

中国陆面数据同化系统研究的进展与前瞻*

李新** 黄春林 车涛 晋锐 王书功 王介民 高峰
张述文 邱崇践 王澄海

1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; 2. 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

摘要 陆面数据同化的核心思想是在陆面过程模型的动力框架内, 融合不同来源和不同分辨率的直接与间接观测, 准确一致地估计地表水分和能量循环的各个分量. 作者已初步建立了中国陆面数据同化系统; 同化方法采用了集合 Kalman 滤波, 模型算子使用 CoLM 和 SiB2 等陆面过程模型, 观测算子采用针对土壤(包括融化和冻结)、积雪等不同地表状态的微波辐射传输模型. 该系统同化被动微波遥感观测如 SSM/I, TMI 和 AMSR 以及土壤和积雪的常规观测, 已计算得到中国西北干旱区和青藏高原的土壤水分、土壤温度、积雪和冻土的同化资料. 文中阐述了在同化系统的构建、同化算法的研究、陆面过程模型和微波辐射传输模型的集成以及大气驱动数据制备等方面的进展, 讨论了陆面数据同化的特点和面临的问题, 展望了未来的研究重点和同化方法在陆地表层系统科学研究中的应用前景.

关键词 陆面数据同化 陆面过程 被动微波遥感 Kalman 滤波

研究大尺度和流域尺度的水分和能量循环, 获取完备的地球表层系统的时空信息, 都离不开模型模拟和观测这两种基本手段. 它们有着各自的优势, 模型模拟的优势在于依靠其内在的物理过程和动力学机制, 可以给出所模拟对象在时间和空间上的连续演进; 而观测的优势在于能得到所测量对象在观测时刻和所代表的空间上的“真值”.

由于几乎所有地表变量在时间、空间上都具有高度的异质性, 导致对它们的模拟和观测都具有很大的不确定性. 从模型方面而言, 现有的全球和区域气候模式以及陆面过程模型通常都包含了复杂的陆面过程参数化方案, 但是, 这些模型对陆面状况的模拟精度依然较差. 例如, 在全球土壤湿度项目(GSWP)^[1]中, 研究人员利用 SiB2, SSiB, BATS, NOAA/NCEP ETA 等 10 个具有代表性的陆面过程模型模拟全球水分, 以期得到 1987—

1988 两年的全球土壤水分数据集. 但是他们总结出: “没有一个模型, 在任何一个地区精确地模拟了土壤水分值”^[1]. 这一方面固然源于现有的模型还远未臻完美, 各种物理过程和参数化方案还有待改进; 另一方面也是因为我们很难确定某一特定地区陆面状况的初始值和水、热、植物生理、生物物理参数值. 从观测方面而言, 尽管近年来加强了对地表能量和水分循环的观测, 例如, GEWEX 的 CEOP 计划协调了全球 36 个观测区域, 将布设在这些地区的通量以及土壤水分和温度观测数据统一建库和分析^[2], 但是, 直接利用这些数据通过客观分析高分辨率地重建全球和区域的能水循环依然十分困难, 主要原因是这些变量的空间变异非常强烈, 加强的观测网相对于高度的空间异质性而言, 依然显得稀少而薄弱. 近年来, 大量遥感数据被广泛地应用于反演地表变

2006-03-14 收稿, 2006-07-06 收修改稿

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2001CB309404)和国家自然科学基金(批准号: 90202014)资助项目

** E-mail: lixin@lzb.ac.cn

1) 所有英文缩略词见缩略词检索表

量¹⁾，弥补了常规观测在数量上的不足。但是，如果仅仅依靠遥感观测也无法完整和连续地表达地表过程的时空演进信息。这主要是因为：

(1) 遥感观测获得的都是瞬时值，而地表过程无论在时间还是空间上都是连续的，因此需要借助于模型，把瞬时观测“转化”为具有时空一致性的数据集。

(2) 遥感观测(如亮度温度)和地表水文变量之间的关系是隐含的，因此观测是间接的。一般来说，我们可以显式地建立地表变量和卫星观测值(如亮温)之间的正向模型，但是，由于观测量往往少于要反演的复杂地表变量，而正向模型通常又是十分复杂的非线性模型，导致反演十分困难或即使微小误差也会导致“病态”反演。反演中往往需要增加许多先验信息的约束，以提高反演的可能性并增加反演精度。陆面过程模型和分布式水文模型，作为反演中的一种物理约束，可以起到先验信息的作用。

(3) 遥感一般无法观测浅层地表以下的信息。例如，对于湿润土壤，微波遥感能探测表层几厘米的水分含量，但对于根区和深层土壤水分则无能为力，而这对于水文过程也是重要的。

(4) 观测存在误差，误差既来源于仪器的偏差，也来源于对所观测的空间复杂异质的代表性。

因此，模型模拟和观测的相互结合十分重要。我们设想，如果能够利用陆面过程模型来约束遥感反演模型；能够利用遥感数据来调整模型的运行轨迹，使积累的误差得到“释放”；能够最大限度地利用不同来源、不同空间和时间分辨率的观测数据，并将它们有机地融合；我们就可以获得更高分辨率、具有物理一致性和时空一致性的数据，就能更好地表达各种时空尺度上的水分和能量循环。陆面数据同化方法的出现和渐趋实用化，为我们达到这一目标提供了一条可行的途径。

陆面数据同化的核心思想是在陆面过程模型的动力框架内，融合不同来源和不同分辨率的直接与间接观测，将陆面过程模型和各种观测算子(如辐射传输模型)集成为不断地依靠观测而自动调整模

型轨迹，并且减小误差的预报系统。其理论、概念和方法来源于大气和海洋科学，在数学上主要借助于估计理论、控制论、优化方法和误差估计理论^[3, 4]。陆面数据同化起步于20世纪90年代末期^[5]，在吸收了大气数据同化和海洋数据同化丰富素养的基础上正在快速发展，早期的工作包括在陆面过程模型的约束下从被动微波遥感数据反演地表水分^[6, 7]，对已有的各种同化方法的分析比较^[8, 9]。近年来，陆面数据同化已日趋成为陆面过程和水文研究中的热点和前沿，其发展阶段已经迅速跨过了幼年期，显现出它不同于大气和海洋同化的特征，在理论和方法的探索、实用同化系统的建立等方面都取得了重要的进展^[10-14]。最具代表性的事件是几个大区域同化系统的建立，包括：北美陆面数据同化系统(NLDAS)和全球陆面数据同化系统(GLDAS)^[15, 16]，欧洲陆面数据同化系统(ELDAS)^[17]，以及中国陆面数据同化系统。对于陆面数据同化研究的详细综述可参考文献^[18, 19]。

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所和兰州大学大气科学学院正在承担中国陆面数据同化系统的研究和开发。其目标是：建立中国陆面数据同化系统，使用陆面过程模型和分布式水文模型同化被动微波遥感观测资料SSM/I、TMI和AMSR，获得1991年以来高分辨率的中国西北干旱区和青藏高原土壤水分、土壤温度、积雪和冻土的同化资料，为研究大尺度和流域尺度的水循环提供具有时空和物理一致性的数据；促进陆面过程、微波遥感、同化算法的基础研究。目前，中国陆面数据同化系统已经初步建成，长序列数据集的计算和同化结果的验证工作也正在进行中。本文论述我们在同化系统的构建、同化算法的研究、陆面过程模型和微波辐射传输模型的集成，以及大气驱动数据的制备方面的进展，讨论陆面数据同化的特点和面临的问题，进而展望未来的研究重点和同化方法在陆地表层系统科学研究中的应用前景。

1 研究进展

中国陆面数据同化系统主要由4个模块组成，

1) 在陆面过程模拟中，一般将变量和参数加以严格区分，变量指随时间而变化的模型状态，参数一般指不随时间变化的输入。在遥感领域内，则一般把反演的量都称为参数。由于在同化系统中，遥感反演“参数”都是同化系统的状态变量，故此处统一称为变量

它们是：陆面过程模型、观测算子(辐射传输模型和客观分析方法)、同化方法、数据. 系统的总体框架见图 1. 我们首先介绍系统的流程.

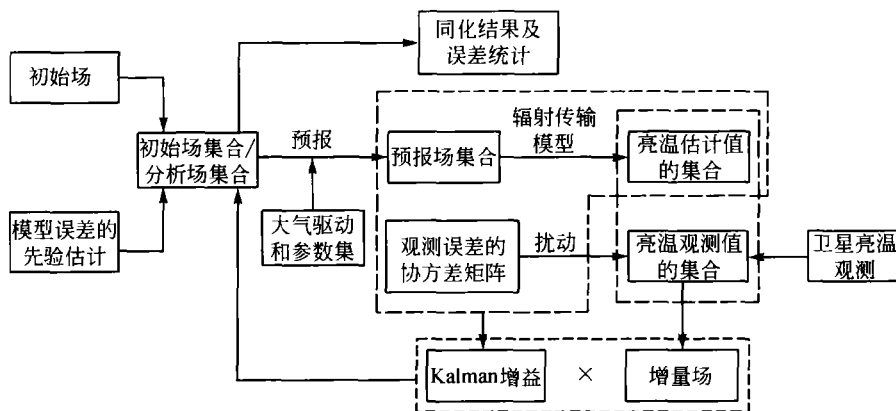


图 1 中国陆面数据同化系统的框架

(1) 采用大气同化系统对 NCEP 再分析资料做降尺度处理, 产生时间分辨率为 1h, 空间分辨率为 0.25° 的驱动数据, 采用“离线”方式驱动陆面过程模型. 从遥感资料, 如逐月的 MODIS 叶面积数据获取动态的生物物理参数, 从植被图和土壤质地类型图计算植物的形态和生理参数以及水热参数.

(2) 初始化模型, 然后根据给定的概率分布(一般假定为多维正态分布)产生一组(称为一个集合)模型状态变量的随机矢量, 用它们对模型初始场进行扰动, 生成初始场的集合.

(3) 在给定初始场、参数和边界条件(大气驱动)之后, 模型前向积分, 计算得到每一个步长的预报结果, 直至有下一个观测.

(4) 当有观测时, 采用辐射传输模型或其他观测算子将模型预报结果的集合“转换”为观测量估计值的集合. 在中国陆面数据同化系统中, 由于我们所关注的地表状态主要为土壤水分和温度、积雪等水文变量, 因此采用了对这些量很敏感的被动微波观测.

(5) 根据给定的概率分布产生一组期望值为 0, 协方差为给定的先验观测误差的随机矢量, 用它们对真实的卫星遥感亮温观测进行扰动, 产生亮温观测值的集合.

(6) 从估计值和真实观测值的集合计算得到增量场, 根据对集合中样本的误差统计计算出 Kal-

man 增益. 两者相乘, 作为预报结果的更新量.

(7) 将更新量加到初始场, 得到分析场的集合. 从分析场集合的统计量得到同化结果(一般为期望等一阶矩)和分析误差(协方差矩阵等二阶矩). 重新初始化模型, 进入下一个同化周期.

1.1 同化算法

中国陆面数据同化系统实用版本中采用的同化方法是集合 Kalman 滤波, 这种方法是 90 年代中期由 Evensen 提出的一种 Monte Carlo 滤波方法^[20], 它的优点是可以直接使用非线性的模型和观测算子, 不需要对原模型做线性化处理, 也不需要发展模型的伴随, 因此可以保持模型中的所有动力学特征; 误差随模型推进而演进; 另外, 当集合数目不是很大时, 它的计算效率和变分方法也相距不远. 因此, 经过多次改进后^[21-24], 它在陆面、大气和海洋同化中都得到了重视和应用^[23, 25].

在中国陆面数据同化系统的研究工作中, 我们在同化方法研究方面围绕(i) 处理模型的非线性和不连续性; (ii) 误差估计; (iii) 提高效率; (iv) 发展新方法而展开. 主要进展归纳为:

(1) 设计和试验了各种主要的集合 Kalman 滤波方法, 利用正向模型模拟生成的“理想”数据对各类集合 Kalman 滤波同化方案进行了比较和验证, 研究了初始误差、模型误差和观测误差对反演速度的影响, 评估了非线性效应影响, 发展了具有指定

协方差形式的大量正态分布随机扰动场产生方法^[26]。

(2) 开展集合 Kalman 滤波同化卫星观测资料的大量实验, 成功地将被动微波遥感数据—包括 TMI, AMSR-E 和 SSM/I 资料同化到陆面过程模拟结果中^[27-30]。图 2 是一个利用 SiB 模型同化 AMSR-E 观测的实例。结果表明: (i) 同化被动微波遥感观测能够显著地改善对于地表水文变量的估计, 纠正各种因素可能导致的显著偏差。当驱动数据(特别是降水数据)有显著的偏差时, 同化结果明显地好于单纯的模拟结果。(ii) 同化效果与陆面过程模型有直接关系, 表层土壤水分变化幅度大, 导致对同化结果的扰动也比较大, 在个别时刻同化结果反

而不如模拟结果。根区与表层相比变化幅度较小, 同化效果显著。在深层, 土壤水分变化幅度很小, 同化效果非常显著。(iii) 观测算子的质量对于同化结果有本质的影响, 辐射传输模型中的敏感参数影响尤大, 例如在土壤水分的估计中粗糙度参数对于反演质量起着关键的作用, 因此, 应发展同步同化模型状态变量和优化参数的方法。(iv) 土壤水分的单点实测资料和像元尺度上的反演(同化)结果相比较, 同化结果在统计上是无偏的, 两者的时间序列的变化趋势也非常一致。但方差较大, 这可能是因为同化结果是大尺度的, 反映了像元上的平均状况, 而单点观测只代表局地的尺度。

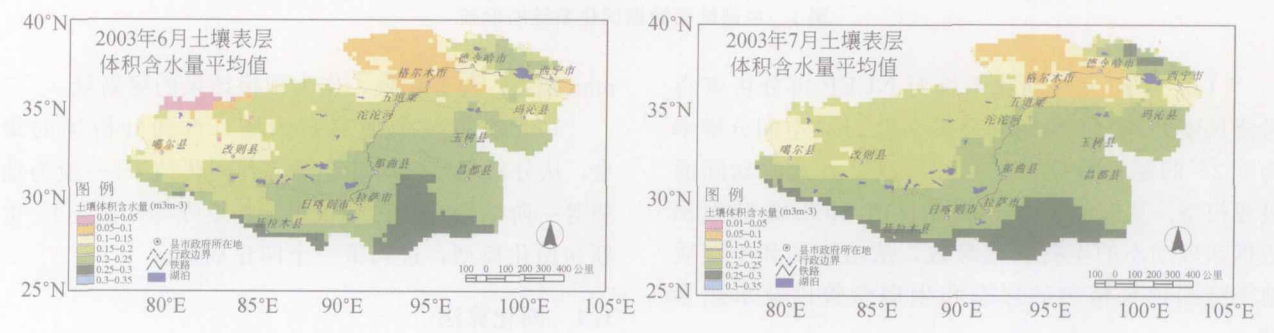


图 2 青藏高原土壤水分同化结果

时间: 2003 年 6 月—7 月; 使用模型: JMA SiB; 观测数据: AMSR-E 6.92 GHz 和 10.65 GHz 垂直及水平极化亮度温度

(3) 基于模拟退火法的数据同化方法是我们独立发展的一种连续同化方法。它也是一种 Monte Carlo 优化方法, 具有独立于模型算子和观测算子的特点, 因此不需要发展模型的伴随, 也不需要模型做线性化处理, 可以高保真地再现模型中的所有动态过程。我们发展了基于模拟退火法的实验型同化系统, 并且使用 GAME-Tibet 和 SMEX02 实验中的土壤水分观测实施了单点和区域实验, 成功地将土壤水分观测同化到陆面过程模型 SiB2 中^[31-33]。

研究发现, 当模型预测和观测算子都有显著的系统性偏差时, 如果不对这些偏差加以纠正, 即使是同化系统中考虑了误差估计, 也不可能正确的估计土壤水分廓线。模拟退火法的缺点是效率偏低, 因此不适用于发展实用的同化系统, 以获取长序列大区域的同化数据。但是, 其效率还有显著改善的余地, 特别是精心设计的收敛准则, 可能会大大提

高算法效率, 因此, 模拟退火法在连续同化方法的领域可能依然是一种有潜力的方法。

(4) 在发展和应用其他同化方法方面, 我们也开展了一些数值试验。例如利用自适应 Kalman 滤波从土壤温度观测中反估土壤水分廓线, 由于土壤热传导率是水分的函数, 因此如果能够准确估计出误差矩阵, 就可能从温度廓线观测中反估出水分廓线^[34]。由于土壤温度相对来说较易观测, 所费不高, 因此这一方法具有潜在的重要应用价值。伴随模型是另外一种重要的高效率数据同化方法, 我们在这一方面也做了一些理论探讨^[35, 36], 并且正在尝试发展 CoLM 和 SiB2 的伴随模型。

1.2 陆面过程模拟和陆面过程模型的改进

在我们发展的中国陆面数据同化系统的实用版本中, 采用了目前被广泛认可的新一代陆面过程模型 CoLM。在各种实验测试中, 也广泛使用了 SiB2。

CoLM是在汲取了BATS、中国科学院大气物理研究所陆面过程模型和NCAR陆面过程模型LSM精华的基础上,采众家之长而发展的新一代的陆面过程模型^[37]。CoLM具有以下突出的特点:考虑了网格内的异质性,一个网格内的植被类型可以为任意多种,通量等计算根据各类型所占面积比例线性加权后得出;对积雪和冻融过程描述完整,这对于寒区和干旱区的陆面过程模拟和同化是至关重要的;耦合了汇流过程;添加了能够更加准确地反映植物光合作用和气孔导度的二叶模型^[38]。

在发展中国陆面数据同化系统的过程中,我们对CoLM中的冻土过程做了进一步验证,利用这一模型进行了青藏高原和西部干旱区大尺度陆面过程特征的分析,研究了干旱区地表能量收支和水汽输送特征。在技术集成方面,深入分析了CoLM模型的结构与代码,完成了它与集合Kalman滤波、各种地表类型的辐射传输模型以及驱动数据和参数集的集成耦合工作。

SiB2是另一个优秀的陆面过程模型^[39]。它在地表能量和水分平衡模拟方面性能卓越,因此许多气候中心的业务模型都使用SiB2作为其陆面过程模型。由于在青藏高原地区,冻融过程起着非常重要的作用,陆面过程模型中如果缺少冻土参数化,就会导致在冬季显著低估水分,并且带来能量和水量分配上的偏差^[40]。因此,我们在SiB2模型中增加了冻土参数化子模型^[41],其中在水分平衡模型方面,修改了水分平衡控制方程以包含冻融过程,使用由试验结果得到的幂函数表达未冻结水含量,根据土壤冻结状况计算各土层之间的水分交换和水力传导系数。在热模型方面,修改了表层有效热容

的计算公式以包含融化潜热项,用Stefan近似解计算冻融深度随时间的变化。我们利用青藏高原地区的土壤水分和温度观测资料验证了模型,证明这一参数化方案可以准确地模拟相变过程,土壤含水量和含冰量以及冻融深度。

参数在陆面过程模型的模拟行为中扮演着重要角色。陆面模拟的效果不仅取决于模型的物理机制、初始化和驱动数据的质量,也取决于参数的代表性和准确性。我们开展了利用现代优化算法标定分布式水文模型和陆面过程模型参数的研究,实现了洗牌复形演化算法(SCE)粒子群优化(PSO)算法,并在这两者基础上提出了一个以PSO算法为核心,以SCE算法为总体框架,并辅以基因算法操作的混合式并行优化算法“SCE-PSO”^[42]。该算法经过测试,性能优于SCE算法。下一步将把参数估计算法引入到同化系统中,发展同步优化参数和同化状态变量的混合式同化系统。

1.3 地表水文变量的被动微波遥感

在中国陆面数据同化系统中,被同化的观测数据主要是对陆面水文变量的间接观测,即多波段、多极化的被动微波遥感数据,目前所使用的数据有SSM/I, TMI和AMSR-E。

在兼顾模型性能和同化系统运行效率的基础上,我们确定了针对土壤、冻土、积雪和植被4种状态的微波辐射传输模型(表1)。其中,对于有积雪的地表,当模拟的积雪厚度大于2cm时,采用积雪的辐射传输模型,反之采用冻土/融土的辐射传输模型。各地表类型的微波辐射传输模型都已经与CoLM耦合,被成功地集成到陆面数据同化系统中。

表1 中国陆面数据同化系统实用版本中使用的辐射传输模型和被动微波遥感数据

地表类型	模型	同化的观测数据/GHz	
		SSM/I	AMSR-E
土壤	Q/h	19.35V, 19.35H	6.92V, 6.92H, 10.65V, 10.65H, 18.7V, 18.7H
冻土	Liou ^[49] +Q/h	19.35V, 19.35H	6.92V, 6.92H, 10.65V, 10.65H, 18.7V, 18.7H
雪	MEMLS	19.35V, 19.35H, 37.0V, 37.0H	18.7V, 18.7H, 23.8V, 23.8H, 36.5V, 36.5H
植被	一个0级的辐射传输模型。当叶面积指数>1.5时,不同化。		

土壤的微波辐射传输模型使用了AIEM和Q/h模型,前者是对IEM^[43, 44]的进一步改进^[45],主要在实验型系统中采用^[29];后者虽然经验性较强,但

计算效率非常高,因此在实用型系统中采用。在Q/h模型中,经验性参数“有效粗糙度”的确定是至关重要的,它们和可测量参数——包括粗糙度高

度方差、粗糙度相关长度和相关函数类型的关系虽有很多研究^[46-48],但仍然存在许多不确定性,因此,在实际应用中,“有效粗糙度”必须通过标定而获得.否则,它们的误差会造成同化结果的显著偏差.

土壤的冻融是青藏高原和其他寒冷地区的重要陆面过程,同化地表的冻融状态也是一个全新的挑战.

对于表面冻结的土壤的辐射传输,我们采用了一个考虑了土壤冻融的陆面过程/辐射亮温耦合模型^[49],并将它应用于同化系统,其中陆面过程模型的预报变量,如土壤液态含水量、含冰量、土壤温度和植被含水量被用于计算亮度温度.同化结果表明,这一方案能够较好地估计土壤水分的相态变化.同时,为了更好地地区分地表冻融状态,我们通过理论分析和大量实验,发展了一个判别地表冻融的新算法,计算得到了一个完整年度的全国地表冻融状态和冻融天数.和 GAME-Tibet 的浅层土壤温度观测以及气象台站的土壤冻融观测资料的比较结果表明,其分类精度达到了 92%.

积雪是密集冰晶粒子随机介质^[48],积雪的散射与辐射传输模型目前采用了 MEMLS^[50],用六流近似描述雪层内的多次散射和吸收过程,同时考虑了各雪层之间的界面散射.模型中的散射系数是基于测量数据用雪密度进行参数化获得,而吸收系数、有效介电常数、折射率和反射率根据物理模型和冰晶介电特性计算得到.模型中的散射系数是根据微波散射/辐射特性与雪密度测量结果拟合的函数,难以适用于所有地区的积雪辐射模拟,为此,Matzler 对 MEMLS 进行了扩展,经过扩展以后的模型用 Born 近似来计算散射系数^[51].该模型的优点在于对积雪的层数没有限制,频率范围较宽,而且计算速度非常快,因此,非常适合于被作为观测算子应用于陆面数据同化系统.

在长序列积雪深度和雪水当量的反演方面,我们在比较了不同的积雪辐射传输模型,并在和台站数据对比的基础上,建立了积雪反演算法^[52],获取了长序列的中国全境积雪数据产品^[53,54],近期又计算得到了自有被动微波遥感观测以来(1978—2005) 27 年的长序列雪深和雪水当量数据集.这些数据可望成为我国积雪水文和积雪气候研究的重要数据基

础.

1.4 陆面过程模型驱动数据

陆面过程模型需要近地面的气温、风速、比湿、辐射、降水等资料作为驱动,驱动数据的质量也是决定同化效果的关键因素之一.在观测稀少、地表状况复杂的地区,利用观测资料通过客观分析直接得到驱动场是不现实的.因此,目前陆面数据同化系统多采用两种替代方法制备驱动数据,一是直接使用再分析资料和部分卫星数据产品,当驱动和模拟模型的分辨率不匹配时(例如 NCEP 再分析资料的水平分辨率为 1° 、时间分辨率为 6 h),一般对它们做技术性的插值,但这种插值并没有在实质上增加驱动数据的信息.第二种方法是,采用数值模型的模拟结果,它可以得到所要求的高分辨率资料,但模拟误差往往较大.

在中国陆面数据同化系统中,我们采用 Newton 松弛方法发展了一个大气同化系统,利用中尺度大气模型 MM5 对再分析资料进行动力降尺度处理,从而将再分析资料和模型模拟结果结合起来,获得了更高空间和时间分辨率的驱动数据.采用的具体方案是,将 Newton 松弛项加入到风、温度和水汽的诊断方程中,这些项使模拟结果缓慢地向一个格点分析逼近.由于再分析资料在青藏高原地区低层误差较大,因此,选择适当的松弛系数,使得高层不断逼近再分析资料,近地层更多地由模型模拟得到.

大气同化系统给出了近地面的大气分析场作为同化系统的驱动数据集,包括 10 m 风速风向、2 m 气温、2 m 混合比湿、表面压强、上行下行短波和长波辐射、对流降水和大尺度降水.驱动数据的空间分辨率为 0.25° ,时间分辨率为 1 h.验证结果表明,同化后的再分析资料明显优于客观分析结果和 MM5 模拟结果.

2 陆面数据同化存在的问题

21 世纪以来,国际上已先后建立了北美陆面数据同化系统^[15,16]和欧洲陆面数据同化系统^[17],中国陆面数据同化也已由我们初步建成(本文).总结我们自己的经验,同时回顾国际上的进展,我们认为,陆面数据同化已成长为一个崭新和生气勃勃的

领域,将在各种尺度的陆面和水文模拟与再分析中发挥重要作用.陆面数据同化也已经显现出不同于大气和海洋同化的特征.以下我们尝试分析这些特征以及陆面数据同化所面临的问题,作为我们今后工作的方向.

(1) 初值问题还是边界值问题

大气模拟常常被认为是初值问题,大气数据同化因此也以优化初始场为目标.陆面数据同化的方法来源于大气科学领域,因此,就自然地接受了“优化初值”作为陆面数据同化的目标.但是,与大气模拟相比,陆面过程模拟显然不仅仅是初值问题,尽管初值对于模拟结果的好坏依然起着关键作用,但同时,边界条件和参数对系统行为的影响也绝不可忽视,有时候,它们的作用甚至超过了初值.研究人员逐渐认识到,在陆面同化系统优化状态变量的同时,在系统中引入驱动和参数的不确定性,也应该成为陆面数据同化的目标.例如,Reichle等的研究表明,利用他们发展的变分同化系统可以反估降水驱动中的误差^[55].Moradkhani等也发展了利用集合Kalman滤波同步估计水文模型的状态变量和参数的方法^[56].

(2) 同化什么样的观测量

由于常规观测十分有限,且代表性不强,遥感就成为陆面数据同化系统中的主要观测来源.遥感都是间接观测,在同化系统中需要通过“正向”模型把要反演的变量转换为观测量.一般来说,在陆面数据同化系统中常用的微波辐射传输模型,不管是物理模型还是经验模型,在理想实验中一般都可以取得较高的精度,但在面对地表丰富的异质性时,却表现出较大的偏差.出现这种偏差的原因可能与模型忽略了重要的过程、被动微波遥感的分辨率太粗、正向模型对地表异质性的描述能力不够、以及陆面过程模型中的输出变量并不能完全代表辐射传输模型中的输入(依赖于可感深度)等因素都有关系.因此,要发展可靠的同化系统,就必须发展更成熟的、简单而又有效的模型算子.同时,应该针对不同的被同化变量,审慎地回答以下问题,即:是直接同化亮温还是同化亮温的变换(如极化比、亮温梯度等)?同化哪些波段,哪些极化的亮温?是否应该同化可靠的独立反演产品?是否应该同化亮温时间序列信息(例如对亮温时间序列的

Fourier变换)?另外,发展消除微波波段大气影响和植被影响的方法,以及综合利用微波、红外和可见光信息,可能都是增加陆面数据同化系统中遥感观测的可靠性的重要途径.

(3) 同化系统的稳定性

集合Kalman滤波在陆面数据同化领域取得了很大的成功,但由集合Kalman滤波所产生的分析结果却有两个潜在的弱点.其一,分析值并未受到模型的强约束,因此,将它们作为模型的另一次初始场带入到模型后,可能会导致模型不能收敛,并产生计算上的奇异值.其二,由于驱动和地表变量分别由独立的两套系统产生,而通量计算往往依赖于两者的差值,因此,当分析结果偏离模拟结果较远时,可能会导致通量计算产生较大的偏差,甚至物理上不实际的结果.因此,发展稳健的、能够自动纠错的、物理约束更强的同化系统是十分重要的.在这方面,变分和集合Kalman滤波同化方法的结合应该是重要的方向.

(4) 误差的空间自相关问题

由于陆面过程模拟大多是一维的,因此,陆面数据同化系统中的误差协相关矩阵一般都根据经验简单的给定,其理论基础不强,而且即使是在考虑误差的空间相关时,也一般借用大气数据分析中常用的空间相关函数.随着陆面数据同化研究的成熟,特别是分布式水文模型的应用,地表变量和遥感观测的误差空间相关问题肯定会受到越来越多的关注.与大气领域常用的空间相关函数相比,地统计具有更丰富的变率函数和描述空间变异的方法,因此,地统计在陆面观测的误差估计中可以大有作为.

3 总结与展望

陆面数据同化是一个崭新的领域,它正在汲取大气和海洋数据同化丰富素养的基础上迅速成长起来.它在本质上属于方法论的范畴,但其着眼点却远不仅仅是同化方法的技术层面,而是希望更好地集成模拟和观测这两种基本的认知手段,从而更好地从整体上认识复杂的陆地表层系统.陆面数据同化将在陆地表层系统科学走向成熟的任重道远的探索道路上,扮演重要的角色.

本文介绍了我们发展中国陆面数据同化系统的

研究进展. 与北美陆面数据同化系统和欧洲陆面数据同化系统相比, 虽然我们起步较晚, 在资料的丰富、研究的广度和深度上都还有差距, 参与的研究机构和研究人员也相对较少. 但是, 我们的特点是发展和融合了更多的同化方法, 发展了制备驱动数据的大气同化系统, 在实用型同化系统中更多地同化当今运行的被动微波遥感数据. 目前, 一个完全自主的陆面数据同化系统已经初步建成, 近期将在以下方面重点开展研究:

(1) 发展新的同化方法. 例如粒子滤波等更加广义的 Bayes 滤波方法, 奇异值分解同化方法^[57], Bayes 滤波和变分相结合的同化方法.

(2) 将同化功能嵌入到陆面过程模型的不同模块. 陆面过程模型一般可分解为功能不同的模块, 可见光遥感数据主要可在植被辐射传输、光合作用等模块中发挥作用, 而微波遥感资料主要用于土壤模块. 将同化功能嵌入到不同的模块中, 有利于针对模块的功能和特征(如线性或者非线性)设计不同的同化方法, 最充分地利用遥感信息.

(3) 借助新一代遥感卫星 Hydros 和 SMOS 即将升空的机遇^[58-60], 同化更适合于观测地表水文变量的新的被动微波遥感数据. 并为我国将进行的星载被动微波遥感的的数据应用做好准备, 更好地利用 973 项目中我国被动微波遥感研究的理论成果^[48, 61-63], 发展更成熟的用于陆面数据同化系统的辐射传输模型.

(4) 在大气驱动方面, 尝试融合更多种再分析资料, 如 GPCP 降水资料和各种卫星资料降水反演结果, 形成更高分辨率和更可靠的驱动数据.

(5) 发展能够实时地同化卫星遥感和各种自动观测的流域尺度陆面/水文数据同化系统, 用于水文预报和水资源管理.

总之, 陆面数据同化系统的发展有利于打破陆面过程模拟和观测之间的隔阂, 并且在统一的框架内将它们集成起来. 对于数据稀缺而模拟又具有很大不确定性的地球表层系统科学, 这种集成可能是至关重要的. 陆面数据同化的优势, 同时也是最大的挑战和机遇, 将来自于遥感领域, 正如 McLaughlin 所言, “水文数据同化和遥感技术将同步成长……”^[64]. 我们有理由相信, 随着陆面数据同化技术的成熟, 遥感将不再是游离在地球表层系

统科学的另一个重要手段—模拟和预报的边缘, 被以怀疑的目光反复审视的工具, 而将真正成为模拟和预报所不可缺少的一部分, 成为地球表层系统科学知识的组成部分之一. 数据稀缺和信息不准确的困境将得到根本性的解决, 陆面数据同化系统将有助于我们从地球观测系统时代蜂拥而至的信息海洋中提取理解地球表层系统的准确而一致的信息.

致谢 国家重点基础研究发展规划项目(2001CB309400)首席科学家金亚秋教授对本文提出了不少建议与修改. 北京师范大学地理学与遥感科学学院戴永久教授提供了最新版本的 CoLM 模型和模型应用的指导. 中央大学教授刘说安教授提供了土壤冻融的陆面过程/辐射亮温耦合模型.

缩略词

AIEM: Advanced Integral Equation Model, 高级积分方程模型

AMSR-E: Advanced Microwave Scanning Radiometer Enhanced for EOS, 地球观测系统中的高级微波扫描辐射计

BATS: Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme, 生物圈—大气圈传输方案

CEOP: Cooperated Enhanced Observing Period, 全球协调加强观测

CoLM: Common Land Model, 公共陆面模型

ELDAS: European Land Data Assimilation System to predict floods and droughts, 欧洲陆面数据同化系统

EOS: Earth Observing System, 地球观测系统

GAME-Tibet; GEWEX Asia Monsoon Experiment, 全球能水循环实验亚洲季风实验

GEWEX: Global Energy and Water Cycle Experiment, 全球能水循环实验

GLDAS: Global Land Data Assimilation System, 全球陆面数据同化系统

GPCP: Global Precipitation Climatology Project, 全球降水气候学项目

GSWP: Global Soil Wetness Project, 全球土壤湿度项目

Hydros: Hydrosphere State Mission, 水圈使命卫星

IEM: Integral Equation Model, 积分方程模型

LSM: Land Surface Model, NCAR 的陆面过程模型

MEMLS: Microwave Emission Model of Layered Snowpacks, 分层的积雪微波辐射模型

MM5: NCAR Meso-scale Model, NCAR 的中尺度大气

模型

- MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, 中分辨率成像光谱仪
- NCEP: National Centers for Environmental Prediction, 美国国家环境预测中心
- NLDAS: North American Land Data Assimilation System, 北美陆面数据同化系统
- NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration, 美国国家大气与海洋管理局
- NOAA/NCEP ETA: NOAA/NCEP ETA 模型
- PSO: Particle Swarm Optimization, 粒子群优化
- SCE: Shuffled Complex Evolution, 洗牌复形演化算法
- SiB2: Simple Biosphere Model 2, 简单生物圈模型 2
- SMEX02: Soil Moisture Experiment 2002, 土壤水分实验—2002
- SMOS: Soil Moisture and Ocean Salinity, 土壤水分与海洋盐度卫星
- SSiB: Simplified Simple Biosphere Model, 简化的简单生物圈模型
- SSM/I: Special Sensor Microwave/Imager, 专用微波成像辐射计
- TMI: TRMM Microwave Imager, 热带降雨卫星微波成像仪

参 考 文 献

- 1 Entin JK, Robock A, Vinnikov KY, et al. Evaluation of global soil wetness project soil moisture simulation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1999, 77(1B): 183—198
- 2 Koike T. Coordinated Enhanced Observing Period (CEOP)—an initial step for integrated global water cycle observation. *World Meteorological Organization Bulletin*, 2004, 53(2): 115—121
- 3 Daley R. *Atmospheric Data Analysis*. New York, USA: Cambridge University Press, 1991. 1—457
- 4 Talagrand O. Assimilation of observations, an introduction. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1997, 75(1B): 191—209
- 5 McLaughlin D. Recent development in hydrologic data assimilation. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(supplement): 977—984
- 6 Entekhabi D, Galantowicz JF, Njoku EG. Solving the inverse problem for soil moisture and temperature profiles by sequential assimilation of multifrequency remotely sensed observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(2): 438—448
- 7 Galantowicz JF, Entekhabi D, Njoku EG. Tests of sequential data assimilation for retrieving profile soil moisture and temperature from observed L-band radiobrightness. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(4): 1860—1870
- 8 Houser PR, Shuttleworth WJ, Famiglietti JS, et al. Integration of soil moisture remote sensing and hydrologic modeling using data assimilation. *Water Resources Research*, 1998, 34(12): 3405—3420
- 9 Walker JP, Houser PR. A methodology for initializing soil moisture in a global climate model: Assimilation of near-surface soil moisture observations. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D11): 11761—11774
- 10 Crow WT, Wood EF. The assimilation of remotely sensed soil brightness temperature imagery into a land surface model using Ensemble Kalman filtering: A case study based on ESTAR measurements during SGP97. *Advances in Water Resources*, 2003, 26(2): 137—149
- 11 Margulis SA, McLaughlin D, Entekhabi D, et al. Land data assimilation and estimation of soil moisture using measurements from the Southern Great Plains 1997 Field Experiment. *Water Resources Research*, 2002, 38: 35-1—35-18
- 12 Reichle RH, McLaughlin DB, Entekhabi D. Variational data assimilation of microwave radiobrightness observations for land surface hydrology applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(8): 1708—1718
- 13 Reichle RH, Koster RD, Dong JR, et al. Global soil moisture from satellite observations, land surface models, and ground data: Implications for data assimilation. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(3): 430—442
- 14 Sun C, Walker JP, Houser PR. A methodology for snow data assimilation in a land surface model. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(D08), doi: 10. 1029/2003JD003765
- 15 Mitchell KE, Lohmann D, Houser PR, 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. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(D07), doi: 10. 1029/2003JD003823
- 16 Rodell M, Houser PR, Jambor U, et al. The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85(3): 381—394
- 17 van den Hurk B. ELDAS Final Report. KNMI, ECMWF, 2005
- 18 李 新, 黄春林. 数据同化——一种集成多源地理空间数据的新思路. *科技导报*, 2004, (12): 13—16
- 19 黄春林, 李 新. 陆面数据同化系统的研究综述. *遥感技术与应用*, 2004, 19(5): 424—430
- 20 Evensen G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte-Carlo methods to forecast error statistics. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C5): 10143—10162
- 21 Burgers G, van Leeuwen PJ, Evensen G. Analysis scheme in the ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 1998, 126

- (6): 1719—1724
- 22 Houtekamer PL, Mitchell HL. Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique. *Monthly Weather Review*, 1998, 126(3): 796—811
 - 23 Evensen G. The Ensemble Kalman Filter: Theoretical formulation and practical implementation. *Ocean Dynamics*, 2003, 53: 343—367
 - 24 Evensen G. Sampling strategies and square root analysis schemes for the EnKF. *Ocean Dynamics*, 2004, 54(6): 539—560
 - 25 Reichle RH, McLaughlin DB, Entekhabi D. Hydrologic data assimilation with the ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 2002, 130(1): 103—114
 - 26 Zhang SW, Li HR, Zhang WD, et al. Estimating the soil moisture profile by assimilating near-surface observations with the ensemble Kalman filter (EnKF). *Advances in Atmospheric Sciences*, 2005, 22(6): 936—945
 - 27 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(4): 665—671
 - 28 黄春林, 李新. 土壤水分同化系统的敏感性研究. *水科学进展*, 2006, 17(4): 457—465
 - 29 Huang CL, Li X. Experiments of soil moisture data assimilation system based on ensemble Kalman filter. In: Liang S, Liu J, Li X et al, eds. *The 9th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*. Beijing, 2005, 386—389
 - 30 Li X. Development of a Land Data Assimilation System: System Implementation and Numerical Experiments at the CEOP Reference Sites. CAREERI/CAS, 2006. 65
 - 31 Li X, Koike T, Mahadevan P. A very fast simulated re-annealing (VFSA) approach for land data assimilation. *Computers and Geosciences*, 2004, 30(3): 239—248
 - 32 李新, 小池俊雄, 程国栋. 一个基于模拟退火法的陆面数据同化算法. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 632—636
 - 33 Pathmathevan M, Koike T, Li X, et al. A simplified land data assimilation scheme and its application to soil moisture experiments in 2002 (SMEX02). *Water Resources Research*, 2003, 39(12); doi: 10. 1029/2003WR002124
 - 34 Zhang SW, Qiu CJ, Xu Q. Estimating soil water contents from soil temperature measurements by using an adaptive Kalman filter. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, 43(2): 379—389
 - 35 Zhang SW, Qiu CJ, Zhang WD. Estimating heat fluxes by merging profile formulae and the energy budget with a variational technique. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21(4): 627—636
 - 36 Ren H, Wang CH, Qiu CJ, et al. Study of calculating surface flux in the typical arid regions of northwest China by variational method. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2004, 28(3): 285—294
 - 37 Dai Y, Zeng X, Dickinson RE, et al. The common land model. *Bulletin of American Meteorological Society*, 2003, 84: 1013—1023
 - 38 Dai Y, Dickinson RE, Wang YP. A two-big-leaf model for canopy temperature, photosynthesis and stomatal conductance. *Journal of Climate*, 2004, 17(12): 2281—2299
 - 39 Sellers PJ, Randall DA, Collatz GJ, et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. *Journal of Climate*, 1996, 9(4): 676—705
 - 40 Wang CH, Dong WJ, Wei ZG. Study on relationship between freezing-thawing processes of the Qinghai-Tibet Plateau and the atmospheric circulation over east Asia. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(3): 438—448
 - 41 Li X, Koike T. Frozen soil parameterization in SiB2 and its validation with GAME-Tibet observations. *Cold Regions Science and Technology*, 2003, 36(1—3): 165—182
 - 42 Wang SG, Li X, Liang X. Application of three parameter estimation methods of hydrologic model: Uncertainty in the parameter calibration. *Nordic Hydrology*. In: Cheng GD, Lei ZD, Bengtsson L, eds. *Proceedings of the International Symposium on Sustainable Water Resources Management and Oasis-hydro-sphere-desert Interaction in Arid Regions*. Beijing, 2005. Beijing: Tsinghua University Press, 2006, 97—116
 - 43 Fung AK, Li ZQ, Chen KS. Backscattering from a randomly rough dielectric surface. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(2): 356—369
 - 44 Fung AK. *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications*. Norwood: Artech House, 1994. 1—573
 - 45 Chen KS, Wu TD, Tsang L, et al. Emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with comparison to three-dimensional moment method simulations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(1): 90—101
 - 46 Wang JR, Choudhury BJ. Remote sensing of soil moisture content over bare field at 1.4GHz frequency. *Journal of Geophysical Research-oceans and Atmospheres*, 1981, 86 (NC6): 5277—5282
 - 47 Njoku EG, Jackson TJ, Lakshmi V, et al. Soil moisture retrieval from AMSR-E. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(2): 215—229
 - 48 金亚秋. 电磁散射和热辐射的遥感理论. 北京: 科学出版社, 1993, 1—292
 - 49 Liou YA, England AW. A land-surface process/radiobrightness model with coupled heat and moisture transport for freezing soil. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(2): 669—677
 - 50 Wiesmann A, Matzler C. Microwave emission model of layered snowpacks. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70: 307—316

- 51 Matzler C, Wiesmann A. Extension of the microwave emission model of layered snowpacks to coarse-grained snow. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70: 317—325
- 52 车涛, 李新. 利用被动微波遥感数据反演我国积雪深度及其精度评价. *遥感技术与应用*, 2004, 19(5): 301—306
- 53 车涛, 李新, 高峰. 青藏高原积雪深度和雪水当量的被动微波遥感反演. *冰川冻土*, 2004, 26(3): 363—368
- 54 车涛, 李新. 1993—2002年中国积雪水资源时空分布与变化特征研究. *冰川冻土*, 2005, 27(1): 64—67
- 55 Reichle RH, Entekhabi D, McLaughlin DB. Downscaling of radio brightness measurements for soil moisture estimation: A four-dimensional variational data assimilation approach. *Water Resources Research*, 2001, 37(9): 2353—2364
- 56 Moradkhani H, Sorooshian S, Gupta HV, et al. Dual state-parameter estimation of hydrological models using ensemble Kalman filter. *Advances in Water Resources*, 2005, 28(2): 135—147
- 57 Qiu C, Chou J. Four-dimensional data assimilation method based on SVD: Theoretical aspect. *Theoretical and Applied Climatology*, 2006, 83(1—4): 51—57
- 58 Entekhabi D, Njoku EJ, Houser P, et al. The hydrosphere state (Hydros) satellite mission: An Earth system pathfinder for global mapping of soil moisture and land freeze/thaw. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(10): 2184—2195
- 59 Kerr YH, Waldteufel P, Wigneron JP, et al. Soil moisture retrieval from space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(8): 1729—1735
- 60 Walker JP, Houser PR. Requirements of a global near-surface soil moisture satellite mission: Accuracy, repeat time, and spatial resolution. *Advances in Water Resources*, 2004, 27(8): 785—801
- 61 Jin YQ, Liang Z. An approach of three-dimensional vector radiative transfer (3-D-VRT) equation for inhomogeneous scatter media. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(2): 355—360
- 62 金亚秋. 空间微波遥感数据验证的理论与方法. 北京: 科学出版社, 2005, 250
- 63 Jin YQ. *Theory and Approach of Information Retrievals from Electromagnetic Scattering and Remote Sensing*. Netherlands: Springer, 2005, 384
- 64 McLaughlin D. An integrated approach to hydrologic data assimilation: Interpolation, smoothing, and filtering. *Advances in Water Resources*, 2002, 25: 1275—1286