孟祥新,符淙斌. 2010. 一个区域地气耦合柱状模式的发展及其对半干旱区的模拟 [J]. 气候与环境研究, 15 (2): 141-151. Meng Xiangxin, Fu Congbin. 2010. Development of a coupled regional column model and its simulations in semi-arid areas [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (2): 141-151.

# 一个区域地气耦合柱状模式的发展 及其对半干旱区的模拟

# 孟祥新<sup>1,2,3</sup> 符淙斌<sup>1</sup>

- 1 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室,北京 100029
- 2 中国科学院研究生院,北京 100049
- 3 山东省气候中心,济南 250031

**摘 要** 在现有的区域气候模式的基础上构建了用于研究地气耦合模拟的区域柱状模式,其中包括了详细的物理过程,可以作为研究半干旱区地气相互作用过程的工具。通过区域柱状模式与不同陆面模式的耦合,检验 了不同陆面模式在非耦合和耦合两种情况下对半干旱区的模拟性能。结果表明,陆面模式在耦合后对感热的模 拟偏差放大,而潜热的模拟效果得到了改进,不同的陆面模式对区域柱状模式的模拟性能影响较大,耦合了 CoLM 后的区域柱状模式对地表气象要素的模拟得到了较大的改进。

关键词 区域柱状模式 陆面过程 半干旱文章编号 1006-9585 (2010) 02-0141-11 中图分类号 P461 文献标识码 A

# Development of a Coupled Regional Column Model and Its Simulations in Semi-arid Areas

MENG Xiangxin<sup>1,2,3</sup> and FU Congbin<sup>1</sup>

- 1 Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
- 2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049
- 3 Shandong Provincial Climate Center, Jinan 250031

**Abstract** On the basis of Regional Integrated Environment Model System (RIEMS), a regional column model was developed. It includes detailed physical processes, and can be used as a tool to study land – atmosphere interactions in semi-arid areas. The land surface models BATS and CoLM were evaluated in offline mode and coupled mode by coupling with the regional column model. The results showed that the bias of simulated sensible heat flux was magnified and that of latent heat flux was reduced. The performance of regional column model differed largely when coupling with different LSMs (Land Surface Models). Its performance was improved when coupling with CoLM. **Key words** regional column model, land surface process, semi-arid

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400500

作者简介 孟祥新,男,1980年出生,博士,主要从事区域气候模拟方面的研究。E-mail: mxx8544@hotmail.com

收稿日期 2008-07-09 收到, 2010-01-10 收到修定稿

# 1 引言

北方干旱化已成为我国最严峻的生存环境问 题之一(符淙斌和安芷生, 2002), 越来越多的证 据表明,中国北方干旱化现象已经成为不争的事 实(符淙斌和温刚, 2002; 马柱国和符淙斌, 2005, 2006, 2007)。半干旱区处于湿润的季风气 候和干旱的大陆性气候之间的过渡带,具有对人 为扰动和气候变化响应的敏感性特征(符淙斌等, 2003); 也是干旱化表现最为剧烈的地区(Ma and Fu, 2003; 马柱国和任小波, 2007)。全球陆气耦 合试验的结果表明,干旱/半干旱带是陆气相互作 用最强烈的地区(Koster et al., 2004), 但限于 观测资料的匮乏,目前对半干旱区的陆气相互作 用的认识还远远不够,区域气候模式在干旱/半干 旱区的偏差也是最大的(符淙斌等,2004),作为 区域气候模式的下边界条件的陆面过程可能是一 个重要因素。

目前对半干旱地区地气相互作用的研究在我 国开展的不太多,对地气能量和物质交换过程的 长期监测才刚刚开始(刘辉志等, 2004),陆面过 程模式在半干旱区的检验, 尤其是长期的模拟与 对比,开展的比较少。随着全球能量与水循环协 同观测计划 (CEOP) 的逐步实施 (Bosilovich and Lawford, 2002),长期连续的观测资料的积 累,为在半干旱区的长期数值模拟与对比提供了 资料基础。我国在典型半干旱区通榆站建有连续 的长期观测站(刘辉志等, 2004),从 2002年开 始连续观测,并成为 CEOP 观测网的一个基准站。 利用 CEOP 通榆站的长期连续的观测资料作为驱 动场对现有的陆面模式在半干旱区的模拟性能进 行了检验与评估,得到了不同陆面模式在半干旱 区的模拟效果,这为进一步改进区域气候模式的 下垫面过程,提高其在半干旱区的模拟性能提供 了参考依据(孟祥新和符淙斌, 2009)。但陆面过 程的非耦合(offline)模拟没有陆气之间的反馈 作用,只能表明在真实大气强迫下陆面过程模式 对下垫面过程的模拟能力。只有进行与大气模式 的耦合模拟,通过陆气之间的反馈作用,才能进 一步检验不同陆面参数化方案对改进区域气候模 式在半干旱区的模拟性能的作用。

由于半干旱区的观测资料还相对较少,为了 充分利用 CEOP 的观测资料,发展一个适合半干 旱区的准一维的区域柱状模式,进行陆气耦合模 拟就成为必要,这不仅可以更好的关注半干旱区 陆气界面的物质和能量交换,还可以利用区域柱 状模式的发展以及与不同陆面模式的耦合,很快 地应用到区域气候模式中去,提高其对半干旱区 的模拟能力,为进一步对半干旱区的陆气相互作 用的机制研究和干旱化的预测提供可靠的定量 工具。

本文在现有的区域气候模式的基础上构建了 区域柱状模式,并与不同陆面过程模式进行耦合 试验,检验区域柱状模式对半干旱区的模拟性能, 以及不同的陆面过程模式在耦合和非耦合两种情 况下对半干旱区的模拟能力。

# 2 模式介绍

#### 2.1 区域柱状模式的构建

区域柱状模式是在现有的区域气候模式 RI-EMS (Regional Integrated Environment Model System)(Fu et al., 2000)的基础上构建的。RI-EMS 是以 MM5 为动力框架发展起来的, 耦合了 陆面过程 BATS 和 CCM3 的辐射方案等重要的物 理过程,其在亚洲区域气候模式比较计划中有较 好的表现(符淙斌等, 2004)。与 RIEMS 相同, 区域柱状模式在水平方向采用"Arakawa B"网 格,如图1所示,这种网格中,矢量如风速(u, v)等定义在圆点上,而标量如温度 T、比湿 q等 定义在叉点上,整个柱状区域设置为5×5的格 点,即圆点(u、v等)为5×5,叉点(T、q等) 实际上只有 4×4。我们将最外层的两个圆点和一 个叉点作为柱状模式的侧边界处理,这样就只剩 下中间的四个叉点和一个圆点。对这四个叉点的 下垫面条件,如植被覆盖、地形高度等,可以进 行均一化处理,各点都采用相同的下垫面参数; 也可以对它们进行不同的处理,即设置不同的植 被类型,这样可以研究地表非均一性对气候的影 响。将这四个叉点的模拟值进行平均,看作是一 个点来处理,这样可以方便的进行单点的耦合模 拟试验,并可与现有的 CEOP 观测资料进行对比 验证。实际上,这不是一个单柱模式 (SCM),而

是一个"宽柱模式",以下我们称为"区域柱状模 式"。它具有 SCM 所不具备的优点,如包含了平 流作用,所以不用像 SCM 用观测资料或高分辨率 的模式资料计算水平倾向,来专门处理水平平流 的问题,这对于观测资料较少的半干旱区是非常 重要的。

### 2.2 模式的主要物理过程

RIEMS的详细说明见参考文献(Fu et al., 2000),它是一个非静力模式,采用沿地形的 $\delta$ 坐标系统(垂直方向 17 层),目前已发展到 2.0 版。 区域柱状模式的整个区域柱代表了 20 km×20 km



图 1 区域柱状模式水平方向的网格 Fig. 1 Horizontal grids of regional column model

的一个格点,其示意图如图2所示,下面主要介 绍一下其主要的物理过程。

模式采用的是 MRF (Medium-Range Forecast Model) 行星边界层参数化方案 (Hong and Pan, 1996),该方案适用于高分辨率的行星边界 层 (PBL),具有较详细的物理过程。方案基于 Troen-Mahrt 针对充分混合 PBL 中的反梯度项和 K 廓线理论的描述,根据非局地 K 理论,它对预 报变量 C 的湍流扩散方程可表示为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_C \left( \frac{\partial C}{\partial z} - \gamma_C \right) \right]$$

其中, K<sub>c</sub> 为涡旋扩散系数, γ<sub>c</sub> 为局地梯度的订 正函数, C 为预报变量(风速 u、v; 位温 θ; 比 湿 q)。垂直扩散使用一个隐式方案以实现更大的 时间步长。

模式采用了 CCM3 的辐射参数化方案(Kiehl et al., 1996)。在太阳短波辐射的计算中,考虑 了 O<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>的作用,并遵循  $\delta$  - Eddington 近似理论。该方案包括了 0.2~5  $\mu$ m 之间 的 18 个波段(其中包括 O<sub>3</sub>的 7 个波段,可见光的 1 个波段,H<sub>2</sub>O 的 7 个波段和 CO<sub>2</sub>的 3 个波段)。 云的散射和吸收的参数化方法依据 Slingo 的方法 (Slingo, 1989),云滴的光学特性,如云的光学厚 度、单次散射反照度和非对称参数,以云含水量 和云滴有效半径的形式表示。方案中对于长波辐 射的传输则依据 Ramanathan and Downey (1986) 的吸收散射公式。与 CCM2 的辐射方案相比, CCM3 的辐射方案的改进主要有:在长波参数化



图 2 区域柱状模式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of regional column model

方案中,晴空辐射的计算加入了少量的 CO<sub>2</sub> 波段 和微量气体(CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、CFC<sub>11</sub>、CFC<sub>12</sub>),而短 波辐射方案中加入了气溶胶的作用,全天空辐射 加入了云光学特性的诊断和冰云的辐射特性。

柱状模式中采用了 Grell 积云对流参数化方案 (Grell et al., 1994),它基于不稳定化或准平衡 的速率,具有上升和下沉气流以及补偿运动的简 单单云方案,决定加热/水汽廓线。该方案假设云 与环境场之间的直接混合只发生在云底和云顶, 而在云的边缘没有卷入、卷出发生,积云对流对 大尺度环境场的反馈作用,完全由补偿的质量通 量和云顶、云底的卷出效应决定。该方案平衡可 分辨尺度降水和对流降水,考虑了对降水效率的 切变效应。

对于显式水汽方案,模式采用简单冰方案 (Simple Ice),它运用微物理过程显式预报云和雨 水场,并把冰相的过程加入到方案中,不存在过 冷水,在冰冻层以下雪迅速融化。

本文中,陆面模式 BATS (Dickinson et al., 1993)和 CoLM (Dai et al., 2003)分别与区域 柱状模式进行了耦合。在与区域柱状模式进行耦 合时,陆面模式在每个积分时步为大气模式提供 地表反照度、向上的长波辐射、感热、潜热通量、 水汽通量和动量通量等;而大气模式在每个时步 提供给陆面模式入射的短波和长波辐射、对流和 大尺度降水、模式底层的温度、风速、比湿、气 压、空气密度和大气模式底层的高度。

构建的区域柱状模式有如下特点: (1) 该模 式可看作一个准一维模式,可以方便地进行单点 的陆气耦合模拟试验,便于利用现有的 CEOP 资 料在半干旱区进行检验; (2) 节约积分时间,可 以进行长期的模拟试验; (3) 与 SCM 不同,可以 不用特别考虑平流问题,方便在资料较少的半干 旱区进行模拟; (4) 模式可以方便地进行与不同 陆面过程的耦合,提高区域气候模式的模拟能力; (5) 该模式可以作为定量分析的工具,进行各种 敏感性实验,如用来检验不同土地利用对干旱化 的影响等。

在作为准一维模式进行单点的陆气相互作用 的模拟时,需要对所选取的5×5的网格点的下垫 面进行均一化处理,即设定一致的植被类型和海 拔高度等下垫面参数。在下面的章节中,将利用 构建的区域柱状模式对半干旱区进行单点的陆气 耦合模拟试验,对比各个陆面过程模式在非耦合 和耦合情况下在半干旱区的模拟能力。

### 3 资料介绍与试验方案设计

本试验分非耦合(offline)和耦合(coupled) 两部分进行,非耦合模拟的观测驱动资料和耦合 模拟的验证资料均采用 CEOP 通榆站的长期观测 数据。

#### 3.1 CEOP 通榆站资料

通榆站 (44.42°N, 122.87°E) 位于吉林省白 城市通榆县新华乡的行政地域内,处于白城至双 辽沙丘覆盖的冲积平原区,地形平坦,平均海拔 184 m,年平均降水量为 404 mm,属于典型半干 旱区下垫面。在国家重点基础研究发展计划 (973)项目课题支持下,中国科学院大气物理研 究所在此建立了"干旱化和有序人类活动"长期 观测实验站,于2002年10月正式建成并开始连 续观测(刘辉志等,2004)。通榆站建成后加入了 CEOP 观测网,成为 CEOP 一期 36 个观测站中完 全由我国自己主持、投资和运行的基准站。为检验 人类活动 (不同土地利用和水资源利用) 对区域能 量和水分循环的影响,通榆基准站分别针对半干旱 区农田和退化草地生态系统建立了两个观测点,两 者相距5km左右,本文采用的是农田下垫面进行 模拟。农田下垫面主要作物为高粱和玉米,最大生 长高度 1.8 m 左右, 生长季为每年的 5~9 月, 10 月初收割完毕,冬春季农田下垫面为裸土覆盖, 无作物,下垫面土壤主要为沙土和淡黑钙土。

观测主要在近地面层进行,采用涡动相关法 进行直接测量。主要观测有近地面的基本气象要 素、土壤温度、土壤湿度以及近地面的物质、能 量和辐射通量,同时设有观测塔,可以观测温度、 湿度和风速的廓线。CEOP通榆站的观测资料已 经被进行过较详细的分析,得到了半干旱区地气 物质和能量通量交换以及地表辐射平衡的很多基 本特征(涂钢等,2006;刘辉志等,2006),证明 该站的资料质量还是非常好的。本文主要用到了 近地面的气象资料、辐射资料、能量通量资料进 行陆面模式的驱动和区域柱状模式的验证,每个 样本取样时间长度均为 30 min,资料时间长度为 2002年10月1日~2003年9月30日。

#### 3.2 试验方案设计

利用 CEOP 通榆站的观测资料首先驱动两个 陆面模式 BATS 和 CoLM 进行 offline 的模拟,模 式步长都设定为 30 min。对于 offline 模拟, 孟祥 新和符淙斌(2009)作了详细的介绍,下面主要 介绍一下区域柱状模式的耦合模拟设置。

区域柱状模式的主要参数设置如表1所示, 柱的中心点设在通榆站(44.42°N,122.87°E), 下垫面条件作均一化处理,海拔高度为184m, 植被类型为农田。模拟时的网格距设为20km, 积分步长60s,积分时间为一年。陆面模式 BATS和CoLM分别与区域柱状模式耦合,陆面 模式的积分步长设为600s。

侧边界的驱动场采用的是 NCEP-DOE 的再分 析资料,高空资料水平分辨率 2.5°×2.5°,地面 资料的水平分辨率为 1.875°×1.875°,一天共有 4 个时次的数据,分别为 00 时、06 时、12 时、18 时(协调世界时)。模式所需的初始场为再分析资 料插值得到,而陆面模式定义的各层的土壤温湿 度的初始场则由通榆站的观测资料插值到各土壤 层得到。侧边界为每 6 h 更新一次,采用线性时 间依赖侧边界(time-dependent)。

目前大多数大气模式对到达地面的太阳辐射的描述不够准确,并且多数模式过高地估计了地 球表面吸收的太阳辐射,这可能和大气吸收、云 和气溶胶的参数化方案有很大关系(Wild, 2005),另外模式对到达地面的长波辐射的模拟也

### 表 1 区域柱状模式模拟试验的参数设置

 Table 1
 Parameter settings of the experiment in the regional column model

设置
通榆 (44.42°N, 122.87°E)
184 m
20 km
$\delta - 17$
2002年10月1日~2003年9月30日
60 s
BATS/CoLM
CEOP 观测值
农田

存在较大的不确定性(Wild and Cechet, 2002), 这些不确定性势必导致对地表感热和潜热通量计 算的误差,给对比分析耦合后的陆面模式的模拟 能力的结果带来不确定性。为了消除这种辐射的 误差对计算地面热通量的不确定性,在区域柱状 模式的模拟时,将 CEOP 观测的到达地面的短波 辐射和长波辐射代入模式进行校正,以解决这个 问题。

# 4 模拟结果分析

#### 4.1 感热和潜热

图 3 和 4 为 BATS 和 CoLM 在耦合和非耦合 两种情况下对地表感热和潜热通量的模拟结果, 以及与 CEOP 观测值的对比,图中显示的是感热 和潜热的逐月平均值。从感热的模拟情况(图3) 可以看出, BATS 对感热的模拟在半干旱区存在 较大的偏差,在夏季 offline 的模拟结果偏高非常 明显,而耦合之后的偏差被明显放大。CoLM 在 耦合之后的模拟值与 offline 的结果之间的偏差没 有 BATS 那么明显, BATS 在耦合后的结果相对 干 offline 来说,冬季偏低,而夏季偏高,CoLM 则正好相反,耦合之后冬季的模拟偏低,夏季的 模拟偏差不明显,这也说明陆气之间的反馈作用 对不同陆面过程模拟结果的影响是有差别的。可 以看到耦合了 CoLM 的区域柱状模式相对于耦合 了 BATS 的模式来说, 感热的模拟效果明显得到 了改进。另外 BATS 和 CoLM 在 offline 情况下对 5月份的模拟性能较差,耦合之后的模拟效果仍 然不好,偏差被放大。

对于潜热通量的模拟(图 4), BATS 和 CoLM 在耦合之后的整体模拟效果相对于 offline 来说都 得到了一定的改善,相比于 BATS,耦合了 CoLM 的区域柱状模式模拟的农田下垫面的春末 夏初的潜热通量明显较好,与观测较为接近,虽 然耦合之后 BATS 在这个时期的模拟偏差减小, 但相对于观测,仍然明显偏高。

由感热和潜热的模拟对比可见,BATS 对半 干旱区的夏季感热的模拟出现了较大的偏差,耦 合后偏差被明显放大,虽然 CoLM 在耦合之后, 由于陆气之间的反馈作用,感热的模拟偏差也被 略微放大,但由于其 offline 的结果相对来说误差



图 3 感热通量季节变化的模拟与观测

Fig. 3 Simulations and observations of seasonal variation of sensible heat flux



图 4 同图 3, 但为潜热通量季节变化 Fig. 4 Same as Fig. 3, but for latent heat flux

耦合后的结果要稍好于 offline 的模拟, CoLM 在 耦合后的模拟性能仍要好于 BATS。

下面讨论模式对冬、夏两季日变化的模拟能 力,所选取的时段分别为冬季 2003 年 2 月 13 日 ~2003 年 2 月 28 日,和夏季 2003 年 7 月 1 日~ 2003 年 7 月 25 日,如图 5 和 6 所示。从感热的模 拟来看,冬季 (图 5a) CoLM 耦合后的结果相对 于 offline 结果差别不是太大,相对于 offline 的结 果,上午的感热模拟偏低,而午后的模拟偏高, 在夜间,两者的模拟值相差很小。总体来看, CoLM 模拟的峰值在耦合后没有 BATS 耦合前后 的差别那么明显。相比于耦合了 BATS 的模拟值, 耦合了 CoLM 的区域柱状模式模拟的感热明显得到 了较大的改善,日间峰值的偏差减小了 50 W·m<sup>-2</sup> 左右。在夏季 (图 5b),CoLM 耦合模拟的结果在 日间要略好于 offline 的结果,与观测的偏差有所 减小,这与 BATS 在耦合和 offline 两种情况下的 模拟效果的差别是相反的,CoLM 耦合后对夏季 感热的偏差并没有放大,而是略有减小。可以看 到耦合了 CoLM 的区域柱状模式对夏季感热日变 化的模拟是相对最好的。

不大,耦合后的结果与观测的偏差没有 BATS那么明显。对于潜热通量的模拟,两个陆 面模式的耦合情况相近,对于潜热通量在冬夏两 季的日变化的模拟情况如图6所示,在冬季(图 6a),两个陆面模式都没能很好地模拟出潜热的日 变化,耦合后的结果相对于 offline 的结果有所改 进,但偏差仍然很大,这可能与耦合后模式模拟 的降水的反馈作用有关,而在 offline 的模拟中冬 季观测的降水基本为零。相对于耦合了 BATS 的 区域柱状模式,耦合了 CoLM 之后,模式对冬季 潜热模拟的偏差改进不明显。在夏季(图 6b), 两个陆面模式的模拟效果得到了较大的提高, CoLM 对日间的潜热模拟在耦合之后与观测更为



图 5 感热通量日变化的模拟与观测:(a)冬季;(b)夏季

Fig. 5 Simulations and observations of diurnal variation of sensible heat flux: (a) Winter; (b) summer



图 6 同图 5,但为潜热通量日变化 Fig. 6 Same as Fig. 5, but for latent heat flux

接近,这与 BATS 在耦合前后的表现是一致的, 但耦合之后在上午的模拟仍然偏高,其它时段的 模拟相对于观测,表现是最好的。而 BATS 由于 过高地估计了夏季的感热,使得潜热的模拟明显 偏小。

可以看到,区域柱状模式在耦合了不同陆面 模式后,对地表热通量的模拟效果差别很大,陆 气之间的反馈作用使得两个陆面模式在半干旱区 对地表热通量的模拟性能在耦合前后有所差别。 为了比较两个陆面过程在耦合前后的整体模拟效 果,分别计算了 BATS 和 CoLM 在耦合前后对感 热和潜热模拟的均方根误差,如表 2 所示。可以 看到,陆面模式对感热的模拟在耦合后效果变差 了,均方根误差增大。耦合前后 BATS 对感热的 模拟偏差最大,达到了 1 倍左右,而 CoLM 的偏 差增大的幅度则要小得多。潜热的模拟在耦合前 后,均方根误差差别不大,但耦合后的偏差是减 小的。由此也说明,陆气之间的反馈对 BATS 的 感热的模拟影响是最大的,而感热模拟的偏差势 表 2 BATS 和 CoLM 耦合前后对感热和潜热模拟的均方 根误差

Table 2 RMSE (Root-Mean-Square Error) of BATS and CoLM in offline and coupled mode  $W \cdot m^{-2}$ 

	均方根误差		
-	感热	潜热	
BATS 耦合前	49.87	52.53	
BATS 耦合后	83.94	50.93	
CoLM 耦合前	49.20	46.20	
CoLM 耦合后	56.04	44.97	

必影响到区域柱状模式对地表气象要素的模拟能 力,下一节将对耦合了不同陆面模式的区域柱状 模式对地表气温和比湿的模拟性能进行对比。

#### 4.2 地表气象要素

耦合不同陆面模块后的区域柱状模式对地表气 象要素的日变化的模拟情况见图 7。对于冬季的地 表气温,相对于观测值,耦合了 CoLM 的区域柱状 模式的模拟值在夜间和上午偏高,而下午偏低,这 与耦合 BATS 的模拟结果恰好相反。而冬季近地面 比湿的模拟,耦合两种陆面过程的柱状模式的模拟



图 7 同图 5,但为近地面气温(T)和比湿(q)的日变化 Fig. 7 Same as Fig. 5, but for surface temperature (T) and specific humidity (q)

值相差不大,都要比观测值偏高1g•kg<sup>-1</sup>左右。 由于两个陆面模式在冬季的模拟结果相差不大, 所以耦合了 BATS 和 CoLM 的区域柱状模式在冬 季的模拟效果较为接近。在夏季,相对于耦合 BATS的柱状模式模拟的地表气温整体偏高的结 果,耦合了 CoLM 的柱状模式对地表气温的模拟 效果有了较大的改善,对日间峰值的模拟偏差减 小了2℃,这与耦合了 CoLM 之后模拟的感热的 偏差减小有很大关系。对于比湿的模拟,相比耦 合 BATS 的结果,区域柱状模式在耦合了 CoLM 后,其结果得到了改善,上午的较大偏差得到了 控制,而耦合两种陆面过程的柱状模式都较好地 模拟了夜间的比湿状况,模拟值与观测非常接近。 通过这些分析可以看到,区域柱状模式耦合了 CoLM 后,对地表气象要素的日变化特征的模拟 结果得到了较大的改进。

表 3 是计算的耦合了两种陆面过程的区域柱 状模式对地表气象要素的模拟值相对于观测值的 相关系数和均方根误差,从表中可以清楚地看到, 不同陆面模块对区域柱状模式的模拟效果的影响。 对于气温和比湿,耦合 CoLM 的柱状模式的模拟 效果要优于耦合 BATS 的结果。在农田下垫面, 耦合了 CoLM 之后,模式对气温模拟的均方根误 差减小了 0.5 ℃左右,对比湿模拟的均方根误差 减小了 1 g•kg<sup>-1</sup>。

为了探讨感热、潜热的模拟效果对地表气象 要素模拟的影响,分别计算了耦合前后它们之间 的相关系数,如表4所示。感热通量的模拟值在 非耦合和耦合两种情况下,与地表气温和比湿的 相关系数差别较大,在 offline 情况下,没有陆气 反馈作用, 地表气温和比湿是陆面模式的驱动量, 而耦合之后,由于陆气之间的反馈,感热与地表 气温的相关系数明显增大,这也是造成 BATS 在 耦合情况下模拟的夏季感热通量偏差增大的原因, 并且致使地表气温的模拟在夏季明显偏高。潜热 通量的模拟值在耦合之后与地表气温的相关系数 基本没有差别,所以感热和地表气温的模拟偏差 的增大并没有影响到耦合之后潜热通量的模拟效 果,由前面的分析已知,潜热在耦合之后的模拟 效果有所改善。对于地表的空气比湿,由于在 offline 模拟时,感热通量的计算没有用到近地面比 湿,它们之间没有相关性,而耦合之后,两者之

表 3	$\mathbf{X}$	域柱物	く模式	模拟的:	地表	气象	要素的	り偏差	
Table	3	Bias o	of simu	lations	of t	he reg	ional	column	model

	相关系数		均	方根误差
	气温	比湿	气温/℃	比湿 /g・kg <sup>-1</sup>
BATS	0.98	0.89	3.25	2.61
CoLM	0.98	0.95	2.68	1.63

表 4 地表热通量与地表气象要素的相关系数 Table 4 Correlation coefficient between surface heat flux and surface meteorological variables

	相关系数		
	气温	比湿	
感热 (非耦合)	0.19	0.01	
感热 (耦合)	0.39	0.21	
潜热(非耦合)	0.48	0.39	
潜热 (耦合)	0.47	0.49	

间的相关系数明显增加,但相比于其它各量的相 关性,仍然较小。潜热通量的模拟值与地表比湿 的相关性,在耦合之后明显增加,可见潜热通量 的模拟效果对近地面的空气湿度的模拟起着较大 的作用。

#### 4.3 边界层的垂直结构

不同的陆面讨程模式通讨对地气之间能量和 物质交换的模拟,从而影响着柱状模式对整个大 气的垂直结构的模拟结果,由于两个陆面模式在 冬季的模拟性能差别较小,这里主要讨论分别耦 合了 BATS 和 CoLM 的柱状模式在夏季的差别。 为了比较两个陆面过程对大气垂直结构模拟的影 响,将区域柱状模式分别耦合了 BATS 和 CoLM 的模拟值相减,得到了气温的差值随时间和高度 的变化,如图 8 所示(2003 年 7 月 1 日~2003 年 7月25日)。对于温度的模拟,两个陆面过程之间 差别最大的是在 950 hPa 以下的边界层, 在夏季, BATS 模拟的边界层的温度明显要高于 CoLM, 平均偏高 0.15 ℃,最大偏高达到 5 ℃,这是与 BATS 在夏季对感热模拟偏差过大相联系的,且 偏差最大的时刻大都发生在日间。BATS 在夏季 对感热的偏差较大,造成了耦合模式对近地面气 温的模拟偏高,比湿的模拟也具有相类似的情况, 而温度的偏差又使得 BATS 对感热的模拟出现异 常的高值,结果耦合 BATS 的区域柱状模式模拟 的感热在夏季明显偏高。

耦合 BATS 的柱状模式对夏季的气温和比湿







的模拟有一个整体的偏高趋势,由表3已知,通 过耦合CoLM,模式对近地面气温和比湿的模拟 效果得到了较大的提高。对于区域柱状模式对大 气垂直结构和边界层垂直廓线的模拟能力,还需 要加密的探空资料来作进一步的验证。

### 5 总结与展望

本文通过构建区域柱状模式,并与 BATS 和 CoLM 分别进行了耦合, 检验并对比了两个陆面 模式在耦合情况下对半干旱区陆气之间能量交换 的模拟能力,并分析了耦合不同陆面模块的区域 柱状模式对地表气象要素在半干旱区的模拟性能。 CoLM 在半干旱区通榆站的模拟性能在耦合前后 都要优于 BATS 的结果,并且耦合 CoLM 的区域 柱状模式对气温和比湿的模拟效果较好。通过与 offline 的结果和 CEOP 的观测结果进行对比,可 以看到陆面模块在半干旱区的模拟性能很大程度 上影响了耦合模式对近地面气象要素的模拟结果。 由于陆气之间的反馈作用, 感热通量的模拟偏差 在耦合后被放大, 而潜热的误差则略有减小, 但 这种偏差被放大的程度在不同陆面模块之间是不 同的,最明显的就是 BATS 对夏季感热模拟的偏 差在耦合之后被明显放大, 而 CoLM 对地表热通 量较好的模拟效果,使得耦合了 CoLM 的区域柱 状模式具有更好的模拟陆气间能量通量交换和地 表气象要素的能力。细致的土壤分层以及对土壤 水文过程更为合理的处理,可能是耦合了 CoLM 后,区域柱状模式表现较好的一个重要原因,与

之相类似的结果,如将 10 层土壤模式引入 BATS 后,RIEMS 模拟的夏季降水、气压场等都较原 RIEMS 为优(赵鸣, 2006)。

利用 CEOP 的观测资料对所构建的区域柱状 模式对地面气象要素的模拟性能进行了检验,得 到了较好的效果,所构建的区域柱状模式具有较 好的对近地面气象要素的模拟能力,可以用来作 为模拟分析半干旱区陆气相互作用过程的定量工 具。本文只是从陆面过程模式的角度对区域柱状 模式进行分析和改进,通过这个工具,结合观测 资料,还可以对模式中不同的物理过程(如行星 边界层方案、辐射方案等)进行模拟对比,找到 在半干旱区最优的物理参数化组合方案,为提高 区域气候模式在半干旱区的模拟能力提供参考 依据。

#### 参考文献 (References)

- Bosilovich M G, Lawford R. 2002. Coordinated enhanced observing period (CEOP) international workshop [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 83 (10): 1495-1499.
- Dai Y, Zeng X, Dickinson R E, et al. 2003. The common land model [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 84 (8): 1013-1023.
- Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J. 1993. Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BSTS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model [M]. NCAR Technical Note, NCAR/TN-387+STR; 72pp.
- Fu C, Wei H, Qian Y. 2000. Documentation on a Regional Integrated Environment Model System (RIEMS, Version 1) [R]. TEACOM Science Report, No. 1, Start Regional Committee for Temperate East Asia, Beijing, China: 1-26.

- 符淙斌,安芷生. 2002. 我国北方干旱化研究——面向国家需求的 全球变化科学问题 [J]. 地学前缘,9 (2):271-275. Fu Congbin, An Zhisheng. 2002. Study of aridification in northern China—A global change issue facing directly the demand of nation [J]. Earth Science Frontiers (in Chinese),9 (2):271-275.
- 符淙斌, 温刚. 2002. 中国北方干旱化的几个问题 [J]. 气候与环 境研究, 7 (1): 22-29. Fu Congbin, Wen Gang. 2002. Several issues on aridification in the northern China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 7 (1): 22-29.
- 符淙斌,董文杰,温刚,等. 2003. 全球变化的区域响应和适应 [J]. 气象学报,61 (2):245-250. Fu Congbin, Dong Wenjie, Wen Gang, et al. 2003. Regional response and adaptation to global change [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese),61 (2):245~250.
- 符淙斌, 王淑瑜, 熊喆, 等. 2004. 亚洲区域气候模式比较计划的 进展 [J]. 气候与环境研究, 9 (2): 225 - 239. Fu Congbin, Wang Shuyu, Xiong Zhe, et al. 2004. Progress report on regional climate model intercomparison project for Asia [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (2): 225 - 239.
- Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. 1994. A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5) [M]. NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR: 177pp.
- Hong S, Pan H. 1996. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model [J]. Mon. Wea. Rev., 124: 2322-2339.
- Kiehl J T, Hack J J, Bonan G B, et al. 1996. Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3) [M]. NCAR Technical Note, NCAR/TN-420+STR: 152pp.
- Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z C, et al. 2004. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation [J]. Science, 305 (5687): 1138-1140.
- 刘辉志,董文杰,符淙斌. 2004. 半干旱地区吉林通榆"干旱化和 有序人类活动"长期观测实验 [J]. 气候与环境研究,9(2): 378-389. Liu Huizhi, Dong Wenjie, Fu Congbin, et al. 2004. The long-term field experiment on aridification and the ordered human activity in semi-arid area at Tongyu, northeast China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9(2): 378-389.
- 刘辉志,涂钢,董文杰,等. 2006. 半干旱地区地气界面水汽和二 氧化碳通量的日变化及季节变化 [J]. 大气科学,30 (1):108-118. Liu Huizhi, Tu Gang, Dong Wenjie, et al. 2006. Seasonal and diurnal variations of the exchange of water vapor and CO<sub>2</sub> between the land surface and atmosphere in the semi-arid area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (1): 108-118.
- Ma Z, Fu C. 2003. Interannual characteristics of the surface hydrological variables over the arid and semi-arid areas of northern China [J]. Global and Planetary Change, 37: 189–200.

- 马柱国,符淙斌. 2005. 中国干旱和半干旱带的 10 年际演变特征 [J]. 地球物理学报,48 (3): 519-525. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2005. Decadal variations of arid and semi-arid boundary in China [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese),48 (3): 519-525.
- 马柱国, 符淙斌. 2006. 1951~2004 年中国北方干旱化的基本事实 [J]. 科学通报, 51 (20): 2429-2439. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2006. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004 [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 51 (20): 2429-2439.
- 马柱国,符淙斌. 2007. 20世纪下半叶全球干旱化的事实及其与大 尺度背景的联系 [J]. 中国科学 (D辑), 37 (2): 222 – 233. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2007. Global aridification in the second half of the 20th century and its relationship to large-scale climate background [J]. Science in China (Ser. D) (in Chinese), 37 (2): 222 – 233.
- 马柱国,任小波. 2007. 1951~2006 年中国区域干旱化特征 [J]. 气候变化研究进展,3 (4): 195-201. Ma Zhuguo, Ren Xiaobo. 2007. Drying trend over china from 1951 to 2006 [J]. Advances in Climate Change (in Chinese),3 (4): 195-201.
- 孟祥新,符淙斌. 2009. 不同陆面过程模式对半干旱区通榆站模拟 性能的检验与对比 [J]. 气候与环境研究,14 (4): 352-362. Meng Xiangxin, Fu Congbin. 2009. Comparative evaluation of land surface models BATS, LSM, and CoLM at Tongyu station in semi-arid area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (4): 352-362.
- Ramanathan V, Downey P. 1986. A nonisothermal emissivity and absorptivity formulation for water vapor [J]. J. Geophys. Res., 91: 8649 - 8666.
- Slingo A. 1989. A GCM parameterization for the shortwave radiative properties of water clouds [J]. J. Atmos. Sci., 46 (10): 1419 - 1427.
- 涂钢,刘辉志,董文杰,等. 2006. 半干旱区退化草地地表能量收 支 [J]. 气候与环境研究, 11 (6): 723 - 732. Tu Gang, Liu Huizhi, Dong Wenjie, et al. 2006. The near surface layer energy budget on degraded-grassland in semi-arid area at Tongyu in Jilin Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (6): 723-732.
- Wild M, Cechet R. 2002. Downward longwave radiation in general circulation models: A case study at a semi-arid continental site [J]. Tellus, 54A: 330-337.
- Wild M. 2005. Solar radiation budgets in atmospheric model intercomparisons from a surface perspective [J]. Geophys. Res. Lett., 32, L07704, doi: 10.1029/2005GL022421.
- 赵鸣. 2006. 对 RIEMS 模式中陆面过程的一个改进 [J]. 气象科 学, 26 (2): 119-126. Zhao M. 2006. An improvement to the land surface process in RIEMS model [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 26 (2): 119-126.