

湍流动能闭合方法在区域气候模式中的应用*

郑益群 苗曼倩 钱永甫

(南京大学大气科学系, 南京, 210093)

摘 要

利用湍流动能闭合方法改进了区域气候模式(RegCM2)中边界层的参数化过程,并用资料进行了数值试验。结果表明,采用该方法可以较好地描述边界层的物理过程,温度、位势高度、比湿等物理量场的模拟均有不同程度的改善,提高了边界层计算的精度。该工作还对模式中边界层高度的计算作了改进,使边界层高度的日变化及高度极值都更符合实际情况。

关键词: 湍流动能闭合, 边界层, 区域气候模式。

1 引 言

NCAR 的第二代区域气候模式(RegCM2)是在 MM4 的动力框架上,通过改进辐射、积云对流及边界层等参数化过程而发展起来的。该模式耦合了由 Dickinson(1993)等发展的能精细描述陆面过程的改进的生物-大气输送方案(BATS1E)。RegCM2 中边界层参数化过程与 NCAR 的 CCM2 是一致的,无论是整体边界层参数化还是高分辨参数化,对边界层高度及涡动扩散系数 K 的计算都比较简单。本文利用湍流动能(Turbulent Kinetic Energy, TKE)闭合方法改进了 K -理论中 K 的计算,通过引入湍流能量预报方程将 K 表示为与湍流能量有关的函数,不仅使湍流封闭的精度从一阶提高到一阶半,在不明显增加机时(CPU 约增加 1/15)的同时提高了计算精度,而且考虑了湍流脉动场和平均场之间的不断相互调整,这对研究昼夜转换的过渡时段非常重要,可以更真实地模拟日变化过程。在 TKE 闭合中边界层高度计算是一个关键量,由于边界层顶物理结构的复杂性,这个问题目前还远未解决^[1]。在这方面, Zilitinkevich S S^[2](1972), Troen 和 Mahrt^[3](1986)及 Deardorff^[4](1974)等都做了出色的工作。

在 RegCM2 中,原边界层高度的计算普遍偏低(最大不超过 500 m),且日变化不明显。本工作在尝试多种计算方案的基础上,通过调整 Zilitinkevich 方案中的有关参数,得到了较理想的边界层计算高度。

2 区域气候模式简介

RegCM2 的动力框架与 MM4 一致,采用静力、可压缩原始方程, σ 坐标,水平采用

* 初稿时间:1998 年 8 月 26 日;修改稿时间:1999 年 4 月 26 日。

资助课题:国家科技攻关项目“我国短期气候预测系统的研究”(96-908-02-04-04)。

“Arakawa B”交错网格,垂直方向除垂直速度 σ 在整 σ 层外,其余各量均在半 σ 层计算,时间积分采用由 Madala(1981)提出的显式分离积分技术,使其在保证精度的情况下使用超过两倍的时间步长。该模式的辐射传输采用 Briegleb(1992)为 CCM2 发展的方案, O_3 , H_2O 等的散射、吸收光谱从 $0.2 \sim 5.0 \mu m$ 分为 18 个波段,云的散射、吸收参数化则采用 Slingo(1989)的工作。模式中下垫面物理过程的计算采用 Dickinson 设计的 BATS1E 方案,该方案在水分循环、地表感热及动量通量计算方面与较早的 BATS 方案类似,可描述 18 种下垫面类型,不同之处在于为改善土壤湿度计算加进了 3 m 深土壤层,修正了积雪区的土壤温度强迫恢复计算,并在利用粗糙度时考虑了非零的“位移长度”订正^[5]。采用 BATS 时必须要有高分辨的边界层方案与之匹配,RegCM2 中采用由 Holtslag^[6](1990)等改进的 K-理论方案,垂直扩散通量由下式给出:

$$F_c = \overline{w'A'} = -K_c \left(\frac{\partial A}{\partial z} - \gamma_A \right) \quad (1)$$

其中 K_c 是涡动扩散系数, $\partial A/\partial z$ 代表小涡扩散造成的局地梯度输送(A 代表温度、比湿等物理量), γ_A 表示由于干对流造成的大涡非局地输送,对温度而言, γ_A 就是通常意义上的负梯度项。采用改进的 K-理论后就可突破 K-理论的稳定性限制而适用于整个边界层。

涡动扩散系数由下式计算:

$$K_c = kw_t z \left(1 - \frac{z}{h} \right)^2 \quad (2)$$

其中 k 为 Von Karman 常数, w_t 为对流速度, h 为边界层高度。

式(1)中的大涡扩散项 γ_A 表示为:

$$\gamma_A = C \frac{\phi_A^0}{w_t h} \quad (3)$$

其中 $C = 8.5$, ϕ_A^0 为地表通量(热量、水汽)。

该模式中原边界层高度 h 的确定是利用临界理查逊数(取 Giorgi 推荐的 0.25)寻找稳定与不稳定层间的界面,再通过线性插值得到的,其结果不够理想。

3 湍流动能闭合(方法及一维试验)

在边界层内,这里采用 Therry^[7](1983)等提出的湍流动能闭合方案,其方程为:

$$\frac{de}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_c \frac{\partial e}{\partial z} \right) + K_m \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{g}{\theta} K_\theta \frac{\partial \theta}{\partial z} - \epsilon \quad (4)$$

$$\epsilon = (\alpha_e e)^{\frac{3}{2}} / l_e \quad (5)$$

$$K_m = C_k l_m e^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$K_c = \alpha_c K_m \quad (7)$$

$$K_\theta = \alpha_1(z) K_m \quad (8)$$

$$K_q = \alpha_2(z) K_m \quad (9)$$

其中 K_m, K_c, K_θ, K_q 分别为动量、湍流动能、热量及水汽垂直交换系数, α_e, C_k, α_c 为常数, $\alpha_1(z), \alpha_2(z)$ 为与边界层高度及稳定度有关的参数。

在边界层以上,取 $K_m = K_q = K_\theta = \delta$, δ 为常数残留量(采用 Pielke^[8](1974)的建议

值)。因 δ 值较小,与边界层内的 K 值之间存在明显的不连续现象,为避免在边界层顶附近出现湍流输送的堆积并保证计算稳定,采用垂直 3 点平滑作过渡。

混合长 l_m , 耗散长 l_e 分别由下列公式给出:

$$\frac{1}{l_m} = \frac{1}{kz} + \frac{C_{LK1}}{h} - \left(\frac{1}{kz} + \frac{C_{LK2}}{h}\right) \cdot m_1 \cdot m_2 \quad (10)$$

其中, $m_1 = 1/(1 + C_{LK3}h/kz)$

$$m_2 = \begin{cases} 1/(1 - C_{LK4} \cdot L_0/h) & L_0 < 0 & \text{(不稳定)} \\ 0 & L_0 > 0 \text{ 或 } |L_0| \rightarrow \infty & \text{(稳定及中性)} \end{cases}$$

$$\frac{1}{l_e} = \frac{1}{kz} + \frac{C_{LE1}}{h} - \left(\frac{1}{kz} + \frac{C_{LE2}}{h}\right) \cdot m'_1 \cdot m'_2 \quad (11)$$

其中, $m'_1 = 1/(1 + C_{LE3} \cdot h/kz)$

$$m'_2 = \begin{cases} 1/(1 - C_{LE4} \cdot L_0/h) & L_0 < 0 & \text{(不稳定)} \\ 0 & L_0 > 0 \text{ 或 } |L_0| \rightarrow \infty & \text{(稳定及中性)} \end{cases}$$

k 取 0.4, L_0 为 M-O 长度, z 为相对高度。 $C_{LK1}, C_{LK2}, C_{LK3}, C_{LK4}, C_{LE1}, C_{LE2}, C_{LE3}, C_{LE4}$ 为常系数^[7]。

TKE 闭合在精细的边界层研究中已取得成功(Yamada 和 Mellor^[9], 1975; Therry 等^[7], 1983),但这些研究中垂直格距取得非常密(40~80 层),现在引用到区域气候模式中,边界层内仅设 5 层。为检验 TKE 闭合的效果,利用该方法进行了一维试验并与实测资料进行比较。图 1 分别给出了 u, v, θ 的模拟值及旺加拉实验观测值^[11]的廓线。从图中可以看到,模拟结果与实测值基本吻合,尤其是 u, θ 模拟得较好。从位温廓线看,边界层顶的逆温也能模拟出来,只是因为边界层内的层数较少(5 层),使模拟的逆温较平缓且位置偏高。模拟的地面逆温在 18 时(地方时)前后出现,对流混合层在 15 时已发展得相当强盛,这些结果都与实测值相吻合。

文中边界层高度 h 的计算采用 Zilitinkevich 的方法,对有关参数进行适当调整后,可获得合理的高度值,但采用该方法计算时在公式的分母中含有 f 项,故其计算的边界层高度,北方格点明显低于南方格点。在将该方法引入模式时对其进行了纬度修正,使计算结果得到明显改善,无论是边界层高度的日变化还是高度的极值大小都比较符合实际,其计算公式如下:

$$h = \begin{cases} c_1 \cdot \frac{u^*}{f} & |L_0| \rightarrow \infty \\ c_2 \cdot \frac{ku^*}{f} \cdot \left(\frac{-ku^*}{f \cdot L_0}\right)^{\frac{1}{2}} & L_0 < 0 \\ c_3 \cdot \left(\frac{u^* \cdot L_0}{f}\right)^{\frac{1}{2}} & L_0 > 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中 $c_1 = 0.25 \cdot (\sin\varphi)^{\frac{3}{4}}, c_2 = 0.013 \cdot (\sin\varphi)^{\frac{5}{4}}, c_3 = 0.4 \cdot (\sin\varphi)^{\frac{1}{3}}, u^*$ 为摩擦速度, f 为科氏参数, φ 为纬度,其余为气象上常用符号。

4 气候试验

为确定 TKE 闭合的气候效应,利用该闭合方法取代了 RegCM2 中原高分辨边界层

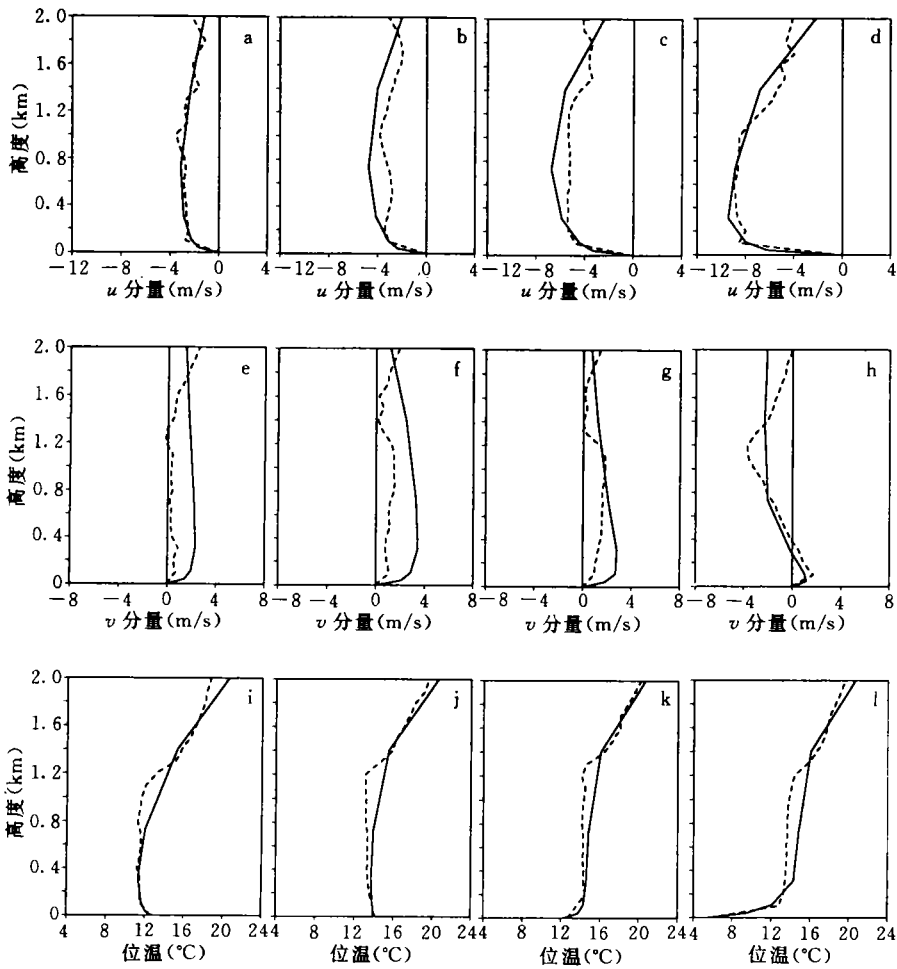


图1 TKE 闭合模拟的风速、位温与实测值的比较

(a~d 分别为 12, 15, 18, 21 时的风场 u 分量; e~h 分别为 12, 15, 18, 21 时的风场 v 分量;

i~l 分别为 12, 15, 18, 21 时的位温。实线为模拟值, 虚线为观测值。

风分量的单位为: m/s , 位温的单位为: $^{\circ}\text{C}$ [10])

的有关参数化过程,并用 NCAR/NCEP 再分析资料进行了数值试验。模拟范围为包括青藏高原在内的中国区域,下垫面包含了草原、林地、湿地、冻土、沙漠、水域、农作物等 11 种类型,模拟时间从 1991 年 5 月 15 日 08 时至该年 8 月 30 日 08 时(北京时),剔除前 15d 积分后作为有效的气候资料进行有关分析。文中模式垂直分为 11 层,水平格距为 120 km,采用 5 圈海绵边界,Kuo-积云对流参数化,水汽计算采用隐式的水汽方案,气压梯度力计算则采用静力扣除的 Corby 格式。在相同的初始、边界值条件下分别进行了 6, 7, 8 月的控制试验及边界层采用 TKE 闭合的模拟试验(以下分别简称 CON 和 TKE 试验)。

图 2 为 CON 试验及本工作中采用 Zilitinkevich 方法计算的边界层高度(以下简称 PBLH),从图中可以看出,CON 试验的 PBLH 普遍偏低,极值不超过 500 m,且日变化不明显。将其代入 TKE 闭合方案中则会使垂直扩散偏弱且集中在较低层次,低层的热量、

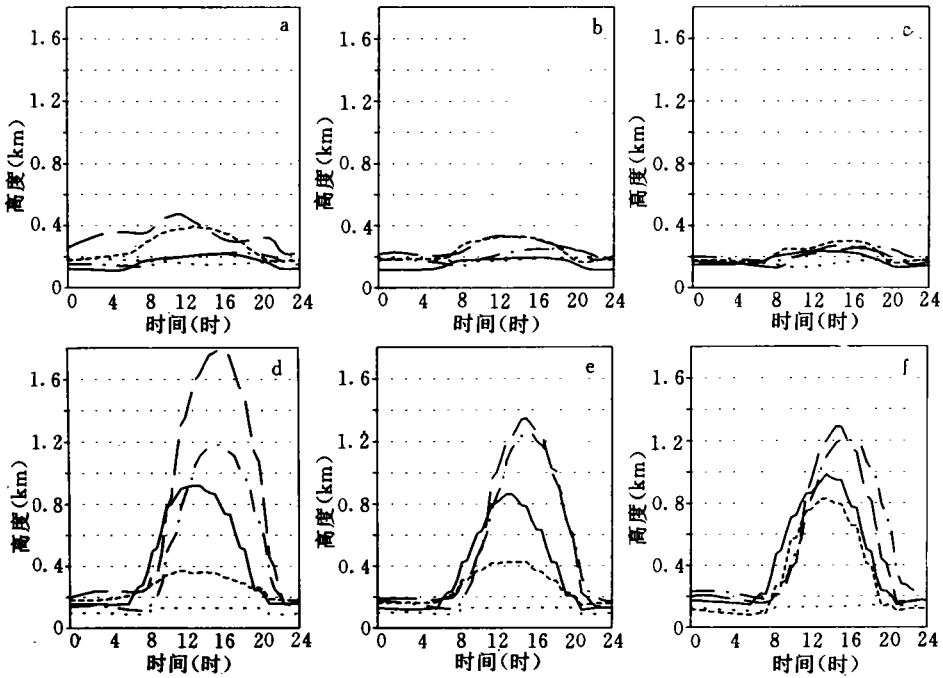


图2 边界层高度的月平均日变化

(a,b,c分别为6,7,8月的CON结果;d,e,f为6,7,8月的TKE结果。单位为:km;

‘——’草原,‘- - -’高原,‘·····’农作物,‘- · - ·’沙漠,‘- - - - -’海洋)

水分无法合理地传输到自由大气。而利用纬度修正的 Zilitinkevich 方法计算的 PBLH 则较为合理,从 6,7,8 月的模拟结果看,PBLH 的日变化很明显,极值出现在午后,可达 1 km 左右,高原格点(那曲以西)白天的 PBLH 的极值最大(约 1.8 km),这与实际相符。据 1979 年 5~8 月青藏高原气象科学实验资料分析,高原地区的 PBLH 比平原高,像甘孜、那曲可达 2.0~2.1 km(详见文献[12])。另外还可明显看出,由于时差影响,沙漠(哈密)和高原格点比草原(内蒙)和农作物区(汉口)的极值要晚出现 2h 左右;6,7 月份由于南方多阴雨天气,白天也常出现稳定边界层,使农作物区这两月的边界层高度较低。海洋上的 PBLH 偏低且无明显日变化,这主要是由于海表温度的日较差小,使海洋上白天与夜间的海气温差变化不大,层结经常处于稳定状态而造成的。

采用 TKE 闭合可以得到能直接反映湍流情况的信息,图 3 给出了草原的湍流动能及涡动扩散系数的日变化情况。从图中可以看到,日出后,随着边界层不稳定性的增强,湍流动能开始增大,午后达到极值,然后逐渐减小,过渡到夜间稳定边界层的弱湍流状态。白天湍能极大值出现的高度和量级与 Yamada^[9]等(1975)模拟旺加拉试验中澳大利亚中部草原夏季的结果(参见文献[9]中图 11)相符。从涡动扩散系数(KVM)图上可以更清楚地看到这种日变化情况,白天不稳定时的 KVM 可以比夜间大 1~2 个量级,其极值出现在大约 400 m 的高度上,比 TKE 极值出现的高度要高,这主要是因为与 KVM 有关的混合长在边界层内也是随高度增大的,另外也与垂直网格过稀有关。

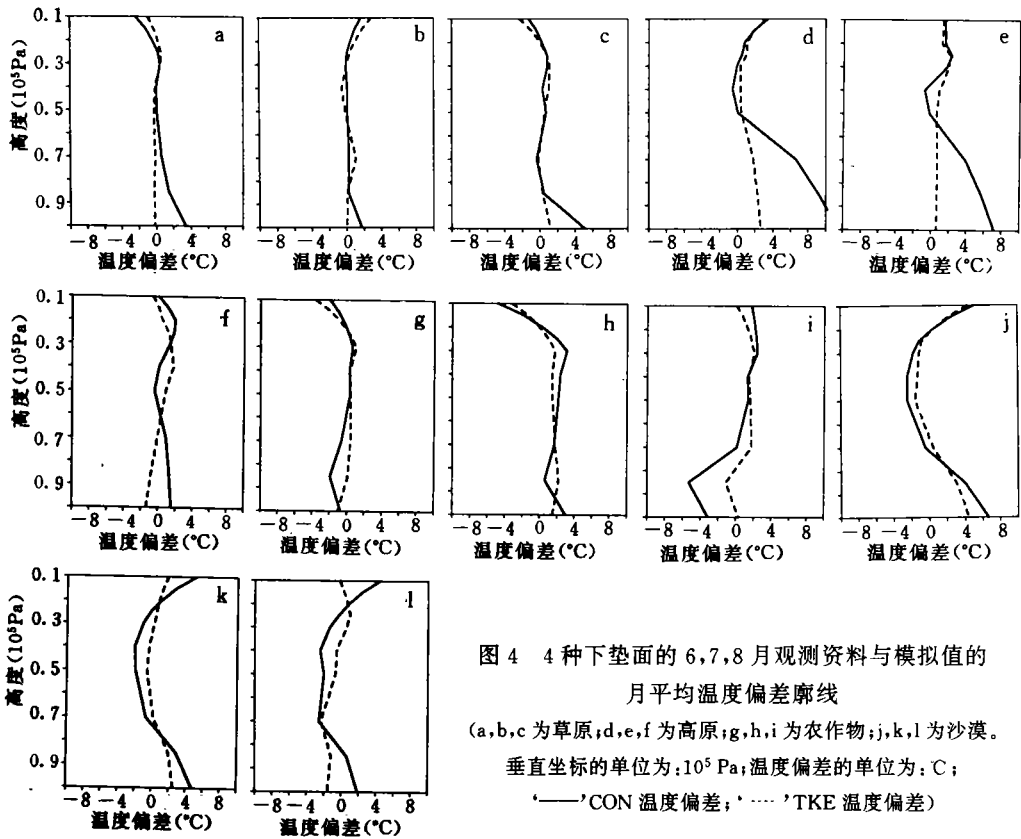


图4 4种下垫面的6,7,8月观测资料与模拟值的月平均温度偏差廓线

(a,b,c为草原;d,e,f为高原;g,h,i为农作物;j,k,l为沙漠。

垂直坐标的单位为: 10^5 Pa; 温度偏差的单位为: $^{\circ}\text{C}$;

'——' CON 温度偏差; '---' TKE 温度偏差)

表1 CON与TKE试验的6,7,8月温度、高度、比湿场的相关系数及误差标准差

月份	高度	相关系数				误差标准差							
		温度		比湿		温度		比湿					
		CON	TKE	CON	TKE	CON	TKE	CON	TKE	CON	TKE		
6	200	0.920	0.901	0.991	0.996	0.742	0.760	0.508	0.531	30.57	22.39	0.070	0.068
	500	0.969	0.979	0.991	0.994	0.895	0.928	1.197	1.020	10.49	8.943	0.580	0.504
	700	0.899	0.956	0.963	0.967	0.869	0.891	1.804	1.215	10.98	10.76	1.068	0.985
7	200	0.926	0.932	0.989	0.992	0.665	0.702	0.558	0.464	30.93	30.84	0.094	0.090
	500	0.965	0.976	0.989	0.989	0.898	0.919	1.082	0.946	9.763	10.77	0.569	0.553
	700	0.894	0.948	0.956	0.960	0.848	0.873	1.639	1.234	10.22	9.792	1.21	1.124
8	200	0.873	0.907	0.986	0.988	0.594	0.671	0.688	0.537	37.16	37.04	0.104	0.091
	500	0.960	0.969	0.985	0.984	0.854	0.909	1.276	1.219	11.99	13.56	0.844	0.613
	700	0.889	0.934	0.936	0.945	0.812	0.862	1.63	1.518	13.46	11.75	1.512	1.246

为定量地检验 TKE 闭合在整个模拟区内的整体效果,分别计算了有关量的相关系数及误差标准差,比较表1中数据可以发现,除个别组外,TKE 试验的温度、比湿、位势高度的误差标准差均比 CON 试验小,而相关系数有明显提高,这种改善中、低层比高层显著;温度、比湿场比位势高度显著,这也进一步说明采用 TKE 闭合可以有效地改善直接受边界层参数化方案影响的中、低层的温度、比湿模拟并进而提高整个模式的模拟能力。

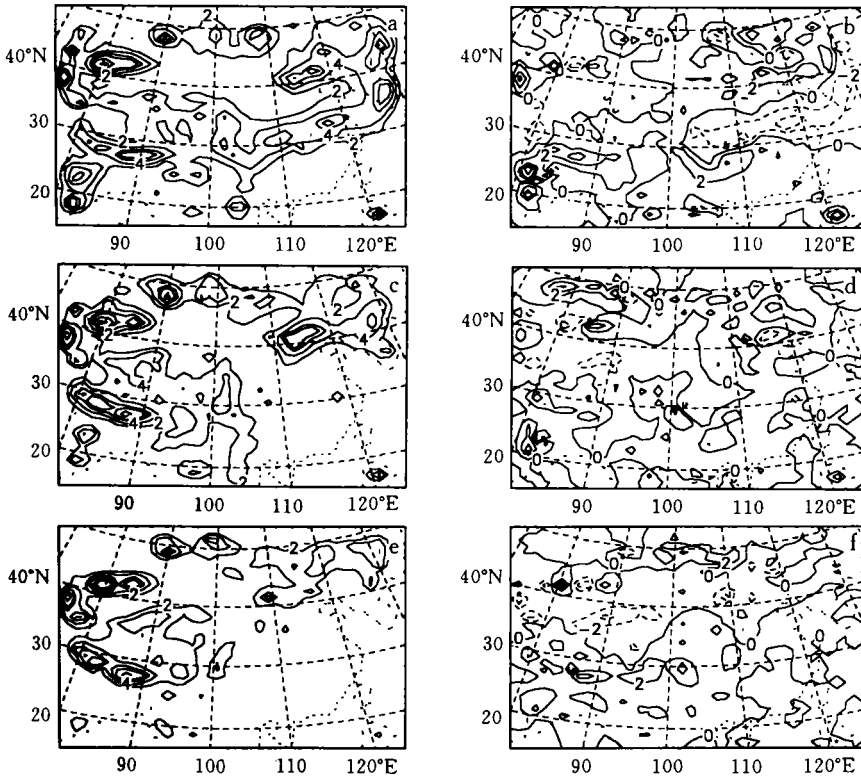


图7 CON降水及TKE-CON的降水差值

(a,c,e分别为6,7,8月的CON结果,b,d,f分别为6,7,8月的TKE-CON差值。

降水差值的单位为:mm/d)

5 结 语

通过本工作的研究表明,在区域气候模式中采用TKE闭合的边界层方案是可行的,采用该方法不仅可更真实地描述边界层的物理过程,使温度、位势高度、比湿等物理量场的模拟得到不同程度的改善,而且能得到直接反映湍流变化情况的湍流动能值。但从1991年个例来看,采用TKE闭合的边界层方案对降水模拟的改进不很明显。这一方面是因为该方案还有待进一步完善,另外也说明要提高反映模式综合模拟能力的降水模拟,除了有必要对边界层参数化方案作修改外,还须在此基础上进一步完善复杂地形的气压梯度力计算、积云对流、大尺度降水、辐射等参数化过程,以获得更满意的结果。

参考文献

- 1 赵鸣,苗曼倩,王彦昌.边界层气象学教程.北京:气象出版社.1991.466pp
- 2 Zilitinkevich S S. On the determination of the height of the Ekman boundary layer. *Boundary-Layer Meteor.* 1972. 3: 141-145
- 3 Troen I, Mahrt L. A simple model of the atmosphere boundary layer: Sensitivity to surface evaporation. *Boundary-Layer Meteor.* 1986. 37: 129-148

- 4 Deardorff J W. Three-dimensional numerical study of the height and mean structure of a heated planetary boundary layer. *Boundary-Layer Meteor.* 1974, 7: 81—106
- 5 Giorgi F. Marinucci M R. Bates G t. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary-layer and radiative transfer processes. *Mon Wea Rev.* 1993, 121: 2794—2813
- 6 Holtlag A A M. Boville B A. Local versus nonlocal boundary-layer diffusion in a global climate model. *Journal of Climate.* 1993, 6: 1825—1842
- 7 Therry G. Lacarrere P. Improving the eddy kinetic energy model for planetary boundary layer description. *Boundary-Layer Meteor.* 1983, 25: 63—88
- 8 Pielke R A. A three-dimensional numerical model of the sea breezes over South Florida. *Mon Wea Rev.* 1974, 102: 115—139
- 9 Yamada T. Mellor G. A Simulation of the Wangara atmospheric boundary layer data. *J Atmos Sci.* 1975, 32: 2309—2329
- 10 苗曼倩, 唐有华. 湍流动能闭合法用于大气模式的初探. *气象科学.* 1998, 4: 330~338
- 11 Clarke R H. et al. The Wangar experiment boundary data. Paper No 19 Division Meteorological Physics CSIRO. Australia, 1971
- 12 苗曼倩, 曹鸿, 季劲钧. 青藏高原大气边界层湍流特征量分析. *高原气象.* 1998, 17 (4): 356~363

TURBULENCE KINETIC ENERGY CLOSURE SCHEME APPLIED INTO REGIONAL CLIMATE MODELING

Zheng Yiqun Miao Manqian Qian Yongfu

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093)

Abstract

The boundary layer parameterization scheme in regional climate model (RegCM2) is improved by applying turbulence kinetic energy (TKE) closure scheme. The NCEP/NCAR reanalysis data of 1991 is employed to test the effects of the TKE closure scheme on regional climate modeling. The results show:

After employing TKE closure scheme, the physical process in boundary layer can be described more realistically. The simulation of the geo-potential height field and temperature field etc. are obviously improved, especially, the more distinct improvements occurs in the temperature field and specific humidity field of lower levels that are directly effect by boundary layer parameterization scheme.

An improving can also be made on calculating the height of boundary layer, the result shows that the diurnal variation and the diurnal extreme of boundary layer height can be described more reasonable.

Key words: Turbulence kinetic energy closure scheme, Boundary layer, Regional climate simulation.