土壤湿度资料同化对中国东部夏季区域气候模拟的改进

胡娅敏^{①②③}, 丁一汇^④, 廖菲^①

中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080;

广东省气候中心, 广州 510080;

中国气象科学研究院, 北京 100081;

国家气候中心, 北京 100081

E-mail: huyamin_1978@sohu.com

2008-10-12 收稿, 2009-02-06 接受

国家自然科学基金(批准号: 40705026)和中国气象局广州区域气象中心气象科技攻关项目(编号: GRMC2007B01)资助

摘要 采用牛顿张弛同化法把 GSWP2 资料同化进区域气候模式 BCC_RegCM1.0(简称 RegCM)中土壤湿度初始场, 结果得到采用不同张弛参数对土壤湿度资料进行同化, 均能不同程度的改进气温和降水的模拟, 当张弛强度取 0.5 和张弛时间为 5 d 时, 对中国东部地区气温和降水模拟的改进效果较好. 加入土壤湿度资料同化后, 不仅对中国东部地区的降水和气温的空间分布型有所改进, 而且修正了控制试验中地表气温的系统性冷偏差以及中国东部地区的降水偏少, 使地表气温和降水的模拟值较控制试验结果接近于观测值, 这说明 RegCM 对地面气温的偏低和降水量的偏少, 可能与陆面过程中的土壤湿度处理有较大的关系, 今后应注重 RegCM 中土壤湿度的作用.

关键词

土壤湿度
牛顿张弛
资料同化
区域气候模拟

对区域气候形成、异常和变化的模拟与预测结果表明, 区域气候模式具有较强的模拟和预测区域气候变化特征的能力^[1~3]. 然而, 区域气候模式对东亚季风区气候的模拟仍存在一定的困难, 这就要求我们一方面要改进区域气候模式的物理过程和动力框架, 另一方面要改进模式的初始条件和边界条件. 区域模式中陆面过程决定着地表和大气的能量、热量交换. 土壤湿度是这个过程的重要组成部分, 它通过改变土壤热容量, 地表反射率等影响近地面水、热平衡并进一步影响区域气候特征, 这就要求建立一个合理的土壤湿度初始化方案^[4]. 一些研究工作指出区域气候模拟对土壤湿度初值异常敏感^[5~8], 尤其对后期的降水和地表气温具有很大的影响. 土壤湿度的长期响应可能产生两种后果: 一方面初始状况的长期记忆可以延伸可预报性; 另一方面, 初始

土壤湿度的不确定性能产生持续的误差, 限制潜在的可预报性^[9]. 研究指出一些降水^[10]和地表气温^[11]的模拟误差可能来自于不真实的初始土壤湿度状况^[12]. 因而, 较为正确的土壤湿度初值不仅会改善陆面过程要素的模拟, 也会改善地面气温和降水的模拟^[13,14]. 郭维栋等人^[15]采用中国科学院大气物理研究所跨季度气候距平数值预测系统—IAP PSSCA 模拟 1998 年中国东部的春季降水评分为 72.0, 夏季评分为 66.2, 而引入土壤湿度初始化方案后, 该区春夏两季降水的评分分别升至 83.2 和 76.5, 平均增幅达 10 分左右, 这一增幅若出现在短期气候业务预测中将是十分可观的. 因此, 合理的土壤湿度初始化对于提高区域气候模拟能力是必要的^[1], 它是当前气候数值模拟研究中一个重要的研究课题.

而资料同化是为数值预报模式提供最优初始场

引用格式: 胡娅敏, 丁一汇, 廖菲. 0B 土壤湿度资料同化对中国东部夏季区域气候模拟的改进. 科学通报, 2009, 54: 2388~2394

Hu Y M, Ding Y H, Liao F. An improvement on summer regional climate simulation over East China: importance of data assimilation of soil moisture. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0285-1

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2009-54-16-2388>

的一种有效方法,它主要在考虑数据时空分布以及观测场和背景场误差的基础上,在数值模式的动态运行过程中融合新的观测数据,从而获得具有时空一致性、物理一致性和可靠度高的数据集.近年来,一些学者也在这方面进行了尝试^[16~19],但他们的试验或是选取其他资料(如:卫星、遥感、微波资料等)进行直接或间接同化,或是基于某个单点计算,且选取的均是“off-line”的陆面过程模式,而把土壤湿度资料同化到陆面-大气耦合的区域气候模式中,当今许多机构正在进行研究,目前还没有投入业务使用.

本文尝试对区域气候模式 BCC_RegCM1.0 中土壤湿度初值进行资料同化,希望能够了解引入较为正确的土壤湿度初值对模式中气温和降水的影响,从而为提高区域气候模式对中国东部季风区夏季气

候的模拟提供一个新的思路.

1 模式和资料选取

区域气候模式是由中国气象局国家气候中心提供的BCC_RegCM 1.0^[2,3],以下均简称RegCM.模拟区域的中心位于江淮中心区域(31°N, 116°E),采用 Lambert投影.模式水平分辨率为 60 km,南北方向格点数为 92,东西方向格点数为 145,模拟区域(图1)覆盖了中国东部季风区,包括华北区(34°~42°N, 110°~120°E)、江淮区(28°~34°N, 110°~122°E)、华南区(22°~28°N, 110°~122°E),该模式对东亚地区的海岸线、岛屿、山脉等都有较细致的描述.模式垂直方向采用 σ 坐标,非均匀的分为 16 层,顶层气压为 100 hPa.选取表 1 所示的物理参数化方案和模式的动力配置进行模拟.

图 1

模拟的区域和地形高度(单位: m, 等值线间隔 500 m)以及中国地区地表气象观测站的位置(小圆点),模拟的中心区域(31°N, 116°E)(星号).

(a) 华北区; (b) 江淮区; (c) 华南区

表 1 本文选用的物理参数化方案及模式的动力配置

BCC_RegCM1.0 模拟框架		方案
物理参数化方案	辐射传输方案	CCM3
	积云对流方案	MFS (Mass Flux Scheme)
	行星边界层方案	Holtslag
	水汽方案	隐式
	陆面过程方案	BATS
模式动力配置	区域的选择	中心点 31°N, 116°E
		格点数 92 × 145
		资料 NCEP-DOE Reanalysis 2 及 Oi.v2 海温资料
	侧边界条件	嵌套方案 指数松弛方案
		缓冲区 15 × 15
	空间分辨率	垂直层数 16 层(顶层气压 100 hPa)
		水平分辨率 60 km
	时间步长	60 s
	积分时间	1994-04-01~1994-08-31

由于RegCM模式需要的土壤湿度资料为体积含水量,而目前观测的土壤湿度为重量含水率,它们之间的转化需要有台站田间持水量和容重资料,目前获得这套资料有困难. 张文君^[20]利用观测土壤湿度资料评估了ERA40 和NCEP再分析资料、GSWP2 和CLM陆面模式的土壤湿度,结果表明GSWP2 揭示了 4 套资料最多的共性,较好地反映了土壤湿度的季节循环. 故本文选取第二代全球土壤湿度项目 GSWP 2 (the second global soil wetness project)提供的 1986~1995 年的 $1^\circ \times 1^\circ$ 的全球逐日的土壤体积含水量(%)作为同化资料. 选用 1994 年强夏季风年^[21]作为研究对象,该年夏季中国出现南北两条明显的多雨带,而江淮地区降水偏少(图 2(a)). 分析GSWP2 资料对我国 1994 年土壤湿度的描述能力,图 2(b)给出了 1994 年 4 月 1 日~8 月 31 日表层和根区(图略) GSWP2 和观测土壤湿度资料的空间相关分布及相关系数^[22],可以看出GSWP2 能够较好地描述土壤湿度在 1994 年春末至夏季的空间分布型.

另外,用于模式检验的资料包括:(1) 中国气象局国家气象信息中心提供的 1994 年 4 月 1 日~8 月 31 日中国 753 个台站的逐日降水(单位: mm)和地表气温(单位: $^\circ\text{C}$)观测资料;(2) 分析环流特征的资料取自 1994 年 4 月 1 日~8 月 31 日美国 NCEP-DOE Reanalysis 2 的水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的逐日常规气象要素再分析资料.

2 土壤湿度资料同化对中国夏季区域气候模拟的改进

2.1 同化方案的设计

RegCM中陆面过程是由Dickinson等人^[23]发展的生物圈-大气圈传输方案(BATS),它描述了植被和交互式的土壤湿度对动量、热量和水汽的地表-大气交换的影响. BATS对于土壤湿度初值的计算主要考虑了土壤类型、地表植被类型和土壤湿度的气候有效值^[24],其地表土壤层、根区土壤区的土壤含水量 W_s 的初始化公式为

$$W_s = W_{\text{wilt}} + M_a(W_{\text{sat}} - W_{\text{wilt}}), \quad (1)$$

其中, W_{wilt} 是蒸腾停止时相对饱和水含量, W_{sat} 是饱和水含量, M_a 是可用水汽参数. 从(1)式可以看出,对于模拟的不同个例, BATS所提供的土壤湿度初值都是一个固定值,因而对强降水和严重干旱的情况下土壤湿度会出现较大误差^[25],同样它不能很好地描述土壤湿度的季节变化,从而土壤湿度初始化方案的不合理性是造成区域气候模式存在偏差的原因之一.

考虑到(集合)卡尔曼滤波同化方案和三维或四维变分资料同化方案在区域气候模式中的计算量过大,本文选取牛顿张弛法^[26]把GSWP2 土壤湿度资料同化进RegCM,这是一种广泛使用的间歇资料的经验方法,它通过在预报方程中增加一个附加项,使

图 2

1994 年(a) 观测的夏季降水距平百分率, (b) GSWP2 和观测的表层土壤湿度的空间相关分布图

方程的解逼近观测值，其公式为

$$X_a = X_m + \alpha \times (X_o - X_m), \tag{2}$$

其中， α 是张弛强度， X_a 是张弛过程中被计算的分析值， X_m 是最后一个时间步长模拟值， X_o 是需要在该时间步长被同化进模式的观测值。

2.2 资料同化方案中张弛参数的选取

控制试验的初始场为 1994 年 4 月 1 日，侧边界条件由 NCEP-DOE Reanalysis 2 提供。由(2)式可以看出，RegCM 中牛顿张弛同化方案的设计与张弛强度和张弛时间的长度这两个参数的选取有关，下面分别进行两组试验选取，同化试验中仅修改陆面过程中的土壤湿度场，其他条件不变。

(i) 张弛强度的选取试验。假设 GWSP2 逐日土壤湿度资料作为“真实的”土壤湿度资料，从 4 月 1 日~ 8 月 30 日逐日替代区域气候模式中的土壤湿度值，由于同化时间越长，它能提供更多的“真实”信息，因而保持张弛时间长度为 152 d，对张弛强度进行试

验，研究只关注降水和地表气温，考虑到 GSWP2 土壤湿度资料是逐日的，同化间隔选取 1 d。

表 2 张弛强度改变时地表气温和降水量的模拟值和观测值的空间相关系数

张弛强度	地表气温			降水量		
	华北	江淮	华南	华北	江淮	华南
0.1	0.819	0.783	0.656	0.124	0.031	0.039
0.2	0.817	0.780	0.651	0.155	0.078	0.113
0.3	0.800	0.774	0.651	0.159	0.035	0.076
0.4	0.802	0.793	0.665	0.181	0.071	0.095
0.5	0.806	0.795	0.652	0.184	0.104	0.094
0.6	0.806	0.778	0.614	0.124	0.027	0.058
0.7	0.798	0.788	0.661	0.180	0.050	0.098
0.8	0.798	0.799	0.661	0.158	0.092	0.086
0.9	0.819	0.779	0.638	0.150	0.034	0.095
1.0	0.817	0.775	0.646	0.131	0.071	0.117
控制试验	0.798	0.773	0.650	0.126	-0.018	0.004
(0.5-con)/con ^{a)}	1.00%	2.85%	0.31%	46.03%	677.78%	2250%

a) con 为控制试验，下同

图 3 同化前后 4 月 1 日~8 月 30 日江淮地区(1)和华南地区(2) 地表气温(a)和逐日降水量(b)的比较
GSWP0.5 表示是张弛强度为 0.5，张弛时间为 152 d 的同化试验

从表 2 可以看出, 区域气候模式的控制试验对中国东部地区的地表气温的空间分布型具有较好的模拟能力, 但对江淮和华南地区的降水空间分布模拟尚差. 采用不同张弛强度系数对土壤湿度资料进行同化, 均能不同程度的改进气温和降水空间分布的模拟. 当张弛强度取 0.5 时, 对中国东部 3 个地区气温和降水模拟的改进效果较好, 这说明了资料同化中“观测资料”和模式的约束效果是等同的.

图 3 给出了 1994 年夏季江淮地区和华南地区逐日地表气温和降水的观测值、控制试验和同化试验结果的比较, 可以看出加入土壤湿度资料同化后, 修正了控制试验中地表气温的系统性冷偏差, 使地表气温的模拟值较控制试验与观测更为接近, 且在 5 月以后的改善更明显. 同样, 采用土壤湿度资料同化后, 江淮地区和华南地区降水的模拟值较控制试验结果接近于观测值, 尤其增加了一些强降水过程的降水量, 但同化试验对于 8 月份江淮地区的降水过程模拟欠佳, 且控制试验和同化试验都没能模拟出华南前汛期的强降水过程, 这可能与模式中选取的积云对流参数化方案有关.

(ii) 张弛时间长度的选取试验. 现在固定张弛强度为 0.5, 通过试验选取张弛时间的长度.

从表 3 可以看出, 控制试验能较好地模拟中国东部地表气温的空间分布型. 加入土壤湿度同化后,

使华南地区的地表气温空间分布有弱的提高; 当同化较短时间时对华北和江淮地区并无明显改善, 当同化时间超过一个月后, 对这两个地区的气温模拟稍有改善.

与气温模拟不同的是, 控制实验对中国东部夏季降水空间分布的模拟, 尤其是江淮和华南地区的模拟效果较差. 但加入了 GSWP2 土壤湿度资料同化后, 对华北、江淮和华南地区降水模拟效果均有改进.

分析得到, 不同的张弛时间长度对各区域模拟的改善不尽相同. 当张弛时间为 5 d 时, 其同化效果已经较好, 因此研究中选取张弛时间长度为 5 d.

表 3 张弛时间长度改变时地表气温和降水量的模拟值与观测值的相关系数

张弛时间 长度/d	地表气温			降水量		
	华北	江淮	华南	华北	江淮	华南
1	0.785	0.765	0.674	0.168	0.053	0.120
5	0.793	0.771	0.668	0.181	0.094	0.123
7	0.792	0.781	0.682	0.227	0.089	0.088
10	0.776	0.764	0.672	0.167	0.088	0.132
20	0.787	0.771	0.680	0.183	0.072	0.138
30	0.801	0.779	0.674	0.149	0.046	0.054
152	0.806	0.795	0.652	0.184	0.104	0.094
控制实验	0.798	0.773	0.650	0.126	-0.018	0.004
(5-con)/con	-0.63%	-0.26%	2.69%	43.65%	622.22%	2975%

图 4 1994 年夏季地表气温(单位: $^{\circ}\text{C}$)的比较

(a) 观测; (b) 控制试验; (c) 同化试验

图5 1994年夏季降水量(单位: mm)的比较

(a) 观测; (b) 控制试验; (c) 同化试验

图4给出了1994年夏季地表气温观测值、控制试验和同化试验的模拟值比较。加入土壤湿度资料同化后,使中国东部地区地表气温增加 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$,对控制试验中模拟的地表气温偏低有较大改善,从而和观测更为接近,这说明RegCM对地面气温模拟的偏低,可能与模式中土壤湿度描述有较大的关系。图5给出了夏季降水观测值与模拟值的比较,可以看出土壤湿度同化对夏季降水也有较大改善,与控制试验相比,土壤湿度同化使中国东部地区夏季降水量增加了 $200\sim 400\text{ mm}$,与观测更接近。

3 结论和讨论

本文采用牛顿张弛同化法把GSWP2资料同化进国家气候中心区域气候模式BCC_RegCM1.0土壤湿度初始场,结果得到,区域气候模式中加入土壤湿度资料同化后,能较好地改善夏季中国东部地区地表气温和降水量的模拟,这说明RegCM对地面气温模拟的偏低和降水量的偏少,可能与陆面过程中的土壤湿度处理有较大的关系,今后应注重区域气候模式中土壤湿度的作用。

同样,采用GSWP2资料对1991年夏季中国东部地区进行土壤湿度资料同化试验,结果得到:区域气候模式中土壤湿度初始场的改进对中国东部季风区降水和气温有较大的改进。另外,把1998年土壤湿度初始场加一个随机扰动,然后对这个“不真

实”的初始场进行资料同化,结果也揭示了土壤湿度初值在气候模拟的重要作用。比较这3年同化试验与控制试验的结果均得到,进行土壤湿度资料同化后,多(少)雨区对应的蒸发通量增加(减少),潜热通量增加(减少),感热通量减少(增加),向外长波辐射减少(增加),而径流变化不明显。因而,同化试验中土壤湿度主要通过两个过程来影响降水和气温:(1)“土壤-降水”的局地反馈机制。同化试验较控制试验,多雨区对应的蒸发通量增加,导致了降水增加,体现了水的局地再循环作用。(2)土壤湿度的热力作用。多雨区的地表蒸发增加,导致了该区感热通量减少,气温降低。

然而,由于BATS作为较早出现的陆面过程方案之一,其在植被冠层对降水的拦截、地表和次表层径流的形成机制、地下水的引入、土壤有效水以及地表蒸发阻抗的确定等环节上均不尽完善,且BATS中主要采用强迫-恢复法和一些经验关系来解决土壤温度和土壤湿度问题时,加入了一些不符合实际的条件限制,因此它不能准确描述土壤各层间的温度传导和湿度扩散过程。另外,BATS对雪盖的处理也很简单,没有详细考虑积雪内部的过程,对于非均匀和有雪盖情况,计算会出现严重的概念错误。今后可有针对性地对区域气候模式的陆面模块中有关土壤水文过程的方案进行改进或引入更新的陆面模式

(如 NCAR CLM3.5), 将有利于真实地刻画土壤湿度和区域气候的相互作用。

另外, GSWP2 资料不能完全真实地描述土壤湿

度的变化, 如何合理地引入台站、遥感及卫星资料等, 以及研究土壤-降水在不同气候背景不同地区的反馈机制等等, 这些工作都需要进一步深入研究。

参考文献

- 1 Lee D K, Suh M S. Ten-year East Asian summer monsoon simulation using a regional climate model (RegCM2). *J Geophys Res*, 2000, 105: 29565—29577 [\[DOI\]](#)
- 2 Ding Y H, Shi X L, Liu M, et al. Multi-year simulations and experimental seasonal predictions for rainy seasons in China by using a nested regional climate model (RegCM_NCC) Part I: Sensitivity study. *Adv Atmos Sci*, 2006, 23: 323—341 [\[DOI\]](#)
- 3 Ding Y H, Liu Y M, Shi X L, et al. Multi-year simulations and experimental seasonal predictions for rainy seasons in China by using a nested regional climate model (RegCM_NCC) Part II: The experiment seasonal prediction. *Adv Atmos Sci*, 2006, 23: 487—503 [\[DOI\]](#)
- 4 马柱国, 魏和林, 符宗斌. 土壤湿度与气候变化关系的研究进展与展望. *地球科学进展*, 1999, 14: 299—305
- 5 Pal J S, Eltahir A B. Pathways relating soil moisture conditions to future summer rainfall within a model of the land-atmosphere system. *J Clim*, 2001, 14: 1227—1242 [\[DOI\]](#)
- 6 Grimm A M, Pal J S, Giorgi F. Connection between spring conditions and peak summer monsoon rainfall in South America: Role of soil moisture, surface temperature, and topography in Eastern Brazil. *J Clim*, 2007, 20: 5929—5945 [\[DOI\]](#)
- 7 李巧萍. 土壤湿度和植被覆盖变化对我国区域气候影响的数值模拟研究. 博士学位论文. 北京: 中国气象科学研究院, 2004
- 8 王淑瑜. 东亚区域气候模拟和土壤湿度初始化问题研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2003
- 9 Wang Y Q, Leung L R, McGregor J L, et al. Regional climate model: Progress, challenges, and prospects. *J Meteorol Soc Jpn*, 2004, 82: 1599—1628 [\[DOI\]](#)
- 10 Wang Y Q, Sen O L, Wang B. A highly resolved regional climate model (IPRC_RegCM) and its simulation of the 1998 severe precipitation event over China. Part I: model description and verification of simulation. *J Clim*, 2003, 16: 1721—1738 [\[DOI\]](#)
- 11 Liu Y M, Johnny C L Chan, Chow K C, et al. Ten-year climatology of summer monsoon over South China and its surroundings simulated from a regional climate model. *Int J Climatol*, 2006, 26: 141—157 [\[DOI\]](#)
- 12 Schar C, Luthi D, Beyerle U. The soil-precipitation feedback: A process study with a regional climate model. *J Clim*, 1999, 12: 722—741 [\[DOI\]](#)
- 13 Atlas R, Wolfson N, Terry J. The effect of SST and soil moisture anomalies on GLA model simulations of the 1988 U. S. summer drought. *J Clim*, 1993, 6: 2034—2048 [\[DOI\]](#)
- 14 Huang J, Van de Dool H M, Georgakakos K P. Analysis of model-calculated soil moisture over the United States (1931—1993) and applications to long-range temperature forecasts. *J Clim*, 1996, 9: 1350—1362 [\[DOI\]](#)
- 15 郭维栋, 马柱国, 王会军. 土壤湿度——一个跨季度降水预测中的重要因子及其应用探讨. *气候与环境研究*, 2007, 12: 20—28
- 16 Van Den Hurk, Bastiaanssen W G M, Pelgrum H. A new methodology for assimilation of initial soil moisture fields in weather prediction models using meteosat and NOAA data. *J Appl Meteorol*, 1997, 36: 1271—1283 [\[DOI\]](#)
- 17 Pleim J E, Xiu A. Development of a land surface model. Part II: data assimilation. *J Appl Meteorol*, 2003, 42: 1811—1822 [\[DOI\]](#)
- 18 黄春林, 李新. 基于集合卡尔曼滤波的土壤水分同化试验. *高原气象*, 2006, 25: 665—664
- 19 张生雷, 谢正辉, 田向军, 等. 基于土壤水模型及站点资料的土壤湿度同化方法. *地球科学进展*, 2006, 21: 1350—1362
- 20 张文君. 中国土壤湿度分布和变化的观测和模拟. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2006
- 21 李建平, 曾庆存. 一个新的季风指数及其年际变化和与雨量的关系. *气候与环境研究*, 2005, 10: 351—365
- 22 Pan Z, Christensen J H, Arritt R W, et al. Evaluation of uncertainties in regional climate change simulations. *J Geophys Res*, 2001, 106: 17735—17751 [\[DOI\]](#)
- 23 Dickinson R E, Sellers A H, Kennedy P J. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e Coupled to the NCAR Community Climate Model, NCAR/TN-387+STR, 1993. 72
- 24 Giorgi F, Bates G T. The climatological skill of a regional model over complex terrain. *Mon Weather Rev*, 1989, 117: 2325—2347 [\[DOI\]](#)
- 25 Smith C B, Lakhtakia M N, Capehart W J, et al. Initialization of soil-water content in regional-scale atmospheric prediction models. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1994, 75: 585—593 [\[DOI\]](#)
- 26 Hoke J E, Anthes R A. The Initialization of Numerical Models by a Dynamic-Initialization Technique. *Mon Weather Rev*, 1976, 104: 1551—1556 [\[DOI\]](#)