h} \right)^{\frac{2}{3}} \left( 1 + \beta \frac{z}{h} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

其中  $q_0$  为地面感热通量,  $h$  是混合层厚度,经验常数  $c_w = 0.75$ ,  $c_T = 1.6$ ,  $\beta = 0$ 。

通常我们习惯用  $u^2$  和  $\phi_z^2$  规一化的对数谱来研究湍流特征,湍谱上的极大值所对应的频率为峰值频率,表示其对应的湍流涡旋尺度所含能量最大。多尺度湍流理论的感热通量公式(3)中的湍涡时间尺度  $T_H$  为所有大小的湍涡尺度按所含能量加权平均所得,也就是说,能量越大的湍涡在湍流输送过程中所起的作用越大。由于从模式的预报量中无法分析出各种尺度的湍涡,所以本文用湍谱上含能区最大湍涡尺度作为式(3)中的湍涡时间尺度  $T_H$ 。Caughey 等<sup>[22]</sup>根据阿西哈观测资料得出了关于  $w$  谱的峰值波长  $\lambda_m$  的近似表达式,

$$(\lambda_m)_w = 1.8 h \{ 1 - \exp(-4 \frac{z}{h}) - 0.0003 \exp(8 \frac{z}{h}) \} \quad (8)$$

其中  $h$  为混合层厚度。使用指数衰减相关假设,欧氏积分时间尺度  $T_e$  与  $\lambda_m$  有以下关系<sup>[23]</sup>

$$T_e = \frac{\lambda_m}{2\pi w_*} \quad (9)$$

$w_*$  是对流速度尺度,

$$w_* = \left( \frac{gh}{\theta_v} \overline{w' \theta_{vs}'} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

拉格朗日时间尺度与欧拉时间尺度之比为<sup>[24]</sup>

$$\beta = \frac{T_L}{T_E} \quad (11)$$

徐大海<sup>[16]</sup>总结了文献上收集的实测数据,得到在不稳定大气层结条件下, $\beta$ 值取 1.1。

因此,根据公式(4)~(11),就可计算出逆梯度输送项  $\gamma_c$  和热量的湍流交换系数  $K_{zh}$ 。

## 2 中尺度暴雨过程的个例数值模拟

选用 2002 年 6 月 22 日 08:00 至 23 日 08:00(北京时,下同)的江淮流域暴雨过程,分别采用本文设计的多尺度湍流边界层参数化和 MM5 模式附带的 MRF 边界层参数化、

Blackadar 高分辨率边界层参数化方案,用 MM5 模式进行数值模拟,并将模拟结果进行比较。MM5 模式采用三重嵌套,水平网格分别为  $61 \times 61$ , 格距  $54 \text{ km}$ ;  $61 \times 79$ , 格距  $18 \text{ km}$ ;  $109 \times 127$ , 格距  $6 \text{ km}$ ; 垂直分辨率 25 层,选用 Grell 积云对流参数化方案、混合相水汽方案、云辐射方案和多层土壤温度模式,侧边界取松弛边界。

2002 年 6 月 22 日 08:00 至 23 日 08:00,受中低层切变线和增强的西南暖湿气流影响,河南东南部、安徽省北部、江苏北部出现大范围暴雨,部分地区大暴雨。其中河南桐柏日降水量  $179 \text{ mm}$ ,信阳  $159 \text{ mm}$ ,潢川  $155 \text{ mm}$ 。

图 1 是在 MM5 模式中分别采用多尺度湍流边界层参数化方案(Multi-scale)、MRF 方案和 Blackadar 高分辨边界层参数化方案预报的 2002 年 6 月 22 日 08:00 至 23 日 08:00 总降水量与实况值的对比,图 2 是 6 月 23 日 08:00  $850 \text{ hPa}$  的实况风场和预报风场。可以看出分别采用三种边界层方案后预报出的大尺度天气形势是基本一致的,三种方案都预报出了西南低空急流和中低层切变线,雨带的位置也基本正确。但由于  $850 \text{ hPa}$  预报风场上切变线和急流轴的位置稍有偏南,因此 24 h 总降水量预报图中雨带的位置都有一些偏南。

在这次暴雨过程中,有两次中尺度云团活动。一个在 6 月 22 日 05:00 初生于大约  $32^\circ \text{N}$ 、 $112.5^\circ \text{E}$  的位置,然后向东偏北方向移动,最后于 22 日 18:00 在  $32.5^\circ \text{N}$ 、 $114^\circ \text{E}$  的位置消失;另一个在 6 月 22 日 17:00 初生于大约  $32.5^\circ \text{N}$ 、 $113^\circ \text{E}$  的位置,然后向东移动,

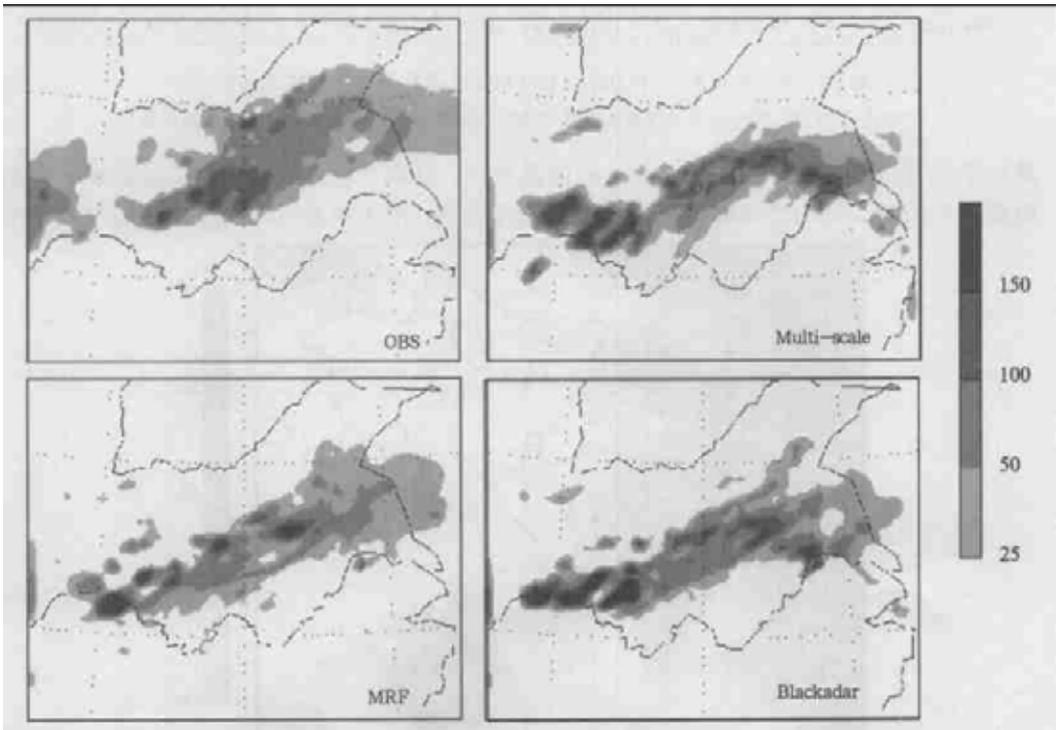


图 1 分别采用多尺度湍流边界层参数化方案(Multi-scale)、MRF 方案和高分辨边界层参数化方案(Blackadar)预报的 2002 年 6 月 22 日 08:00 ~ 23 日 08:00 总降水量与实况值(OBS)的对比(单位:  $\text{mm}$ )

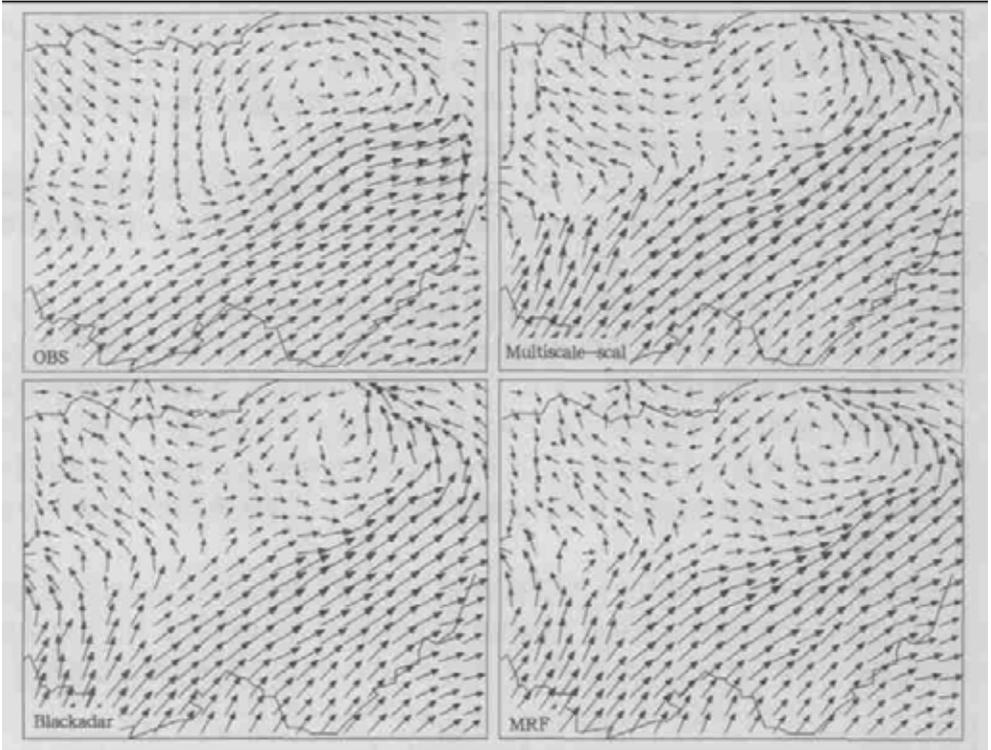


图2 2002年6月23日08:00 850 hPa风场的预报场和实况场的对比  
 (OBS:实况; Multiscale:多尺度湍流边界层; MRF: MRF边界层; Blackadar:高分辨边界层)

最后于25日05:00在 $32.5^{\circ}N, 116^{\circ}E$ 的位置消失。这两个中尺度云团的活动造成河南东南部伏牛山与大别山之间的 $168\text{ km} \times 78\text{ km}$ 范围内(图3中虚线内)18个地面气象站中

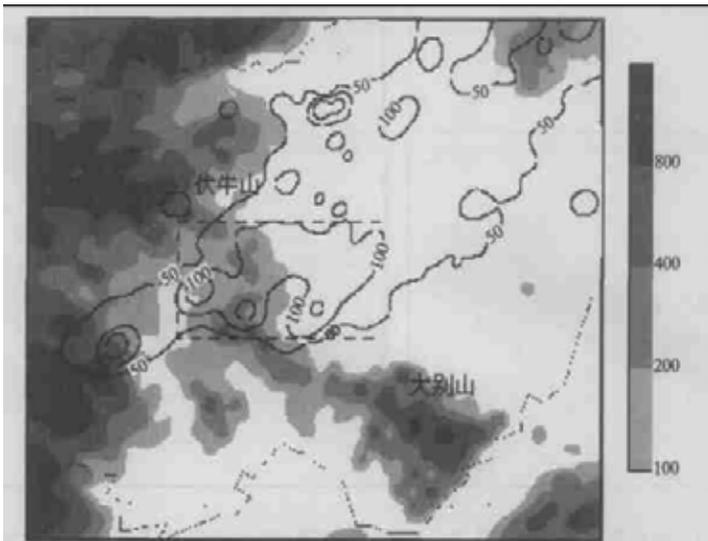


图3 河南与安徽部分地区2002年6月22日08:00~23日08:00总降水量分布(填色部分为地形高度,单位:m)

有 14 个站观测到 24 h 总降水量超过 100 mm,其中桐柏 179 mm,信阳 159 mm,潢川 155 mm。表 1 给出了分别采用三种边界层方案的 MM5 模式做出的这 18 个站点的总雨量预报值,其中多尺度湍流边界层参数化方案预报出 9 个站总雨量超过 100 mm,其中有 1 个站空报,桐柏站的预报雨量达到 187.6 mm,与实况值相当接近,总的降水 TS 评分达到 44%。MRF 边界层参数化方案预报出 1 个站总雨量超过 100 mm,总的降水 TS 评分为 17%。Blackadar 边界层参数化方案预报出 3 个站总雨量超过 100 mm,总的降水 TS 评分为 28%。多尺度湍流边界层参数化方案、MRF 和 Blackadar 高分辨率边界层参数化方案在暴雨(50 mm)以上的预报准确率分别为 78%、38%和 56%,在大暴雨(100 mm)以上的预报准确率分别为 44%、6%和 17%。

表 1 2002 年 6 月 22 日 08:00 ~ 23 日 08:00 18 个站点的实况和预报降水量及预报准确率

站名	站号	实况雨量 (mm)	Multiscale (mm)	MRF (mm)	Blackadar (mm)
驻马店(豫)	57290	113.2	9.4	5.0	3.9
固始(豫)	58208	77.9	44.3	26.5	48.3
信阳(豫)	57297	158.9	104.8	43.0	28.0
阜阳(皖)	58203	110.3	190.5	79.7	93.6
临泉(皖)	58107	118.9	122.6	75.6	33.9
桐柏(豫)	57285	179.2	187.6	50.9	25.8
罗山(豫)	57298	79.5	132.8	49.1	78.6
光山(豫)	57299	133.2	93.1	52.6	77.0
潢川(豫)	58207	155.4	131.2	43.0	58.6
淮滨(豫)	58205	125.9	92.1	55.1	62.5
息县(豫)	57296	87.4	93.2	50.4	94.3
阜南(皖)	58202	128.4	116.3	126.9	119.7
平兴(豫)	57292	117.5	74.5	25.0	48.3
确山(豫)	57294	100.8	115.0	15.9	20.9
汝南(豫)	57197	126.4	29.0	36.8	55.5
新蔡(豫)	57293	148.9	68.1	31.5	203.6
泌阳(豫)	57281	48.1	26.9	11.9	11.5
正阳(豫)	57295	128.5	105.3	43.8	131.8
TS 评分			44%	17%	28%
暴雨(50 mm)以上预报准确率			78%	39%	56%
大暴雨(100 mm)以上预报准确率			44%	6%	17%

图 4 是信阳站 6 月 22 日 08:00 ~ 23 日 08:00 的 6 h 降水量和分别采用三种边界层方案的 MM5 模式预报的 6 h 降水量的对比,可以看出信阳主要是受第二次对流云团的影响,降水主要发生在 22 日 20:00 ~ 23 日 08:00 的时段内。采用多尺度湍流边界层方案和高分辨率边界层方案的 MM5 预报的降水也是主要发生在 22 日 20:00 ~ 23 日 08:00,而采用 MRF 边界层方案预报的降水主要发生在 22 日 14:00 ~ 20:00。从降水量上看,采用多尺度湍流边界层方案预报的降水量与实况值更接近。图 5 是分别采用三种边界层方案预报的 6 月 22 日 20:00 信阳站的温度层结曲线。采用多尺度湍流边界层预报的温度层结曲线反应出信阳站 22 日 20:00 在 955 hPa 以下大气层结是绝对稳定的,955 hPa 到 920 hPa 是条件稳定的,920 hPa 以上是处于条件不稳定的,自由对流高度在 920 hPa 高度上。

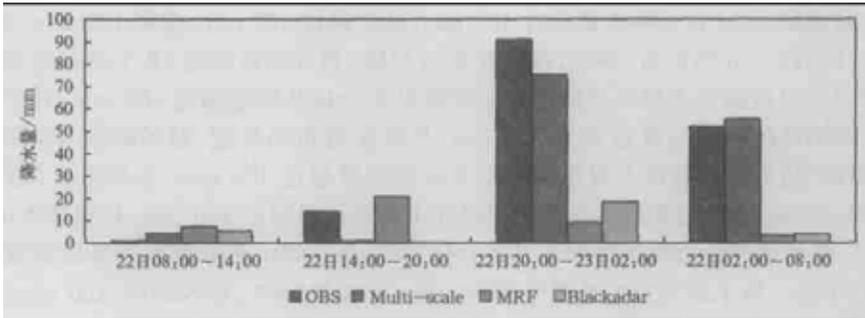


图 4 信阳气象站的 6 h 实况雨量与分别采用三种边界层方案的 MMS 模式预报降水量的比较  
(OBS:实况; Multi-scale:多尺度湍流边界层方案; MRF: MRF 方案; Blackadar:高分辨边界层方案)

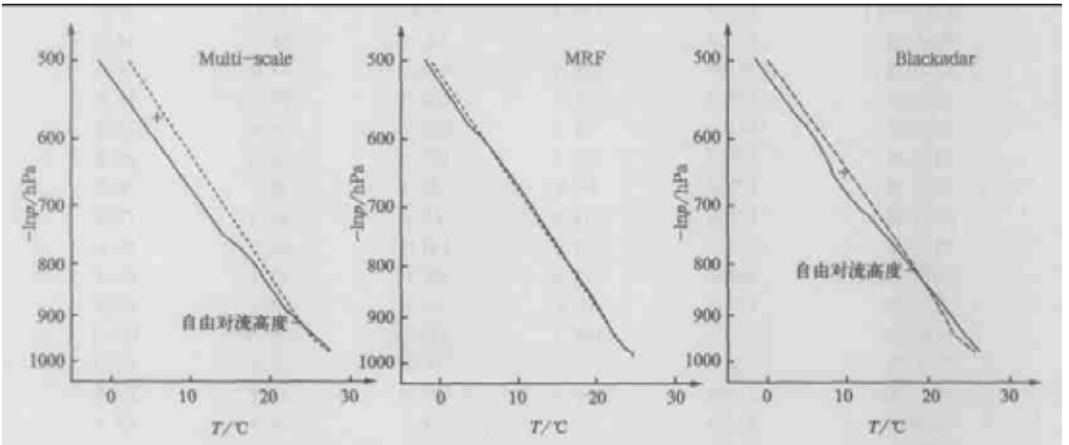


图 5 分别采用三种边界层方案的 MMS 模式预报的 6 月 22 日 20:00 信阳气象站的温度层结曲线  
(Multi-scale:多尺度湍流边界层方案; MRF: MRF 方案; Blackadar:高分辨边界层方案)

由于自由对流高度很低,很容易由于地形或低层浅薄冷空气的侵入等因素引起气层抬升,激发对流性暴雨。采用 Blackadar 高分辨率边界层方案预报的温度层结曲线上,955 hPa 以下是绝对稳定的,955 hPa 到 810 hPa 之间是条件性稳定的,810 hPa 以上是条件性不稳定的,自由对流高度在 810 hPa 高度上,明显比多尺度湍流边界层方案预报的高。如果用沙氏指数(SI)表示气层的稳定状况,则多尺度湍流边界层预报的沙氏指数 SI 值为 -1.5, Blackadar 高分辨率边界层方案预报的沙氏指数 SI 值为 -1.1, MRF 边界层预报的沙氏指数 SI 值为 -0.6,可见多尺度湍流边界层预报的温度层结曲线的不稳定能量面积比另外两个方案要大的多,更容易发生对流性暴雨。而 MRF 边界层预报的温度层结曲线是近中性,不满足产生暴雨的条件。多尺度湍流边界层方案在模式边界层的每个层次上都计算含能量最大湍流的尺度,由此考虑湍流热量交换的范围,反映出了边界层内不稳定能量的积累过程。而 Blackadar 高分辨率边界层中是边界层内每一层都与地表进行湍流热量

交换,也就是说只考虑发生在地表的各种尺度的热泡或热羽将热量向上输送的过程, MRF 边界层只考虑地表层与边界层顶层的湍流热量交换,这可能是在本文个例模拟中多尺度湍流边界层预报的降水量比 Blackadar 和 MRF 边界层预报的降水量更接近实况的原因。从 MM5 模式预报的信阳站风场的垂直分布随时间的变化(图 6)可以发现,950 hPa 以下信阳站的风向是西北向的,有可能将冷空气输入,引起气层抬升,激发对流性暴雨。

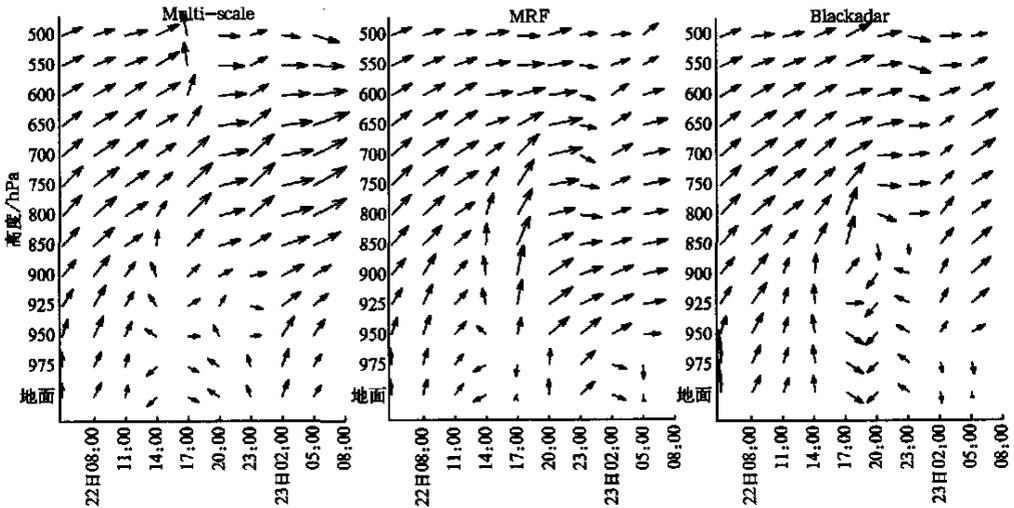


图 6 三种边界层方案在信阳站不同高度上的风矢量随时间的变化

(Multi-scale:多尺度湍流边界层方案;MRF:MRF 方案;  
Blackadar:高分辨边界层方案)

图 7 是三种边界层方案在信阳站不同高度上的湍流热量交换系数随时间的变化。多尺度湍流边界层方案计算出的湍流热量交换系数在  $0.2 \sim 50$  之间,最大值出现在 22 日 14:00 大约 625 m 的高度上,达到 47.5,同其他两种参数化方案比较,是适中的。MRF 边界层方案计算出的湍流热量交换系数比较小,在  $0.2 \sim 20$  之间。在这次暴雨过程中, MRF 方案在这样的湍流交换系数下所产生的低层大气不稳定能量不足,可能是没有发生对流性暴雨的原因之一。Blackadar 高分辨率边界层方案计算出的湍流热量交换系数在  $0.07 \sim 310$  之间,明显高于一般观测资料中的数值,这说明 Blackadar 高分辨率边界层方案中人为地将某一层的湍流交换系数定义为地表总的热通量与该层到地表之间的热通量的比值,在有些情况下不完全合适。

除了模拟 2002 年 6 月 22 日江淮暴雨以外,本文分别采用三种不同边界层方案模拟了 1998 年 5 月华南前汛期暴雨、1998 年 6 月香港暴雨、1998 年 7 月武汉暴雨以及 2002 年 7 月长江中下游暴雨过程。总体来看,在对大尺度天气形势的预报上,三种方案得到的结果基本一致,只是在预报暴雨中心的位置和最大降水量方面有所区别(表 2),但总体预报水平是相当的。

通过采用三种边界层参数化方案对 2002 年 6 月 22 日江淮暴雨等个例的模拟可以得

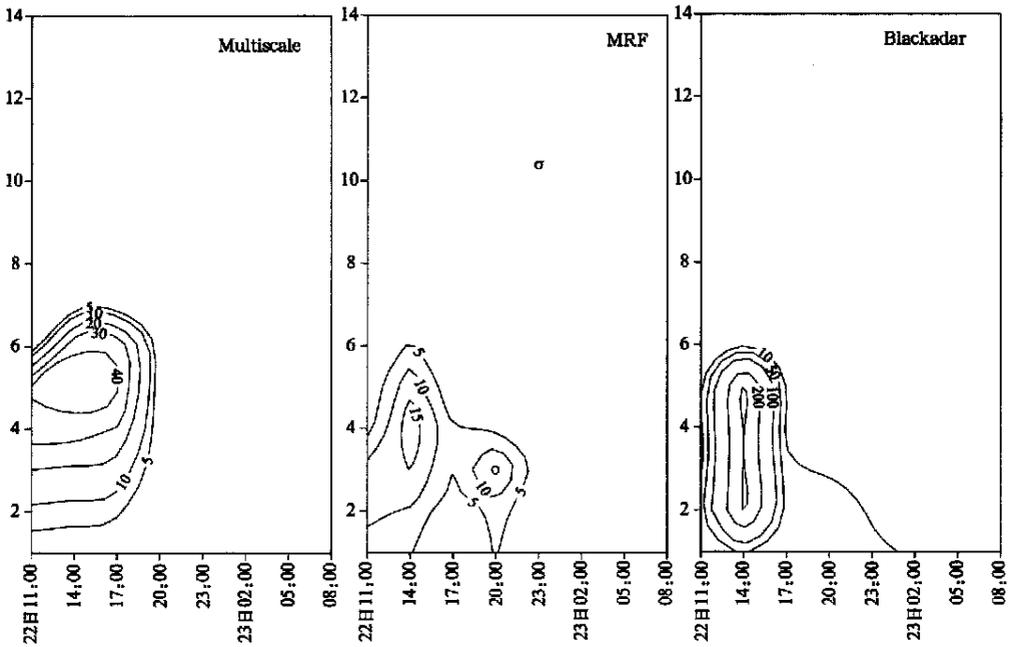


图 7 三种边界层方案在信阳站不同高度上的湍流热量交换系数随时间的变化  
(纵坐标为  $\sigma$  坐标, 数字表示层数)

表 2 分别采用三种边界层参数化方案的 MMB 对 4 个暴雨个例模拟的结果

暴雨个例	天气形势场的预报 与实况的对比			预报的暴雨中心位置 与实况的差距 (k m)			预报的暴雨中心最大降水量 与实况值的差 (m m)		
	多尺度	MRF	高分辨	多尺度	MRF	高分辨	多尺度	MRF	高分辨
	1998 年 5 月 23 日 08:00 ~ 24 日 08:00	低涡系统偏西、 偏南	同左	同左	170	280	340	+20	+185
1998 年 6 月 8 日 12:00 ~ 9 日 12:00	副高和低空急 流轴位置正确	同左	/	70	60	/	-73	-121	/
1998 年 7 月 20 日 08:00 ~ 21 日 08:00	副高位置偏东 南, 强度弱	同左	同左	45	70	90	-10	-38	+43
2002 年 7 月 22 日 08:00 ~ 23 日 08:00	河套低压没有 预报出来	同左	同左	56	120	40	-67	-113	-125

注: 负号表示预报降水量小于实况降水量, 正号表示预报降水量大于实况降水量。

到, 边界层的物理过程对中尺度暴雨的作用是比较明显的, 近地层动量、热量和水汽在垂直方向上的输送过程不同, 致使模式低空流场有很大的差异, 从而对中尺度天气系统的发生和发展有很大的作用。从模拟的结果看, 大尺度天气系统的预报主要是由模式的动力结构决定的, 边界层物理过程对天气尺度系统的预报影响不大, 而对中尺度天气系统的预报有很明显的影响。在本文的个例模拟中, 多尺度湍流参数化、MRF 边界层参数化和 Blackadar 高分辨率边界层参数化对稳定、机械驱动湍流和强迫对流不稳定的边界层大气的处理是一样的, 但对于自由对流大气边界层的处理是各不相同的。在 Blackadar 高分辨

率边界层参数化中边界层内每一层都与地表层发生垂直混合,每层的混合系数由地表层热通量与该层到地表层间热通量的比值决定,这个假设缺乏理论依据。MRF 边界层参数化只考虑了边界层厚度尺度的大涡的作用,在自由对流条件下,地表层与边界层顶层发生湍流交换。多尺度湍流参数化在边界层内各个层次上都考虑含能量最大尺度的涡的作用,每一层都在其能量最大涡旋尺度的范围内与其它层进行湍流交换,同时还进一步考虑了地表层和边界层内各层水平热力不均匀性的影响。就已进行的个例模拟来看,在地形和下垫面比较复杂的区域,采用多尺度湍流参数化模拟的效果会好一些。例如华南地区的地形比武汉地区的地形要复杂,采用多尺度湍流参数化模拟的降水在落点和雨量上,都比 MRF 边界层参数化和 Blackadar 高分辨率边界层参数化模拟的结果有明显提高。同时也说明,地表层及边界层各个高度上的湍流热量交换对低空流场的改变比较明显,对中尺度天气系统的预报起一定的作用。

总的来说,多尺度湍流理论用于中尺度数值模拟是可行的,采用多尺度湍流参数化的模式有一定的预报能力。与 MRF 边界层参数化和 Blackadar 高分辨率边界层参数化方案相比,多尺度湍流参数化在提高模式中小尺度对流系统的预报能力上还有一定改进的潜力。湍流量  $\sigma_w$ 、 $\sigma_T$  和湍流涡旋尺度的引入,使边界层内的垂直运动不仅与 MRF 边界层参数化和 Blackadar 高分辨率边界层参数化方案一样直接与地表层的动力结构(如  $Z_0$ )有关,还与地表层和边界层内各个层次上的热力的不均匀性有关,这是多尺度湍流边界层参数化的优势所在。今后如能加强对温度、湿度、垂直速度脉动及湍流拉氏尺度进行参数化的试验研究,得到不同的地形和地表特征上的湍流量和湍涡尺度的参数化形式,或者是将高阶闭合方案计算出的湍流 2 阶矩引入到多尺度湍流参数化中,有望取得较好的效果。

### 3 结 论

用多尺度湍流理论推导出的感热通量表达式,物理意义明确,在此基础上建立的大气边界层多尺度湍流参数化通过在中尺度气象模式中的应用得到以下结论。

(1) 在数值模拟中,边界层物理过程参数化对中尺度天气系统的预报有较明显的作用,特别是地表层以及边界层内各个层次上的湍流热量交换对低空流场和不稳定能量积累的作用较大。

(2) 多尺度湍流理论用于中尺度数值预报模式的边界层物理过程参数化是可行的,多尺度湍流参数化在边界层内不同高度上都着重考虑含能量最大尺度的涡的作用和水平热力不均匀性的影响,在地形和下垫面比较复杂的区域,对中尺度天气系统的模拟更接近实况。

在区域中尺度数值预报模式中,应用多尺度湍流理论预报中小尺度的对流性强降水是很有潜力的。如果进一步在多尺度湍流理论基础上,研究水汽通量的输送过程,得到与感热通量相匹配的表达式,多尺度湍流参数化方案将更加完善。同时,在中尺度数值模拟中应用多尺度湍流理论的特点在于,湍流量  $\sigma_w$ 、 $\sigma_T$  和湍流涡旋尺度的引入,使边界层内的垂直运动不仅直接与地表层的动力结构有关,还与地表层及边界层内各层次的热力不均匀性有关,能更确切的反映局地大气边界层湍流运动特性,预报中小尺度的对流系统。

如果能加强对温度、湿度、垂直速度脉动及湍流拉氏尺度进行参数化的试验研究,得到不同的地形和地表特征上的湍流量和湍涡尺度的参数化形式,或者是将高阶闭合方案计算出的湍流 2 阶矩引入到多尺度湍流参数化中,则有可能进一步提高模式对中小尺度天气系统的预报能力。

### 参考文献

- 1 程麟生,丑纪范.大气数值模拟.北京:气象出版社,1991.106~107.
- 2 Pleim J E, Chang J S. A non-local closure model for vertical mixing in the convective boundary layer. *Atmospheric Environment*, 1992, **26** A(6): 965~981.
- 3 Deardorff J W. The contragradient heat flux in the lower atmosphere and in the laboratory. *J Atmos Sci*, 1966, **23**: 503~506.
- 4 Mellor G L, Yamada T. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J Atmos Sci*, 1974, **31**: 1792~1806.
- 5 Stull R B. Transilient turbulence theory, Part I: The concept of eddy mixing across finite distances. *J Atmos Sci*, 1984, **41**: 3351~3367.
- 6 Stull R. Transilient turbulence theory, Part II: Turbulent adjustment. *J Atmos Sci*, 1984, **41**: 3368~3379.
- 7 Deardorff J W. Theoretical expression for the countergradient vertical heat flux. *J Geophys Res*, 1972, **77**: 5900~5904.
- 8 Stull R B, Driedonks A G M. Applications of the transilient turbulence parameterization to atmospheric boundary-layer simulations. *Boundary-Layer Met*, 1987, **40**: 209~239.
- 9 Fiedler B H, Moeng C-H. A practical integral closure model for mean vertical transport of a scalar in a convective boundary layer. *J Atmos Sci*, 1985, **42**: 359~363.
- 10 Blackadar A K. High Resolution Models of the Planetary Boundary Layer. In: Pfafflin and Ziegler, eds. *Advances in Environmental Science and Engineering*. New York: Gordon and Breach Sci. Pub., 1979, **1**(1): 50~85.
- 11 刘小红,洪钟祥.非均匀网格过渡湍流理论及其在大气边界层数值模拟中的应用. *大气科学*, 1995, **19**: 347~358.
- 12 蒋维楣,牟礼凤.复杂下垫面模拟域大气边界层非局地闭合模拟研究. *大气科学*, 1999, **23**: 25~33.
- 13 Mailhôt J, Benoit R. A finite-element model of the atmospheric boundary layer suitable for use with numerical weather prediction models. *J Atmos Sci*, 1982, **39**: 2249~2266.
- 14 Troen I, Mahrt L. A simple model of the atmospheric boundary layer, sensitivity to surface evaporation. *Bound Layer Meteor*, 1986, **37**: 129~148.
- 15 Hong S Y, Pan H L. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon Wea Rev*, 1996, **124**: 2322~2339.
- 16 徐大海.多尺度大气湍流的扩散及扩散率. *气象学报*, 1989, **47**(3): 302~311.
- 17 徐大海. Lagrange 与 Euler 时间积分尺度之间关系的统计动力学模型. *气象学报*, 1992, **50**(2): 138~151.
- 18 徐大海.关于不同尺度大气运动中的雷诺交换. *气象学报*, 1992, **50**(3): 257~271.
- 19 朱蓉,徐大海,卞林根,等.南极近地层大气的热量逆梯度输送现象. *气象学报*, 2000, **58**(2): 214~222.
- 20 朱蓉,徐大海.大气边界层热量输送的非局地多尺度湍流理论及试验研究. *应用气象学报*, 2005, **16**: 待发表.
- 21 赵明,苗曼倩,王彦昌.边界层气象学教程.北京:气象出版社,1991.241~245.
- 22 Caughey S J, Palmer S G. Some aspects of turbulence structure through the depth of the convective boundary layer. *Q J Roy Meteor Soc*, 1979, **105**: 811~827.
- 23 赵德山,徐大海,李宗恺,等.城市大气污染总量控制方法手册.北京:中国环境科学出版社,1991.91~92,104.
- 24 Hanna S R, et al. Handbook on Atmospheric Diffusion. US Department of Energy, 1982. 13~14.

## MULTI-SCALE TURBULENT PLANETARY BOUNDARY LAYER PARAMETERIZATION IN MESOSCALE NUMERICAL SIMULATION

Zhu Rong Xu Dahai

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing, 100081*)

### ABSTRACT

Based on the multi-scale turbulent theory the sub model of Multi-scale turbulent planetary boundary layer parameterization is set up by analyzing the relation of the gradient of average wind and the spectrum of turbulence in atmospheric boundary layer. Then the sub model is applied in MM5 to simulate the storm rainfall. Meanwhile the result of simulating is compared to that of the boundary layer parameterization of MRF and Blackadar originally included in MM5. After simulating the heavy rainfall between Changjiang and Haihe in Jun. 22nd, 2002, it shows that the effect of the physical process in atmospheric boundary layer on mesoscale rainstorm is obvious because the change on vertical transportation of the momentum, heat and vapour near ground result in great difference in wind field in lower level of MM5 and have effect on the birth and development of mesoscale synoptic system. In addition, the result also shows the ability to forecast large scale weather system is relied on the initial field and the dynamical structure of numerical model. The physical process has less effect on the forecast ability of large scale synoptic system, but influence obviously the forecast ability of mesoscale synoptic system. On the results of several rainstorm simulating, the effect caused by turbulent exchange between ground layer and each layer in boundary layer on wind field in lower layer is obvious especially in the area with complex topographic and surface characters. Therefore, it has long-range future to apply Multi-scale turbulent boundary layer parameterization on simulating the mesoscale synoptic system. In general, it is feasible to apply Multi-scale turbulent theory on mesoscale numerical simulating. Introducing the turbulence  $\sigma_w$ 、 $\sigma_T$  and the sizes of eddy make it possible that the vertical motion in atmospheric boundary layer not only directly relate to dynamic structure of ground layer, for example  $Z_0$ , but also relate to the nonuniformity of heat structure in ground layer and every layer in atmospheric boundary layer, and it is just the advantage of Multi-scale turbulent boundary layer parameterization.

**Key words:** Multi-scale turbulent theory Non-local turbulent theory Planetary boundary layer parameterization Mesoscale numerical simulation