

考虑次网格变异性 and 土壤冻融过程的土壤湿度同化方案

田向军*, 谢正辉

中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029

* Email: tianxj@mail.iap.ac.cn

收稿日期: 2008-01-22; 接受日期: 2008-04-07

国家自然科学基金(批准号: 40705035)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2005CB321703)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号: KZCX2-YW-126-2、KZCX2-YW-217)资助项目

摘要 集合 Kalman 滤波以其简单有效的特点在陆面数据同化中广泛应用, 通常作为预报模型的陆面过程模式往往要考虑模式次网格变异性 and 土壤冻融过程, 若对此不加考虑而直接对土壤湿度进行同化可能会使得同化结果发生偏差. 将双集合 Kalman 滤波应用于土壤湿度的同化, 基于 NCAR/CLM 陆面过程模式建立了一个考虑次网格变异性 and 土壤冻融过程的土壤湿度同化方案: 在同一个时间步内用状态滤波对模式网格内某片上液态水分含量进行优化, 用参数滤波对该片上的固态水分含量和其他片上的液态/固态水分含量进行优化, 由此考虑模式次网格变异性 and 土壤冻融过程的影响, 从而实现对整个模式网格上土壤湿度的同化. 初步的同化试验表明: 其同化效果在有、无土壤冻融阶段都优于一般的不考虑次网格变异性 and 土壤冻融变化的同化方案; 该同化方案不仅能够提高那些有直接观测信息的土壤层的土壤湿度模拟精度, 还能在一定程度上改善那些没有任何观测信息的土壤层的模拟效果; 另外, 土壤湿度同化结果的改善还能在一定程度上提高陆面模式对于土壤温度的模拟精度.

关键词

双集合 Kalman 滤波
NCAR/CLM
土壤湿度同化方案
次网格变异性
土壤冻融

土壤湿度能够影响蒸发、径流、反照率以及陆气间的感热、潜热通量, 在陆气相互作用中起着非常重要的作用, 是水文和气候学研究的核心变量之一. 研究^[1]表明, 就全球范围而言, 土壤湿度的作用仅次于海表温度(SST), 在陆地上的作用甚至还要超过 SST; 据统计^[2], 超过 65% 的陆地降水来自陆地蒸发. 准确的土壤湿度时空分布估计对于天气预报及气候数值模拟研究非常重要.

为了提高人们对于土壤湿度变率的认识, 不少工作利用较为真实的降水数据及其他大气强迫数据驱动陆面模式对土壤湿度场进行模拟估计^[3,4]. 但这

些工作并没有真正地同化观测数据, 并不是传统意义上的数据同化系统.

数据同化, 起源于大气与海洋科学, 能够充分利用观测数据、模式预报以及误差信息尽可能得到模式变量的最优估计. 相对于大气和海洋科学领域中的数据同化研究而言, 陆面和水文数据同化的研究开展较晚. 20 世纪 90 年代后期, 陆面数据同化系统的研究才日益活跃起来, 一些颇受关注的文章陆续发表^[5-10]; 使用“离线”的陆面过程模型同化遥感观测数据也逐渐成为陆面数据同化系统的主要特征. 1998 年, 美国 NASA 哥达德空间飞行中心(GSFC)水文科学部

和数据同化办公室(DAO)联合牵头, 多家单位参与启动陆面同化系统 LDAS(Land Data Assimilation System), 同时开展了全球陆面同化系统(GLDAS)的研究, 期望利用陆面数据同化系统提供全球和区域性的陆面同化数据集. 在这样的陆面数据同化框架之下, 基于陆面模拟、观测技术和分析方法都足够先进的假设, 可以充分利用各种新的卫星及地面观测数据生成最优的陆面状态变量和陆表通量数据. 受北美及全球同化项目的影响, 欧洲陆面数据同化系统(ELDAS, European Land Data Assimilation System to Predict floods and droughts)项目在欧盟的资助下于 2001 年 12 月 1 日正式启动, 将提供欧洲大陆的土壤水分、表面蒸发、径流等数据, 用于促进欧洲洪水和季节性干旱预报研究. 李新等利用集合 Kalman 滤波和 CoLM (Common Land Model)^[11, 12]模型初步搭建了中国陆面数据同化系统(<http://ldas.westgis.ac.cn/>), 实际同化了被动微波遥感观测数据. 在上述工作的推动下, 陆面数据同化成为了一个越来越活跃的研究领域^[13-24]. 在陆面土壤湿度同化中, Kalman 滤波(如扩展 Kalman 滤波^[5](Extended Kalman Filter)和集合 Kalman 滤波^[25](Ensemble Kalman Filter))是被经常采用的优化算法. 在扩展 Kalman 滤波中, 状态变量只能通过非线性系统的一阶线性化进行演变, 容易造成极大的计算误差甚至使得滤波发散. 集合 Kalman 滤波以其精度高、易操作越来越引起研究者的注意, 并被广泛使用.

目前通常使用的陆面过程模式 NCAR/CLM^[26]考虑次网格的变异性以及土壤冻融过程的变化: 次网格的变异性使得同一个模式网格所包含的不同的次网格内的土壤湿度差异很大; 更为重要的是 CLM 模式对于土壤水冻融过程的处理使得土壤湿度的计算实际上分为两步进行, 首先计算土壤液态水分体积含量, 再根据土壤温度过程所计算的能量变化来调整土壤液态/固态水分体积含量, 液态和固态水分含量都是模式的状态变量, 其物理性质有着极大的差异, 而总的土壤湿度(土壤水分体积含量)仅是模式的一个诊断量; 由以上还不难看出, CLM 模式中对于水冰相变的处理还间隔着土壤温度的计算, 相当复杂.

就陆面土壤湿度同化而言, 若对模式次网格变异性及土壤冻融过程的影响不加考虑可能会使得土

壤湿度的同化结果发生偏差, 其主要原因在于: 观测数据通常基于模式网格, 为该模式网格内的平均状态, 直接将基于模式网格上的观测数据等同于任何次网格上的观测信息必然会破坏陆面模式对次网格变异性的考虑; 而模式对于土壤冻融过程的处理也使得将总的土壤湿度(液态和固态水分体积含量之和)作为模式预报变量(状态变量)无法使同化效果直接作用于模式状态变量, 从而使得同化结果发生偏差; 而 CLM 模式中对于冰的处理也增加了同化的难度.

本文将双集合 Kalman 滤波方法应用于土壤湿度的同化, 基于 NCAR/CLM 陆面过程模式建立了一个考虑次网格变异性和土壤冻融过程的土壤湿度同化方案: 在同一个时间步内用状态滤波对模式网格内某片上液态水分含量进行优化, 用参数滤波对该片上的固态水分含量和其他片上的液态/固态水分含量进行优化, 由此考虑模式次网格变异性及土壤冻融过程的影响, 从而实现对整个模式网格上土壤湿度的同化. 初步的同化试验表明: 新的同化方案在有、无土壤冻融阶段的同化效果都要优于一般的不考虑次网格变异性及土壤冻融过程的同化方案; 该同化方案不仅能够提高那些有直接观测信息的土壤层的土壤湿度的模拟精度, 还能在一定程度上改善那些没有任何观测信息的土壤层的模拟效果. 另外, 土壤湿度同化结果的改善还能在一定程度上提高陆面模式对于土壤温度的模拟精度.

1 模型与方法

1.1 通用陆面模式 NCAR/CLM

本研究采用 NCAR(National Center for Atmosphere Research)的陆面模式 Community Land Model version 2.0(CLM2.0)^[26]作为模式平台. CLM 模式为 CoLM^[11, 12]模式的 NCAR 版本, 该模式是上世纪 90 年代中期, 在 Dickinson、戴永久等领导下, 由 NCAR 等几个研究机构共同努力开发出来的第三代陆面过程模型, 是在 LSM^[27]、BATS^[28]、IAP94^[29]等模型的基础上发展而来. 尽管是一个单点模型, CLM 仍然能够通过将一个模式网格分为若干个“片”(fraction)来考虑模式次网格的变异性, 每个“片”上都含有一个特定的陆地覆盖类型: 能量与水分的平衡计算都是在单独的“片”上完成的, 模式不考虑“片”与“片”之间的

相互作用, 整个网格上的水热通量由该网格内所有“片”上的通量按照面积比重加权求和得到. CLM 有一层植被层、10 层厚度不均的土壤层和至多 5 个雪层(依赖于雪的厚度). 目前有大量的工作在改进 NCAR/CLM 的水文模拟方面作出努力, 如文献 [30~32], 这些改进体现在 NCAR/CLM 的最新版本 CLM3.5 里. 与 CLM2.0 相比, CLM3.5 的网格结构也发生了变化, 整个网格上的土壤湿度不再是所有“片”(fraction)上的土壤湿度的面积权重加权平均. 本文选用 CLM2.0 作为同化方案的模式平台就是为了考虑陆面模式次网格的变异性对于同化过程的影响. 本研究中的同化技术可容易地移植到最新的 CLM3.5 中.

模式中计算一维液态水的垂直运动公式为

$$\frac{\partial \theta_{liq}}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} - E - R_{fm}, \quad (1)$$

其中 θ_{liq} 是液态体积含水率(m^3/m^3), q 水分通量($mm\ s^{-1}$), E 是蒸发, R_{fm} 是融化或者结冰率.

水分通量由 Darcy 定律所确定

$$q = -k \frac{\partial(\psi + z)}{\partial z}, \quad (2)$$

其中 k 是水力传导率, ψ 是土壤水势, z 是到地面的垂直距离.

模式中用于土壤水冻结和融化的能量(H_{fm})由下面的公式计算:

$$H_{fm} = C \Delta z \frac{T_{frz} - T_{soi}}{\Delta t}, \quad (3)$$

其中 T_{frz} 是冻结点, T_{soi} 是土壤温度, C 是土壤热容, Δz 、 Δt 分别是土壤层厚和时间步长. CLM2.0 在每个“片”上计算并更新 10 层的液态体积含水率, 根据(3)所计算的水、冰相变能量对液态、固态体积含水率重新调整后利用面积比重加权求和的方式求得整个网格的体积含水率

$$\theta_g = \sum_{j=1}^M a_j (\theta_{liq,j} + \theta_{ice,j}), \quad (4)$$

其中 θ_g 是整个网格上的土壤体积含水率, M 是网格中所含的“片”数, a_j 是每个“片”的面积权重, $\theta_{liq,j}$, $\theta_{ice,j}$ 分别是第 j “片”的液态体积水分含量和固态体积水分含量.

1.2 双集合 Kalman 滤波

双集合 Kalman 滤波方法(Dual Ensemble Kalman Filter)^[19,33]能够利用模式模拟和观测信息对模型状态变量及模型参数同时进行优化, 优化过程在同一个时间步长内分为两部分: 首先利用状态滤波对状态变量进行优化(此时假定模型参数不变); 再利用参数滤波对模型参数进行优化^[19].

(i) 状态滤波. 其主要优化步骤如下^[25]:

1) 状态误差协方差矩阵

(a) 定义集合状态矩阵

$$A = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N) \in R^{n \times N}$$

(b) 定义集合扰动矩阵 $A' = A - \bar{A} = A(I - 1_N)$,

(其中 $\bar{A} = A 1_N$)

(3) 状态误差协方差阵 $P_e = \frac{A'(A')^T}{N-1}$

其中 n 是状态变量的维数, N 是集合样本个数, 矩阵 1_N 中的每一个元素都为 $1/N$.

2) 观测误差协方差阵

给定一个观测 $d \in R^m$, 定义 N 个扰动的观测向量

$$d_j = d + \varepsilon_j, \quad j = 1, \dots, N,$$

$$D = (d_1, d_2, \dots, d_N) \in R^{m \times N};$$

$$E = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N) \in R^{m \times N}$$

$$R_e = \frac{EE^T}{N-1}$$

其中 m 是观测向量的维数.

3) 分析方程

$$A^a = A + P_e H^T (H P_e H^T + R_e)^{-1} (D - HA)$$

H 为观测算子(H 可为非线性, 此时 $HA=H(A)$), 具体的计算过程请参见文献[26].

在我们的同化方案中, 预报模型(用 F 来表示)为(1-2)的离散格式, 其预报变量为网格内每一个“片”的液态体积含水率. 而一般的观测算子的输入变量都是整个网格内的体积含水率(整个网格上液态体积含水率和固态体积含水率), 这就意味着预报与观测模型的输入变量是不一致的. 这个问题将在下一节利用参数滤波进行讨论和处理.

(ii) 参数滤波. 由(4)式对于任意的 i 都有

$$\begin{aligned}\theta_g &= \sum_{j=1, j \neq i}^M a_j (\theta_{liq, j} + \theta_{ice, j}) + a_i (\theta_{liq, i} + \theta_{ice, i}) \\ &= \sum_{j=1, j \neq i}^M a_j (\theta_{liq, j} + \theta_{ice, j}) + a_i \theta_{liq, i} + a_i \theta_{ice, i}\end{aligned}\quad (5)$$

其中 θ_g 为模式预报的整个网格上的土壤水分体积含量, 为简单起见, (5)中所用的变量都省略了时间步数标号 k .

观测算子可写为以下的形式

$$\theta_k^{obs} = H(\theta_{liq, i}, w_k) + \eta_k, \quad (6)$$

其中 θ_k^{obs} 是基于模式网格的观测的土壤湿度, k 是时间步数, 本研究中(6)式的观测算子 H 等价于(5)等式右边项且 w_k 为由 $\theta_{liq, j}^k, \theta_{ice, j}^k, (j=1, \dots, M, j \neq i)$ 及 $\theta_{ice, i}^k$ 组成的向量. 在每一个时间步长内, CLM 在网格内的所有“片”上循环计算, 当同化过程在一个特定的“片”上进行时, 把其他“片”上的液态体积含水率、固定体积含水率以及该片上的固态体积含水率都作为待优化的“拟参数”, 利用参数滤波结合观测信息对这些“拟参数”进行调整和优化.

一般的模式参数和观测算子相耦合的形式为

$$y_k = H(F(x_{k-1}; w_{k-1}), w_k) + \eta_k, \quad (7)$$

其中 η_k 表示过程噪声. 下面按照一般的参数滤波的迭代过程进行优化即可^[20].

2 同化试验

采用文献[34, 35]中的强迫资料作为大气强迫驱动场, 在 Changlin 站(44.25°, 123.97°)进行同化试验(模式网格取为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, 陆面模式根据其所带的高分辨率资料自动地将该格点分为三片: 主要植被、次要植被和裸土), 以检验这个基于双集合 Kalman 滤波同时考虑次网格变异性以及土壤冻融过程的同化方案的同化效果. 之所以选择该站点, 在一定程度上是由于该站点位于中国的东北部, 具有季节性冻融过程, 可考察土壤冻融过程对同化效果的影响. 该站的土壤水分观测数据通过个人交流由中国气象局卫星气象中心得到, 通过加强期观测及数据融合处理而得, 测得的土壤含水量是液态含水量和含冰量的总和, 其观测层次共为 11 层, 顶部两层厚度间隔为 5 cm, 以下各层厚度间隔为 10 cm, 最低层的观测深度

为 100 cm, 为每层平均的土壤湿度, 观测频率为每天一次, 时间跨度为 1991 年 1 月 1 日到 1992 年 12 月 31 日. 试验中只采用顶端四层的土壤湿度观测数据, 只同化土壤上三层的土壤湿度观测数据, 第四层的观测数据作为验证序列, 试验集合样本的个数为 60, 并考虑模式预报有 15% 的误差 (由敏感性试验估算而得), 而观测数据有 5% (经验给定) 的误差波动, 以下将给出同化的结果及相应的分析.

(i) 土壤湿度. 图 1 中给出的是 Changlin 站 1991 年 1 月 1 日到 1992 年 12 月 31 日顶部四层(分别为 0~5, 5~10, 10~20, 20~30 cm)土壤湿度的同化、观测以及直接模拟的时间序列对比结果. 由时间序列的对比可以看出, 相对于一般的不考虑次网格变异性和土壤冻融过程的同化方案(本文采用集合 Kalman 滤波方法, 该同化方案简称为 EnKF 同化方案), 基于双集合 Kalman 滤波方法的同化方案(简称为 DEnKF 同化方案)由于考虑了次网格变异性和土壤冻融过程对同化结果的影响, 其同化效果有了一定程度的提高: 其与观测序列的相关系数(表 1)一般都大于 0.95(顶部三层, 第四层为 0.76); 一般的 EnKF 同化方案的同化结果与观测序列的相关系数都要小于 0.93(第四层为 0.62), 这两种方案的同化结果都要优于直接模拟的结果. 相应地, DEnKF 同化方案的同化结果与观测数据的均方根误差也都小于一般的 EnKF 同化方案的同化结果与观测数据的均方根误差(表 2); 另外从图 1(d)还可以看出, 尽管试验中没有引入第四层的观测数据, 观测信息还是能够通过模式的动力传输以及协相关信息从上面三层中传到第四层(甚至

表 1 Changlin 站模拟、EnKF 与 DEnKF 同化方案同化与观测土壤体积含水率序列(1991-01-01~1992-12-31)的相关系数

	1 st layer	2 nd layer	3 rd layer	4 th layer
Simulation	0.13	0.08	0.09	0.06
EnKF	0.94	0.92	0.90	0.62
DEnKF	0.98	0.96	0.95	0.76

表 2 模拟、EnKF 与 DEnKF 同化方案与观测土壤体积含水率序列(1991-01-01~1992-12-31)的均方根误差

	1 st layer	2 nd layer	3 rd layer	4 th layer
Simulation	0.17	0.13	0.06	0.10
EnKF	6.1E-02	6.3E-02	6.6E-02	0.10
DEnKF	2.9E-02	3.5E-02	3.9E-02	0.08

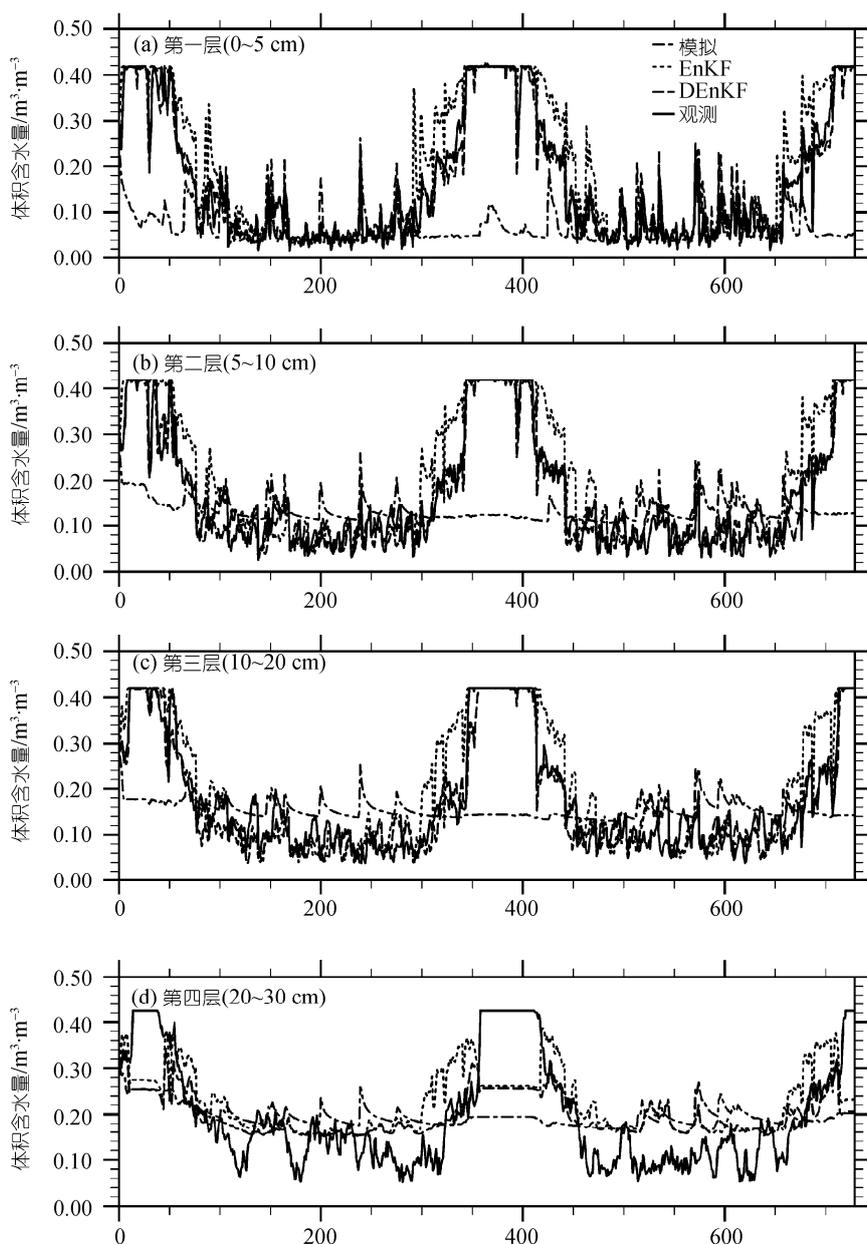


图 1 Changlin 站模拟、观测与同化的土壤体积含水率(m^3/m^3)时间(日)序列(1991-01-01~1992-12-31)

更深的层次),从而使得第四层的土壤湿度的模拟效果同样得到一定程度的改善(DEnKF 同化方案的同化结果与观测的相关系数为 0.76, 远远大于没有任何的同化的直接模拟, 其相关系数仅为 0.06, 而反映在均方根误差上, DEnKF 同化方案的同化结果与观测数据的均方根误差为 0.08, 小于直接模拟的 0.10). 图 2 给出的是该站 6 个模拟日 ((a) 1991/8/18, (b) 1991/10/18, (c) 1991/12/18; (d) 1992/8/18, (e) 1992/10/18, (f) 1992/12/18)的同化(模拟)与观测的土

壤湿度廓线的对比图,可以看出相比于一般的不考虑次网格变异性 and 土壤冻融的 EnKF 同化方案, DEnKF 同化方案不仅能够有土壤冻融的阶段(此阶段, 土壤冰的存在对同化过程产生很大的影响, 图 2(c), (f)显示出优越性, 还能在没有土壤冻融的阶段(此阶段土壤中没有冰的存在, 模式的次网格变异性在起作用, 图 2(a), (d)显示出较好的同化效果, 这意味着是否考虑土壤冻融过程及模式次网格变异性对同化效果的影响重大.

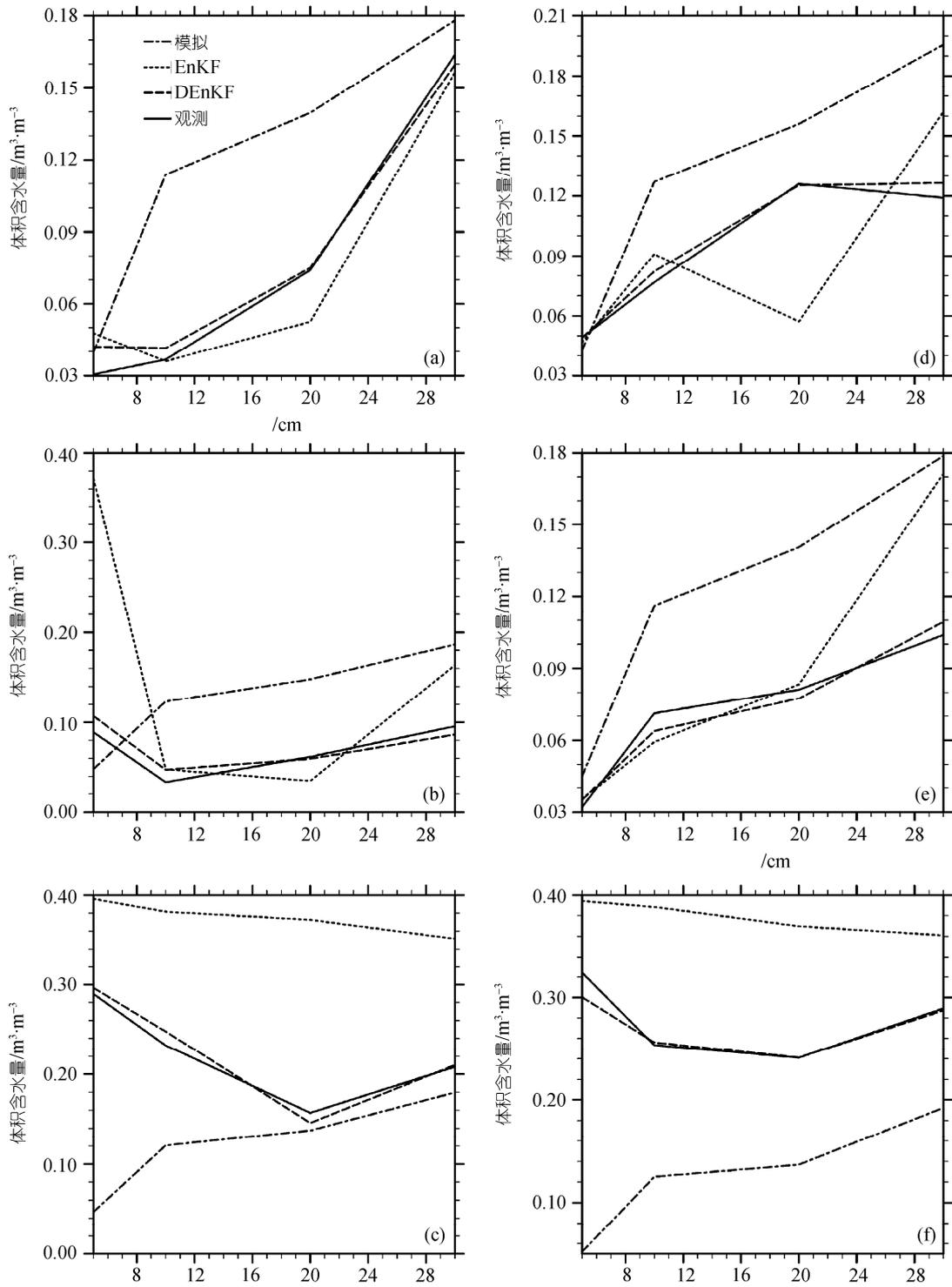


图 2 Changlin 站 6 个模拟日模拟、观测以及同化的土壤湿度廓线的对比

(a) 1991-08-18 顶部四层土壤湿度曲线; (b) 1991-10-18 顶部四层土壤湿度曲线; (c) 1991-12-18 顶部四层土壤湿度曲线; (d) 1992-08-18 顶部四层土壤湿度曲线; (e) 1992-10-18 顶部四层土壤湿度曲线; (f) 1992-12-18 顶部四层土壤湿度曲线

(ii) 土壤温度. 通过上面的分析不难看出, 用 DEnKF 同化方案来考虑次网格变异性以及土壤冻融过程的同化方案的同化效果要优于一般的 EnKF 同化方案, 使得同化后的土壤湿度不尽相同. 土壤湿度的模拟不同必然导致土壤温度模拟结果的差异, 最为明显地, CLM 模式中土壤热容 C_i ($J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$) 依赖于液态水分含量、固态水分含量的计算^[36]:

$$C = C_s(1 - \theta_{sat}) + \frac{w_{ice}}{\Delta z} C_{ice} + \frac{w_{liq}}{\Delta z} C_{liq}, \quad (8)$$

其中 C_s 是固态土壤的热容, C_{liq} 和 C_{ice} 分别是液态水和固态水的热容, θ_{sat} 是饱和土壤湿度, w_{ice} 和 w_{liq} 分别是固态、液态水分含量(质量), Δz 是 CLM 模式中土壤分层厚度. 而土壤热容 C 在计算土壤温度的时候必不可少, 由此可知土壤湿度模拟的不同造成土壤热容的差异, 从而影响到土壤温度的模拟; 另外土壤湿度模拟的不同也会使得蒸散发的计算产生差异也会影响到土壤温度的模拟. 图 3 给出的是 Changlin 站采用以上两种不同的土壤湿度同化方案的陆面模式 CLM 所模拟的月平均的表层土壤温度与直接模拟、观测的表层土壤温度(仅在浅表层, 由中国气象局提供)对比结果, 不难看出由于 DEnKF 同化方案所同化的土壤湿度要优于 EnKF 同化方案的同化结果, 从而使得包

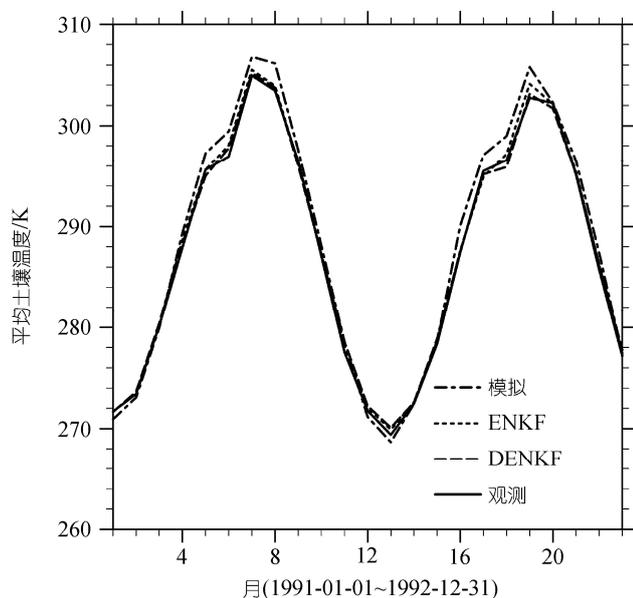


图 3 Changlin 站包含两种不同的土壤湿度同化方案的 CLM 所模拟的月平均表层土壤温度与 CLM 直接模拟、观测的表层土壤温度对比(K)

含 DEnKF 土壤湿度同化方案的 CLM 所模拟的表层土壤温度略好于包含 EnKF 土壤湿度同化方案的 CLM 的模拟结果; 相应的数据分析表明: 采用 DEnKF 同化方案的 CLM 所模拟的表层土壤温度与观测的相关系数为 0.996, 略大于 EnKF 方案的 0.995 和直接模拟的 0.907; 反映在均方根误差上, 采用 DEnKF 同化方案的 CLM 所模拟的表层土壤温度与观测数据的均方根误差为 0.313K, 略小于 EnKF 同化方案的 0.446K 以及直接模拟的 1.48K. 由此可知采用 DEnKF 方案来同时考虑次网格变异性及土壤冻融过程的同化方案的陆面模式是能够通过土壤湿度同化结果的改善在一定程度上提高了模式对于土壤温度的模拟精度, 也显然会影响到陆、气之间的相互作用. 但同时应该注意到本研究中的同化要素仅仅是土壤湿度, 而并没有同时同化土壤温度, 而土壤温度的模拟主要还是取决于陆面模式对于能量过程的参数化.

3 讨论与小结

本文将双集合 Kalman 滤波方法应用于陆面土壤湿度同化以考虑模式次网格变异性 and 土壤冻融过程对同化效果的影响, 发展了陆面土壤湿度同化方案. 初步的同化试验表明: 次网格变异性 and 土壤冻融过程对于土壤湿度同化的影响相当重要, 它不但会影响到土壤湿度的模拟, 还会影响到土壤温度的模拟, 进而影响到陆气之间水热通量的模拟, 其对陆气耦合模式的影响不容忽视且有待研究. 本文所发展的同化方案还有许多需要改进的地方, 主要体现在:

(1) 文中同化试验所使用样本集合个数为 60, 需要进一步探讨集合样本个数对同化效果的影响以及由此带来的计算效率问题.

(2) 同化方案中仅仅同化了土壤湿度的观测资料, 如何同时进行土壤温度的同化及其模式协调问题也有待研究.

(3) 本文仅进行了一个单点的土壤湿度的同化试验, 进行区域以及全球的同化试验以检验该同化方案的适用性也是今后努力的方向之一.

(4) 应该看到本文所发展的同化方案仅仅采用了一个非常简单的观测算子, 而实际应用中, 如何耦合中更为复杂的观测算子以引入多渠道的观测资料也是今后必须面对的问题.

致谢 非常感谢两位匿名审稿人所提出极具建设性的评审意见.

参考文献

- 1 U S National Research Council, GOALS (Global Ocean- Atmosphere-Land System for) Predicting Seasonal-to-International Climate. Washington D C: National Academy Press, 1994, 103
- 2 Chahine T M. The hydrological cycle and its influence on climate. *Nature*, 1992, 29359: 373—380
- 3 Dirmeyer P A, Dolman A J, Sato N. The Global Soil Wetness Project: A pilot project for global land surface modeling and validation. *Bull Amer Meteor Soc*, 1999, 80: 851—878
- 4 Mitchell K E, Lohmann D, Houser P R, et al. The multi-institution North American Land Data Assimilation System (NLDAS): Utilizing multiple GCIP products and partners in a continental distributed hydrological modeling system. *J Geophys Res*, 2004, 109, D07S90, doi:10.1029/2003JD003823
- 5 Entekhabi D, Galantowicz J F, Njoku E G, Solving the inverse problem for soil moisture and temperature profiles by sequential assimilation of multi frequency remotely sensed observation. *IEEE Trans Geosci Rem Sen*, 1994, 32(2): 438—448
- 6 Houser P R, Shuttleworth W J, Famiglietti J S, et al. Integration of soil moisture remote sensing and hydrologic modeling using data assimilation. *Water Resour Res*, 1998, 34(12): 3405—4320
- 7 Hoeben R, Troch P A. Assimilation of active microwave observation data for soil moisture profile estimation. *Water Resour Res*, 2000, 36(10): 2805—2819
- 8 Shuttleworth W J. Combing remotely sensed data using aggregation algorithms, *Hydrol Earth Syst Sci*, 1998, 2(2/3): 149—158
- 9 Galantowicz J F, Entekhabi D, Njoku E G. Test of sequential data assimilation for retrieving profile soil moisture and temperature from observed L-band radio-brightness. *IEEE Transa Geosci Rem Sen*, 1999, 37(4): 1860—1870
- 10 Duan Q, Guptda V K, Sorooshian S. A shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization, *J Opt Theory App*, 1993, 76, 501—521
- 11 Dai Y. The common land model (CoLM): Technical description and User's guide, 2001, 69
- 12 Dai Y, Zeng X B, Dickinson E, et al. The common land model, *Am Meteorol Society*, 2003, August, 1013—1023
- 13 Li X, Koike T, Mahadevan P. A very fast simulated re-annealing (VFSA) approach for land data assimilation. *Comput Geosci*, 2004, 30: 239—248
- 14 Li X, Huang C L, Che T, Jin, et al. Development of a Chinese land data assimilation system: Its progress and prospects. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(8): 881—892
- 15 李新, 车涛. 积雪被动微波遥感研究进展. *冰川冻土*, 2007, 29(3): 487—496
- 16 Yang K, Takahiro WATANABE, Toshio KOIKE, et al. Auto-calibration system developed to assimilate AMSR-E data into a land surface model for estimating soil moisture and the surface energy budget. *J Meteorol Soc Japan*, 2007, 85A, 229—242
- 17 Crosson W L, Laymon C A. Assimilating remote sensing data in a surface flux-soil moisture model. *Hydrol Proces*, 2002, 16:1645—1662
- 18 Lakshmi V. A simple surface temperature assimilation scheme for use in land surface models. *Water Resour Res*, 2000, 36(12): 3687—3700
- 19 De Lannoy G J M, Houser P R, Pauwels V R N, et al. State and bias estimation for soil moisture profiles by an ensemble Kalman filter: Effect of assimilation depth and frequency. *Water Resour Res*, 2007, 43, W06401, doi:10/1029/2006WR005100
- 20 Zhang S W, Li H R, Zhang W D, et al. Estimating soil moisture profile by assimilation of near-surface observations with the ensemble Kalman filter (EnKF). *Adv Atmos Sci*, 2005, 22: 936—945
- 21 Zhang S W, Zhang W D, Qiu C J, Retrieving the soil moisture profile by assimilating near-surface observations: A comparison of two retrieval algorithms, 4th WMO International Symposium on Assimilation of Observations in Meteorology and Oceanography, Prague, Czech Republic, 2005
- 22 Zhang S W, Qiu C J, Xu Q, Estimating soil water contents from soil temperature measurements by using adaptive Kalman Filter. *J Appl Meteor*, 2004, 43, 379—389
- 23 Zhang S W, Qiu C J, Zhang W D, Estimating heat fluxes by merging profile formulae and energy budget with a variational technique. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21, 627—636

- 24 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(12): 1350—1362
- 25 Evensen G. The ensemble kalman filter: theoretical formulation and practical implementation. *Ocean Dyn*, 2003, 53: 343—367
- 26 Bonan G B, Oleson K W, Vertenstein S M, et al. The land surface climatology of the Community Land Model coupled to the NCAR Community Climate Model. *J Climate*, 2002, 15: 3123—3139
- 27 Bonan G B. A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrologic bonan1996a, and atmospheric studies: technical description and user's guide. NCAR Technical Note NCAR/TN-417+STR. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 1996 150
- 28 Dickison R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model, NCAR Technical Note TN-387+STR, 1993, August, 1993. 72
- 29 Dai Y J, Zeng Q C. A land-surface mode (IAP94) for climate study, Part I: Formulation and validation in off-line experiments. *Adv Atmos Sci*, 1997, 14(4): 433—460
- 30 Niu G Y, Yang Z L. Effects of frozen soil on snowmelt runoff and soil water storage at a continental scale. *J Hydrometeorol*, 2006, 7 (5): 937—952
- 31 Niu G Y, Yang Z L, Dickinson R E, et al. Development of a simple groundwater model for use in climate models and evaluation with GRACE data. *J Geophys Res*, 2007, 112, D07103, doi:10.1029/2006JD007522
- 32 Niu G Y, Yang Z L, Dickinson R E, et al. A simple TOPMODEL-based runoff parameterization (SIMTOP) for use in GCMs. *J Geophys Res*, 2005, 110: D21106, doi:10.1029/2005JD006111
- 33 Hamid Moradkhani, Soroosh Sorooshian, Hoshin V Gupta, et al. Dual state-parameter estimation of hydrological models using Kalman filter. *Adv Water Resour*, 2005, 28, 135—147
- 34 Qian T, Dai A, Trenberth K E, et al. Oleson, Simulation of global land surface conditions from 1948 to 2004. Part I: Forcing data and evaluations. *J Hydromet*. 2006, 7: 953—975
- 35 Tian X, Dai A, Yang D, et al. Effects of precipitation-bias corrections on surface hydrology over northern latitudes. *J Geophys Res.*, 2007, 112, D14101, doi: 10. 029/2007JD008420
- 36 De Vries D A. Thermal properties of soils. *Physics of the Plant Environment*. van Wijk W R, ed. New York: North-Holland, 1963. 210—235