

AMSR-E 亮温同化系统的数据分析方法研究

付秀丽^{1,2}, 施建成¹

(1. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 北京石油化工学院, 北京 102617)

摘要:低频微波卫星观测信号由于其对土壤水分非常敏感, 经常被同化到陆面模式来提高土壤水分和其它地表状态变量的模拟和预报。常用的同化算法主要利用统计学, 优化理论等数学知识, 对改进和理解模型的物理过程意义不大。通过研究发展一个数据分析方法, 判断 AMSR-E 亮温同化系统土壤水分的预报误差, 为将来从物理角度定性分析提供基础。

关 键 词:同化; 土壤水分; 数据分析; 校正

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2010)03-0342-04

1 引 言

水文循环是联系地球系统地圈—生物圈—大气圈的纽带, 它是研究大气、气候、陆地表面过程的基础。2002 年开始, 国际水文科学协会 (IAHS) 启动了新的国际水文 10 年计划 (2003~2012), 主题为“资料缺乏地区水文预测” (Predictions in Ungauged Basins, 简称 PUB), 该计划旨在以 PUB 这个重大的水文问题为依托, 在探索解决该问题的新思路的同时, 实现水文理论的重大突破 (<http://pub.iwmi.org/>)。其中第 8 工作组为“遥感与数据同化”, 其目标之一就是: 发展数据同化技术, 探索数据同化相关的关键问题。

随着北美 (全球) 陆面数据同化系统的建立, 利用卫星、雷达数据同化地表土壤水分、地表温度、能

量通量等工作正逐步展开。与此同时, 陆面数据同化的研究也已经成为当前陆面过程和水文过程研究的热点。其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^[1]。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^[2-3]。

辐射计测量数据正越来越多地被用来提高气候模型的预测精度, 和同化地表测量值或反演产品相比, 同化亮温可以满足大尺度实时要求, 避免从亮温反演地表参数时带来的误差。

卫星数据同化系统的结构框图通常如图 1。

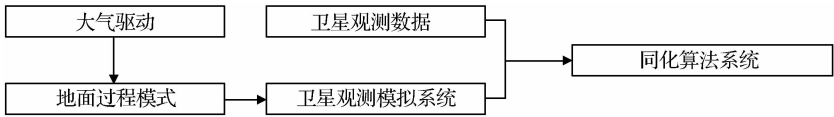


图 1 卫星数据同化系统结构图

Fig. 1 The schematic of satellite data assimilation system

其中地面过程模式是陆面过程模型和分布式水文模型, 它是模拟地表 (大气—植被—土壤界面) 能量和水平衡以及生物地球化学循环的模型, 其准确性、合理性直接影响着同化系统的输出结果以及下一时刻状态的预报。大气和陆面模型参数化是其中的关键步骤之一, 其参数化过程通常是利用传统的点测量数据来实现。因而造成当前的大气和陆

面预测模式极大的不确定性。

数据同化算法将模型算子和观测算子耦合在一起, 同化算法是在考虑模型误差和观测误差的基础上, 利用观测数据对模型算子输出的状态变量进行优化, 来更加客观地估算地表状态变量。一般采用直接插入法、变分法、扩展卡尔曼滤波、集合卡尔曼滤波和粒子滤波等。

收稿日期: 2009-11-27; 修订日期: 2010-03-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目“被动遥感反射、辐射机理与参数反演” (2007CB714403)。

作者简介: 付秀丽 (1978—), 女, 博士研究生, 主要从事微波遥感及同化方面研究。E-mail: m98105@163.com。

这些同化算法基于数学理论,优点是简单且误差较小,缺点是对于改进和理解模型的物理过程意义不大,随着遥感技术的发展,基于卫星测量的遥感综合技术将有能力提高大气和陆面模式的输出精度。

基于遥感辐射传输理论,本研究从遥感的角度

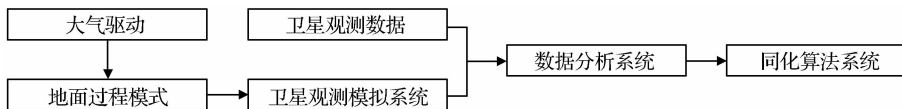


图2 增加了数据分析系统的卫星数据同化系统结构图

Fig. 2 The schematic of satellite data assimilation system added data analysis system

2 方法描述

卫星观测模拟系统的框架为零阶辐射传输模型,考虑包括植被和裸土的混合像元,暂不考虑大气影响。植被层可看作是一个位于粗糙土壤之上的散射层。植被层对地表辐射既有衰减的作用,同时又有增加的作用。在微波频段,植被层可看作一个单次散射层,在混合像元下忽略多次散射,植被上界的辐射贡献来自于4部分:① 植被直接发射的部分;② 植被入射到地表经地表反射的部分;③ 地表发射经植被衰减的部分;④ 地表直接发射的部分。考虑混合像元下可有不同的植被覆盖度,地表发射亮温的理论表述为:

$$T_{bp}^T = F_v \cdot E_p^v(f) \cdot T_v + F_v \cdot E_p^v(f) \cdot L_p(f) \cdot R_p^s(f) \cdot T_v + F_v \cdot E_p^s(f) \cdot L_p(f) \cdot T_s + (1 - F_v) \cdot E_p^s(f) \cdot T_s \quad (1)$$

其中: p 表示极化方式(水平极化或者垂直极化); F_v 为植被覆盖度,由分辨率为 0.5° 的地表覆盖数据获得; $L_p(f)$ 为植被层的单程衰减因子, $L_p(f) = \exp(-\tau)$ 。第一项为植被辐射,其中 $E_p^v(f) = (1 - \omega) \cdot (1 - \exp(-\tau))$ 。第二项、第三项分别为植被与地表之间的相互辐射, $E_p^s(f)$ 是裸露地表发射率, $R_p^s(f)$ 是裸露地表反射率, $R_p^s(f) = (1 - E_p^v(f))$ 。第四项为地表辐射。 T_v 、 T_s 分别为植被和地表温度。假设在卫星观测时间, T_v 、 T_s 近似相等并由陆面模式或者同化系统输出的预报有效温度来表示,则式(1)中不同项组合后可进一步表示为:

$$T_{bp}^T = CF_v \cdot T_s + CF_{att} \cdot E_p^s(f) \cdot T_s \quad (2)$$

其中: $CF_v = F_v \cdot E_p^v(f) + F_v \cdot E_p^v(f) \cdot L_p(f)$, $CF_{att} = -F_v \cdot E_p^v(f) \cdot L_p(f) + F_v \cdot L_p(f) + (1 - F_v)$ 。 CF_v 记作植被自身的辐射项, CF_{att} 记作植被衰减项。 CF_v 是植被覆盖度和其它植被物理特性如生物量、水分含量、散射体大小、形状以及倾向的函数。在给定角度下,若植被覆盖度确定,当植被透过率增

研究卫星数据同化系统,发展应用于卫星数据同化系统的的天分析方法:在模拟数据和实测数据进入同化算法以前,对卫星观测的模拟数据和实测数据进行分析,见图2。定性判别大气和陆面模式输出参数的误差。为同化算法提供优化指导。

加时 CF_v 增加,同时 CF_{att} 降低,裸土时 CF_v 为0。

由上可见,亮温是地表温度、土壤水分、植被含水量、地表粗糙度的函数,即:

$$T_{bp}^T \sim f(T_s, sm, \omega, sl)$$

根据式(2),两个极化观测到的亮温可以表示成:

$$T_{bh}^T = CF_v \cdot T_s + CF_{att} \cdot E_h^s(f) \cdot T_s \quad (3)$$

$$T_{bv}^T = CF_v \cdot T_s + CF_{att} \cdot E_v^s(f) \cdot T_s \quad (4)$$

2005年Shi^[4]等针对AMSR-E,对比INRA93地面试验数据与微波辐射物理模型AIEM模型模拟的地表微波发射率,得到了很好的一致性。发展了适合较高频率和大入射角的QP模型,QP模型能够很好地反映粗糙度对非相干项的影响,可以很好地将粗糙度和介电特性分离。

利用QP模型可得两个极化的粗糙地表发射率分别表示为:

$$E_v = Q_v \cdot t_h + (1 - Q_v) \cdot t_v \quad (5)$$

$$E_h = Q_h \cdot t_v + (1 - Q_h) \cdot t_h \quad (6)$$

针对AMSR-E参数配置,通过模拟数据库发现, Q_v 和 Q_h 之间具有很高的相关性,二者之间的关系可以表示为^[5]:

$$Q_v(f) = a(f) + b(f) \cdot Q_h(f) \quad (7)$$

回归系数只和频率有关。将式(5)、式(6)代入式(3)、式(4),重新整理,代入式(7),可得:

$$\alpha(f) T_{bv}^T + T_{bh}^T = (\alpha(f) + 1) \cdot CF_v \cdot T_s + CF_{att} \cdot T_s \cdot (\beta(f) \cdot t_v + \eta(f) \cdot t_h) \quad (8)$$

可见方程右边是植被参数和土壤水分、地表温度的函数,利用AMSR-E多频率特点,可知相邻频率的式(8)的比值是土壤水分和植被参数的函数,即:

$$\frac{\alpha(f_1) T_{bv}^T(f_1) + T_{bh}^T(f_1)}{\alpha(f_2) T_{bv}^T(f_2) + T_{bh}^T(f_2)} \sim f(sm, \omega) \quad (9)$$

其中:参数 $\alpha(f) = 1/b(f)$ 。

在被动微波遥感的空间尺度,观测到的植被冠

层信号是许多植被类型总的影响结果。当许多有着不同散射体大小、形状和朝向的植被冠层平均后,我们可以假设植被信号不依赖于极化。因此,相邻频率极化观测亮温的比值可以表示为:

$$\frac{T_{bv}^T(f_1)-T_{bh}^T(f_1)}{T_{bv}^T(f_2)-T_{bh}^T(f_2)}=\frac{CF_{att}(f_1)}{CF_{att}(f_2)}\cdot\frac{E_v^s(f_1)-E_h^s(f_1)}{E_v^s(f_2)-E_h^s(f_2)} \quad (10)$$

文献[6]为了分析 AMSR-E 通道的辐射信号对裸露地表的响应情况,针对 AMSR-E 配置,利用微波散射理论模型 AIEM 模型建立了地表辐射信号的模拟数据库,该数据库覆盖了尽可能宽的土壤水分(2%~44%)和地表粗糙度参数(均方根高度变化范围 0.25~3 cm,相关长度变化范围 0.25~30 cm),每组频率和极化下共有 2 904 个发射率的值。研究发现两个相邻频率的裸露地表发射信号具有很高的线性相关性^[6]。

$$E_p^s(f_2)=a(f_1,f_2)+b(f_1,f_2)\cdot E_p^s(f_1) \quad (11)$$

将式(11)代入式(10),得到:

$$\frac{T_{bv}^T(f_1)-T_{bh}^T(f_1)}{T_{bv}^T(f_2)-T_{bh}^T(f_2)}=\frac{CF_{att}(f_1)}{CF_{att}(f_2)}\cdot b(f_1,f_2) \quad (12)$$

可见式(12)右端只和植被参数相关,即:

$$\frac{T_{bv}^T(f_1)-T_{bh}^T(f_1)}{T_{bv}^T(f_2)-T_{bh}^T(f_2)}\sim f(x) \quad (13)$$

3 结果分析

本文以全球陆面数据同化系统(GLDAS)^[7]的输出产品作为模拟系统的输入,以同化 AMST-E 亮温产品为例,通过数据分析来判断 GLDAS 产品中土壤水分和植被水分的误差情况。

全球陆面数据同化系统(GLDAS)由美国航空航天局(NASA)戈达德空间飞行中心(GSFC)和美国海洋和大气局(NOAA)国家环境预报中心(NCEP)联合发展。GLDAS 是一个全球高分辨率离线的(不与大气模式耦合)陆面模拟系统,它融合来自地面和卫星的观测数据来提供最优化近实时的地表状态变量,有 1°和 0.25°两种,时间分辨率为 3 h。产品下载网址:“http://disc.gsfc.nasa.gov/hydrology/hydro_get_data.shtml”,本研究选择分辨率较高的 0.25°产品。

选取美国乔治亚州研究区,分析该区域 0.25°×0.25°混合像元尺度下同化系统预报情况。用 AMSR-E 辐射计的 C 波段和 X 波段观测数据进行分析,表 1 是式(9)和式(12)左边的模拟值和卫星实测值之间的比较。

表 1 式(9)和式(12)左边表达式的实测值与模拟值
Table 1 Satellite observations and simulation of left (9) and left of (12)

式(9)的左边			式(12)的左边		
实测值	模拟值	二者之差	实测值	模拟值	二者之差
0.9797	0.9633	0.0163	1.2746	1.0027	0.2719
0.9783	0.9706	0.0077	1.0635	0.9895	0.0740
0.9781	0.9706	0.0075	1.3037	0.9908	0.3129
0.9829	0.9686	0.0143	1.1998	0.9990	0.2008

根据表 1,发现模拟值较实测值偏小,其中植被参数引入的误差相对土壤水分较大,说明该陆面模型的植被参数预报不确定性较大,植被生态模型需要改进,以便进一步提高预报精度。

图 3 是式(9)右边、式(12)右边对土壤水分参数和植被参数的敏感性。从图 3 可见,式(12)右边随着植被水分增加而减小,是负相关的趋势。结合表 1 模拟值比实测值小,可以推断出同化系统的植

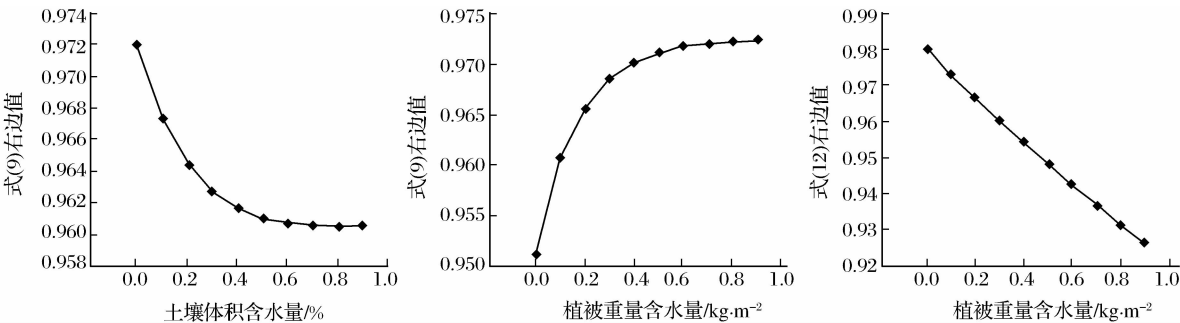


图 3 式(9)右边表达式与土壤水分(左)、植被含水量(中)的关系,式(12)右边表达式与植被含水量的关系(右)
Fig. 3 Relation between righte of (9)and soilwater(left), canopy water(media),relation between right of (12) and canopy water(right)

被水分预报应该较实际值偏大了。

同理,式(9)右边对土壤水分和植被水分的敏感度是相反的,它随植被水分增加而增加,随土壤水分增大而减小。结合表 1,二者综合作用则使模拟值较实测值偏小。结合式(12)右边对植被预报的判断,可推知同化系统预报的土壤水分值是偏大的,也就是说,实际值应该小于预报的土壤水分值。

为了验证数据分析结果,采用 SMEX03^[8] 乔治亚州的实测值来对预报的土壤水分分析结果进行验证。乔治亚州实验区的范围是 31. 20°~31. 82°N,83. 43°~83. 94°E 之间,试验时间是 2003 年 6 月 23 日~7 月 17 日。选取研究区内的 5 个相邻 0. 25°×0. 25°像元在 7 月 1 日的实测结果,其与同化系统预测结果的比较见表 2。根据表 2 可以发现,同化系统预报的 2003 年 7 月 1 日的土壤水分值相比实测值是偏大的,也就是说,同化系统预报的土壤水分是偏大的,这个结论和利用数据分析方法分析得到的结论是相符的。

表 2 土壤水分实测值与预报值

Table 2 Measured soilwater and forecasted soilwater		
像元	土壤水分实测值/%	土壤水分预报值/%
1	15. 22	27. 54
2	20. 42	26. 63
3	13. 92	27. 71
4	15. 76	27. 60

4 结 语

本研究基于遥感辐射传输基础,从物理过程方面对同化系统预报结果进行了数据分析研究,结果

表明方法是可行的,是对以数学统计为基础的同化算法具有指导意义的工作。下一步将对数据分析方法进行大量的数据验证,未来其预报误差将进一步发挥校正作用,提高模型预报精度。

参考文献:

[1] Li Xin,Huang Chunlin,Che Tao,*et al.* Progress and Prospects of Land Surface Data Assimilation System in China[J]. Progress in Natural Science,2007,17(2):163-173. [李新,黄春林,车涛,等. 中国陆面数据同化系统研究的进展与前瞻[J]. 自然科学进展,2007,17(2):163-173.]

[2] Daley R. Atmospheric Data Analysis[M]. New York: Cambridge University Press,1991.

[3] Talagrand O. Assimilation of Observations, An Introduction[J]. Journal of Meteorological Society of Japan,1997,5(1):191-209.

[4] Shi J,Jiang L M,Zhang LX,*et al.* A Parameterized Multi-Frequency-Polarization Surface Emission Model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43 (12): 2831- 2841

[5] Shi Jiancheng, Jiang Lingmei, Zhang Lixin. Physically Based Estimation of Bare-Surface Soil Moisture With the Passive Radiometers[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2006,44(11): 3145-3153.

[6] Shi Jiancheng,Jackson T,Tao Jing. Microwave Vegetation Indexes Derived from Satellite Microwave Radiometers[J]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS),2007,1412-1415.

[7] Rodell M,Houser P R,Jambor,*et al.* The Global Land Data Assimilation System[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2003,85(3):381-394.

[8] Bosch D ,Jackson T J,Lakshmi V,*et al.* SMEX03 Georgia Regional Ground Soil Moisture Data[S]. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center. Digital Media,2004.

Research of Data Analysis Method Used in AMSR-E
Brightness Temperature Assimilation System

FU Xiu-li^{1,2},SHI Jian-cheng¹

(1. Institute of Remote Sensing Applications,Chinese Academy of Sciences,Beijing 100101,China;
2. Beijing Institute of Petrochemical Technology,Beijing 102617,China)

Abstract: Because of sensitivity to soil moisture,the microwave satellite signal at low-frequency is often assimilated into land surface model to improve forecasting of soil moisture and other surface state variables. Assimilation algorithms use mainly statistics,optimization theory and other mathematical knowledge,which do not help to improve description of physical processes of models. This study is to develop a data analysis method to judge the errors of soil moisture predicated by assimilation,which is the prior research when error will be returned to land surface model to correct until they are in line with the satellite observations.

Key words: Assimilation;Soil moisture;Data analysis;Calibration