

杨晓峰, 陆其峰, 杨忠东. 基于 AMSR-E 土壤湿度产品的 LIS 同化试验. 应用气象学报, 2013, 24(4): 435-445.

基于 AMSR-E 土壤湿度产品的 LIS 同化试验

杨晓峰* 陆其峰 杨忠东

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘 要

由陆面信息系统(Land Information System, 简称 LIS)通过 NOAH 陆面过程模型使用集合卡尔曼滤波开展 AMSR-E(Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System)土壤湿度同化试验, 得到 2003 年中国区域垂直深度为 4 层、水平空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的土壤湿度试验数据。使用农业气象观测站土壤相对湿度和国家生态系统野外科学观测研究站土壤体积含水量对试验结果进行检验, 结果表明: 同化过程整体上提高了陆面模型的模拟精度, 草地生态系统模拟精度高于作物和森林生态系统; 有效的同化过程依赖于 AMSR-E 土壤湿度的准确性; 模拟出的土壤湿度空间分布特征与实际相符。同化试验得到的时空相对连续且精度相对准确的土壤湿度数据是气候变化和干旱监测的重要数据基础。

关键词: LIS; 土壤湿度; 集合卡尔曼滤波; AMSR-E; 同化试验

引 言

土壤水分在地-气界面间的物质、能量交换中起着重要作用, 是水文学、气象学等研究领域的重要环境因子和过程变量^[1]。土壤湿度变化会导致地表反照率、土壤热容量、地表蒸发以及植被生长状况的变化, 改变地表向大气输送的感热、潜热和长波辐射通量, 最终影响气候变化^[2]。孙丞虎等^[3]对淮河流域土壤湿度与前后期不同时段降水和气温的关系进行了研究, 同时指出土壤湿度是气候变化的研究和预测中不可忽视的要素之一。Koster 等^[4]和 Yang 等^[5]在近年来的工作中揭示了初始土壤湿度异常对短期气候预测技巧的影响。左志燕等^[6]通过对资料的诊断分析, 揭示了我国东部春季土壤湿度与夏季降水的联系; Zhan 等^[7]研究表明, 长江中下游地区 4—5 月的土壤湿度与东亚季风区的降水量呈正相关关系; 郭维栋等^[8]研究表明, 较真实的初始土壤湿度可在一定程度上提高中国夏季降水的预报技巧。土壤湿度是下垫面中具有较长记忆能力的物理量, Famiglietti 等^[9]研究表明, 土壤湿度时空尺度上的

准确估计为陆-气耦合模型提供了较为准确合理的土壤湿度初始条件。另外, 土壤湿度的准确估算影响着水文过程研究、洪水预报、干旱评估以及土壤水存储相关的降水形态分析^[10]。目前, 国内外都极为重视对土壤湿度的研究, 也加大了对土壤湿度的观测力度^[11]。

土壤湿度可通过常规观测、遥感反演和陆面过程模拟获取。常规观测能较准确地测量不同深度的土壤含水量而不受土壤特性和植被状况的影响, 但耗时费力且测点少, 无法高效获得大范围土壤湿度^[12]; 利用可见光-近红外、热红外、微波谱段观测到的表层信息, 通过反演可获取大范围土壤湿度^[13], 但仅为表层信息, 不能给出深层土壤湿度; 陆面过程模型利用水热传递的物理机制, 实现土壤湿度在土壤深度和时间上的信息扩展^[14], 但精度不仅受初始值精度影响, 而且随着模拟时间的增加, 误差会不断累积^[15], 林朝晖等^[16]指出模拟对土壤含水量初值有较强的敏感性, 土壤含水量初值的设定对土壤含水量模拟有重要影响。

无论是地面观测、卫星遥感, 还是陆面过程模拟均不能单独给出时空相对连续且精度较高的土壤湿

2012-07-03 收到, 2013-04-19 收到再改稿。

资助项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106014), 国家科技支撑计划项目(2008BAC40B03), 国家自然科学基金项目(40705037)

* email: yangxf@cma.gov.cn

度数据,数据同化方法在考虑观测和模拟自身误差基础上,在数值模型的动态运行过程中融合观测数据^[17],通过优化算法可获取时空较为连续且精度高于模拟的土壤湿度。McLaughlin^[18]将大气、海洋科学中发展比较成熟的数据同化思想引入水文科学中,从而兴起了陆面数据同化的研究。李新等^[19]利用模拟退火法进行了土壤湿度同化试验,提高了土壤湿度的模拟精度,建立了中国西部陆面同化系统;师春香等^[20]利用集合卡尔曼滤波和通用陆面模型进行了土壤湿度同化试验;Entekhabi等^[21]利用扩展卡尔曼滤波将近地表层微波遥感观测同化到耦合的土壤水热传输模式中,代表了将微波遥感和陆面过程相互集成的研究方向;Reichle等^[22]对不同数据同化算法在陆面数据同化中的应用进行了研究;Houser等^[23]利用统计校正、最优插值、牛顿松弛法等方法将土壤湿度的微波辐射计图像资料同化到3层 TOPLATS 模式中。

本文使用陆面信息系统^[24](Land Information System,简称 LIS)中的集合卡尔曼滤波同化方法和NOAH陆面过程模型同化 AMSR-E(Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System)土壤湿度卫星反演产品,得到时间轴上相对连续的垂直深度4层、水平空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 的土壤湿度数据,通过不同来源的地面观测资料对同化结果进行检验,以确定同化的有效性。

1 模型及资料简介

1.1 模型简介

陆面数据同化系统由驱动数据、参数集、陆面过程模型、观测数据、数据同化算法等组成,美国戈达德空间飞行中心承担研制的 LIS 是典型的陆面数据同化系统,对传统陆面数据同化系统进行升级使其具有更高分辨率的模拟能力和更高的计算效率。LIS 的模块化设计具有友好的可扩展性,可将不同来源的观测数据、陆面过程模型、数据同化算法搭配混合使用而互不冲突。LIS 包括一组兼容性很强的子系统来支撑离线和在线的系统运行,主要有核心程序、陆面过程模型子系统、数据同化子系统、气候模型子系统、最优化子系统等。本文试验中陆面过程模型子系统选择较为先进的第3代陆面过程模型NOAH^[25],包括4层土壤模块和1层植被冠层模块,4层土壤深度为0.1 m,0.3 m,0.6 m和1 m。

数据同化子系统选择集合卡尔曼滤波,是 Evensen 等^[26]于1994年根据 Epstein 的随机动态预报理论提出的顺序数据同化算法,其最大特点是克服了要求线性化模型算子和观测算子的缺点。

1.2 资料简介

1.2.1 LIS 数据

LIS 通过输入参数和大气驱动数据来驱动运行,输入数据包括植被参数、土壤类型、数字高程等数据,驱动数据为 GDAS(Global Data Assimilation System)数据。LIS 源代码及系统数据均由 LIS 开发团队提供。

①植被参数:全球 $25\text{ km}\times 25\text{ km}$ 静态陆地分类由 NOAA-15 AVHRR 数据^[27]制成,植被覆盖度^[28]由 NOAA/AVHRR 植被指数制成。

②土壤参数:由 Miller 等^[29]通过美国农业部土壤地质数据计算得到空间分辨率为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 的多层16种土壤特性数据。

③高程数据:将全球30 arc 地质高程数据平均到 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 网格而得到。

④GDAS 数据源于大气同化产品、再分析资料^[30-31]以及观测,由 NCEP 全球大气数据同化系统同化多种常规资料和卫星遥感资料而得到。本文使用 GDAS 数据的空间范围为全球,空间分辨率为 $25\text{ km}\times 25\text{ km}$;时间为2002年10月—2003年12月,时间分辨率为3 h。

1.2.2 土壤湿度数据

本文开展同化试验及对试验结果进行检验所涉及的土壤湿度有 AMSR-E 土壤湿度产品、中国气象局农业气象观测站数据和生态系统野外科学观测研究站数据。

①AMSR-E 土壤湿度覆盖全球范围,空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$,数据来源于网站(<http://nsidc.org/data/amsre>),本文使用2003年全年 AMSR-E 逐日数据。

②农业气象观测站(简称农气站)资料采用烘干法观测,来源于国家气象信息中心数据共享网站,包括10 cm,20 cm,50 cm,70 cm以及100 cm深度的土壤相对湿度,数据为中国区域778个站点的逢8观测。该套数据各层均有不同程度的缺测(以-9999标识),100 cm深度的缺测率达95%以上,将该层数据全部剔除。使用该数据对试验结果进行检验需要土壤墒情数据(土壤容重和田间持水量)将相对湿度转化为体积含水量,但土壤墒情观测常滞

后,与气象业务需求存在较大差距^[32-33],目前搜集到 84 个站(如图 1 中灰色点所示),因此在使用农气站数据对试验结果进行检验时只使用 84 个站点。

③国家生态系统野外科学观测研究站(简称生态站)资料来源于中国生态系统研究网络共享数据平台(CERN)动态监测数据库中的水环境动态监测数据,本文使用其中的 6 个站点数据(如图 1 中黑色点所示),分别为封丘站、桃园站、长白山站、西双版纳站、海北站以及内蒙古站,其中西双版纳站和长白山站是森林生态系统站,桃园站和封丘站是农田生态系统站,海北站和内蒙古站是草地生态系统站。数据包括 10~110 cm 以 10 cm 为间隔共 11 层数据,本文使用 10 cm, 30 cm, 60 cm, 100 cm 数据进行分析,时间分辨率为不连续随机观测,其中海北站与内蒙古站的 100 cm 深度观测数据缺失。

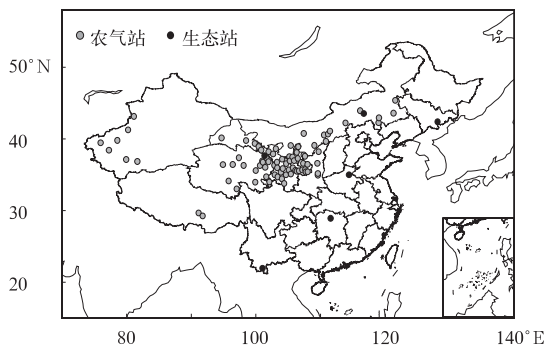


图 1 检验所用农气站、生态站分布示意图

Fig. 1 Distribution of agro-meteorological stations and ecological stations used for testing

2 试验设计与数据处理

2.1 试验设计

分别进行两次试验:试验 1 为模拟试验得到 2003 年 4 层土壤湿度模拟结果,即同化前结果;试验 2 为同化试验得到 2003 年 4 层土壤湿度同化结果,即同化后结果。

①试验 1:使用以上介绍的输入参数以及 GDAS 驱动数据运行 LIS,陆面过程模型为 NOAH,运行时间为 2002 年 10 月 1 日—2003 年 12 月 31 日,空间范围为 15.25°~54.65°N,73.25°~135.65°E,空间分辨率为 0.25°×0.25°,时间分辨率为 3 h。

②试验 2: LIS 运行设置与试验 1 相同,不同的

是在运行过程中选择集合卡尔曼滤波同化方法,将 AMSR-E 土壤湿度逐日产品同化到系统中对土壤湿度模拟过程进行控制和调整。

2.2 数据处理

2.2.1 参数转化

LIS 土壤湿度模拟结果为质量含水量,AMSR-E 土壤湿度产品为体积含水量,而农气站的土壤湿度为土壤相对湿度,在站点数据与试验模拟结果进行对比时,需首先将各种来源数据的单位进行统一,均转化为体积含水量。

①土壤体积含水量 θ_v 为土壤相对湿度 q 与土壤田间持水量 f_c 以及土壤容重 s_c 的乘积:

$$\theta_v = q \times f_c \times s_c. \quad (1)$$

②假设 LIS 中 NOAH 4 层土壤水分质量含水量分别为 m_1, m_2, m_3, m_4 ,转化后的体积含水量为 v_1, v_2, v_3, v_4 ,转化关系为

$$v_1 = 1.0m_1/100 = m_1 \times 1\%, \quad (2)$$

$$v_2 = 1.0m_2/300 = 0.333m_2 \times 1\%, \quad (3)$$

$$v_3 = 1.0m_3/600 = 0.167m_3 \times 1\%, \quad (4)$$

$$v_4 = 1.0m_4/1000 = 0.1m_4 \times 1\%. \quad (5)$$

2.2.2 数据匹配

农气站土壤湿度的观测深度为 10 cm, 20 cm, 50 cm 和 70 cm, LIS 模拟深度为 10 cm, 30 cm, 60 cm 和 100 cm,两者只有 10 cm 一致,而目前无较好的插值方法将 20 cm, 50 cm 以及 70 cm 的农气站土壤湿度数据插值成与 LIS 对应深度的结果,同时插值方法的使用会再一次增加误差。因此,本文使用相近土壤层的结果进行比对,即农气站 20 cm, 50 cm 和 70 cm 直接与 LIS 的 30 cm, 60 cm 和 100 cm 对应。生态站的数据每间隔 10 cm 均有观测,因此可直接与 LIS 结果对应。AMSR-E 和 LIS 土壤湿度为 25 km×25 km 内的土壤湿度平均结果,农气站和生态站的数据均为单点观测,由于农气站和生态站分布较为稀疏,仍无法实现 1 个像元内多点观测,因此本文在数据空间匹配时将落在 25 km×25 km 范围内的站点土壤湿度默认为该区域的土壤湿度。

3 结果分析

3.1 使用农气站数据对试验结果进行检验

对 84 个农气站土壤湿度观测数据和试验 1、试验 2 模拟结果进行统计,结果见表 1。总体来讲,经

过同化过程的试验2土壤湿度模拟值更接近于观测值,与站点间的均方根误差更小,这说明总体上试验2的同化过程对土壤湿度的模拟精度提升为正效果。对匹配数据进一步处理,取同一时间所有站点的地面观测数据和试验1、试验2模拟结果平均值,得到2003年土壤湿度多站点平均值随时间的变化曲线(如图2所示)。结果显示:试验1、试验2结果均能反映土壤湿度的时间演化趋势,经过同化过程的试验2土壤湿度更接近观测值,精度更高。图2 10 cm, 60 cm 中时间序列 33~36(2003年每月8

日、18日、28日观测,共36 d)之间试验1、试验2模拟结果变化特征与农气站观测值有明显不同,通过对农气站观测数据进行分析,该时段较多的站点观测值为连续非缺测标识的99%,从而导致站点土壤湿度变化特征在该时段有明显的增大趋势,目前尚无方法可判别该观测值是否存在问题。农气站土壤湿度数据是针对农作物生长发育状况而观测的,观测目的不同会导致该数据使用存在问题,但在总体上,农气站土壤湿度检验表明了同化过程的有效性。

表1 试验1、试验2的3层模拟结果与观测数据统计(单位:%)

土壤深度	观测	试验1	试验2	差值		均方根误差	
				试验1与观测	试验2与观测	试验1与观测	试验2与观测
10 cm	19.70	16.56	17.68	3.14	2.02	9.29	8.70
30 cm	25.42	17.59	21.27	7.83	4.15	12.52	10.80
60 cm	25.18	21.24	27.65	7.59	-2.47	11.17	10.96

注:以上数值均为土壤水分体积含水量平均值。

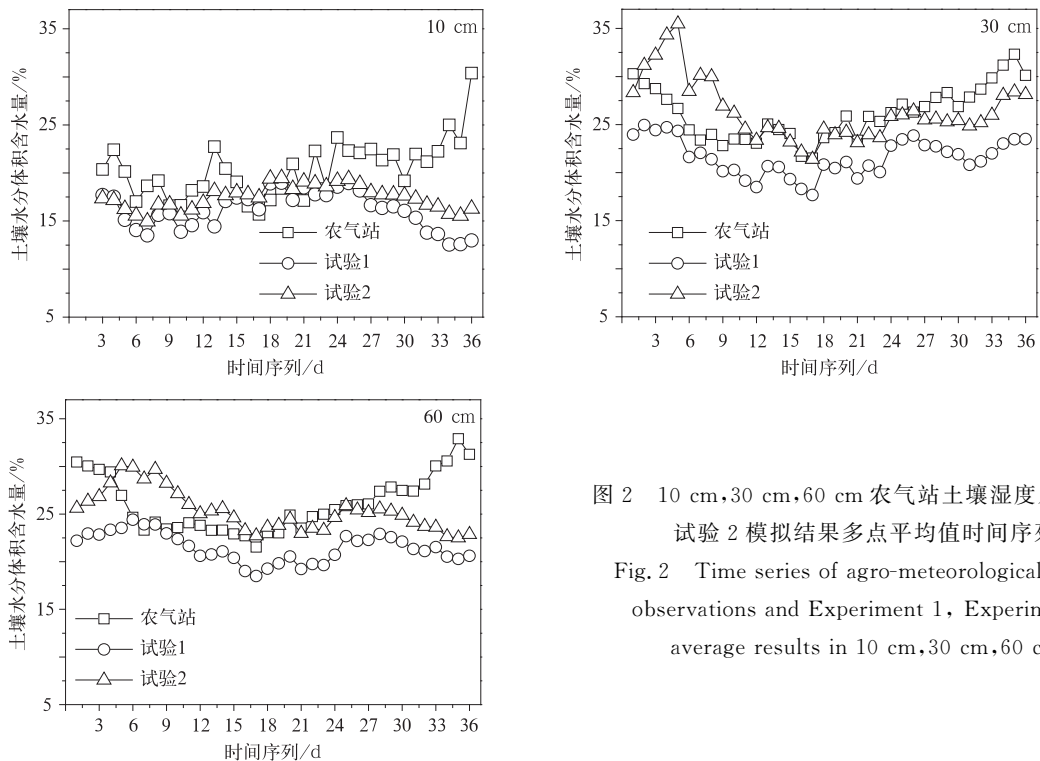


图2 10 cm, 30 cm, 60 cm 农气站土壤湿度及试验1、试验2模拟结果多点平均值时间序列
Fig. 2 Time series of agro-meteorological-station observations and Experiment 1, Experiment 2 average results in 10 cm, 30 cm, 60 cm

土壤湿度同化试验除了给出相对准确的单点土壤湿度外,还给出了中国区域的土壤湿度分布特征,为了衡量试验对土壤湿度空间分布的模拟能力,现选取2003年7月1日中国区域内农气站土壤湿度观测值与AMSR-E土壤湿度以及LIS同化土壤湿度结果

进行比较(图3)。AMSR-E土壤湿度和LIS同化土壤湿度的空间分布与农气站观测值的一致性均较好,大值区分布在我国东部沿海、东南部以及东北部地区,小值区主要分布在我国西部以及西北部地区,三者分布规律均为由我国东南部向西北部递减。

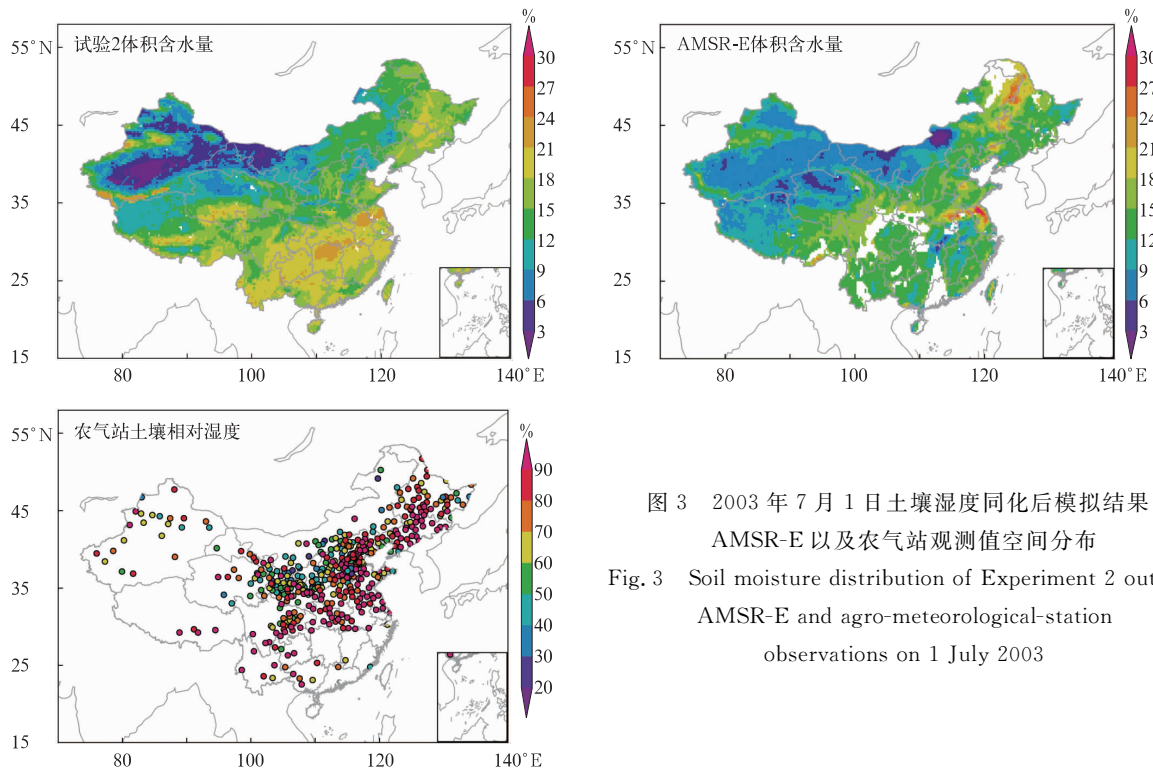


图 3 2003 年 7 月 1 日土壤湿度同化后模拟结果、AMSR-E 以及农气站观测值空间分布

Fig. 3 Soil moisture distribution of Experiment 2 output, AMSR-E and agro-meteorological-station observations on 1 July 2003

虽然本文试验结果时空分布在整体上显示出较好的同化效果,但同化试验的有效性较强地依赖于 AMSR-E 土壤湿度的准确性,AMSR-E 土壤湿度越准确,理论上同化过程效果越好。从 84 个农气站中选出具有代表性的不同类型的 A, B, C 3 个站点,其中站点 A 的 AMSR-E 土壤湿度与农气站观测数据一致性最好,站点 B 的 AMSR-E 土壤湿度与农气站观测数据有一定偏差,而站点 C 的 AMSR-E 土壤湿度与农气站观测数据有较大的偏差。经过试验 2 的同化过程后,这 3 个站点同化效果各不相同(如图 4 所示)。站点 A 的 AMSR-E 土壤湿度与站点一致性最好,同化效果也最好;站点 B 同化结果较依赖于 AMSR-E 土壤湿度,站点 B 的 AMSR-E 土壤湿度准确性存在一定问题时,同化效果欠佳;站点 C 同化过程的有效性与陆面过程模型的模拟能力也有较为密切的关系,当 AMSR-E 土壤湿度与模型模拟的土壤湿度存在较大差别时,AMSR-E 土壤湿度在同化过程中将会被认为无效。由站点 A, B, C 的 30 cm, 60 cm(第 3 层图略)的结果显示,AMSR-E 土壤湿度对表层模拟结果进行调整时,对中下层的模拟结果也有一定影响。比较而言,站点 C 中下层同化前后的差别更大,主要受 10 cm 同化作用大小

的影响。因此,土壤湿度同化过程的有效性一方面依赖于陆面过程模型的模拟能力,同时也依赖于同化的 AMSR-E 土壤湿度产品精度。

由此可见,本文同化过程在整体上较好地提升了土壤湿度模拟精度,但在不同区域同化过程所表现的有效性有所不同。为了提高土壤湿度的模拟精度,陆面模型以及同化方案仍需改进。

3.2 使用生态站数据对试验结果进行检验

利用 6 个生态站 10 cm, 30 cm, 60 cm, 100 cm 深度不同时间点的土壤湿度数据对试验 1、试验 2 的 4 层土壤湿度模拟结果进行统计检验。生态站土壤湿度数据为随机观测,每个站点在 2003 年的观测时间不相同,因此图 5~图 7 中的横坐标为观测的时间序列。

3.2.1 森林植被条件下的单点检验

图 5 为西双版纳站观测数据与试验 1、试验 2 模拟结果比较,长白山站与西双版纳站具有相似结果,篇幅所限未给出长白山站示意图,同样,草地植被条件和作物植被条件下的内蒙古站和桃园站示意图也未给出。由图 5 可知,LIS 整体上能较好地模拟森林植被条件下的土壤湿度变化特征。数据统计显示,西双版纳站试验 2 的结果与观测值的平均偏

差分别为 2.23%, 2.6%, 3.98% 和 3.98%, 试验 1 为 3.07%, 2.7%, 3.4% 和 6.7%。可见,除了西双版纳站 60 cm 同化为负效果外,其余深度经过同化过程后模拟精度均得到了提高。由图 5 可见,10 cm

与 30 cm 的土壤湿度变化曲线较为相似,这说明 0~30 cm 土壤湿度受地面影响较为直接,而 30 cm 及以下深度土壤湿度受地面影响较小,因此变化曲线与上层有明显差别。

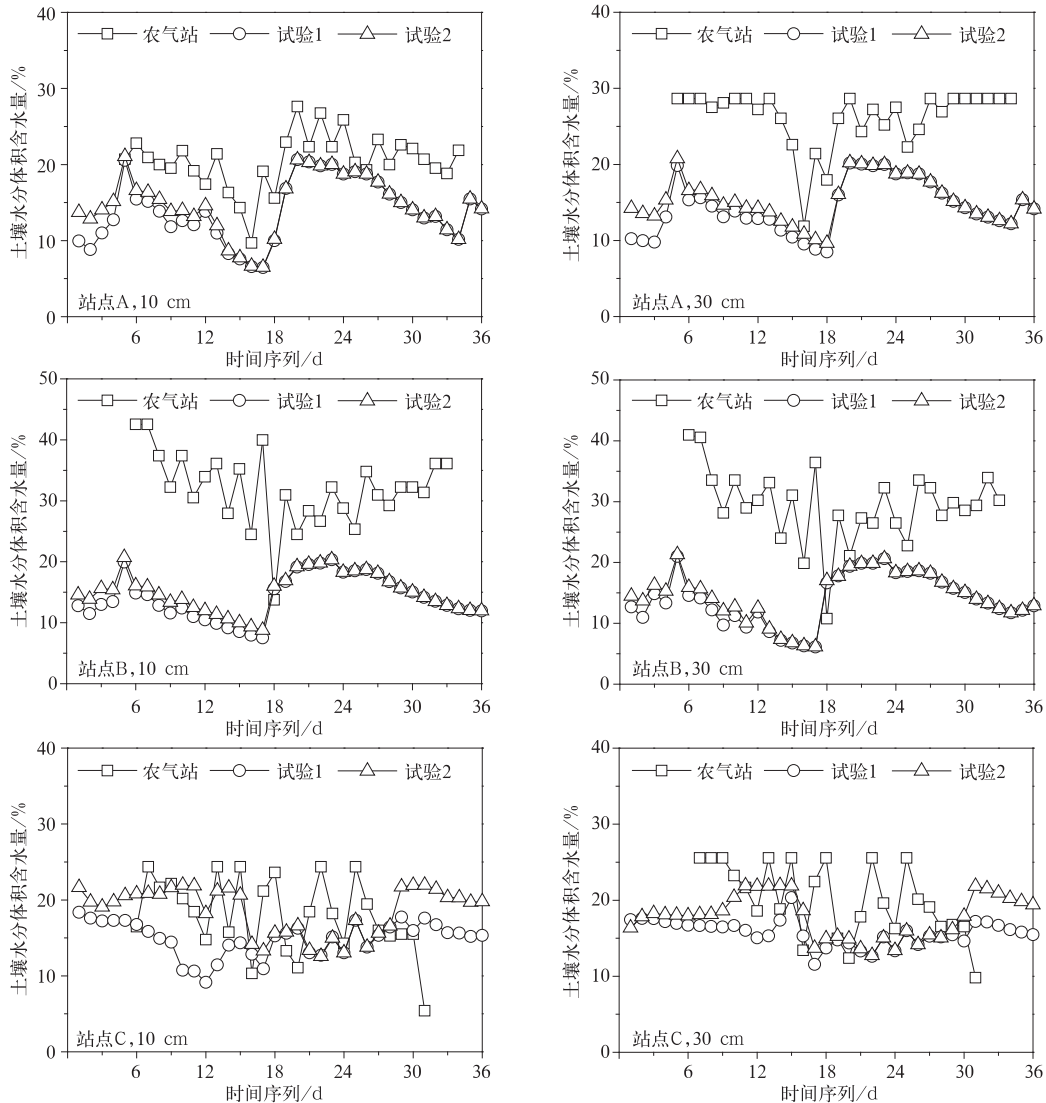


图 4 站点 A,B,C 农气站观测与试验 1、试验 2 的 10 cm,30 cm 模拟结果时间序列

Fig. 4 Soil moisture comparison of agro-meteorological-station observations, outputs of Experiment 1 and Experiment 2 at Station A,B and C

3.2.2 草地植被条件下的单点检验

图 6 给出了海北站观测数据与试验 1、试验 2 模拟结果对比。由图 6 可知,与森林生态系统相同,同化过程提高了对草地生态系统土壤湿度的模拟精度。数据统计显示,试验 2 的结果与海北站观测值的平均偏差分别为 0.71%, 5.7% 和 7.71%, 小于

试验 1 的 5.02%, 16.18% 和 14.55%。与森林站相比,草地站的土壤湿度在数值上较小,变化较森林站也相对缓和,草地站试验 1 的模拟结果与站点资料有较大误差,经过同化过程后精度得到很大提高。即同化过程对于草地生态系统的模拟精度提高效果要大于森林生态系统。

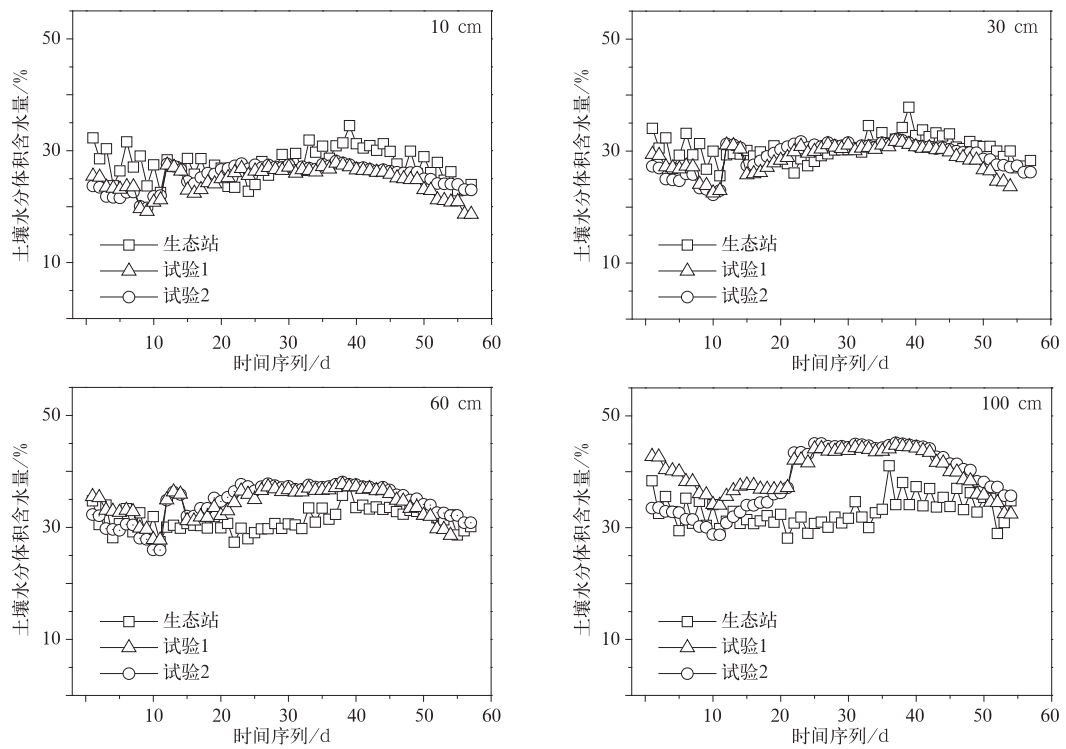


图 5 西双版纳站 2003 年土壤湿度观测值与试验 1、试验 2 模拟结果对比

Fig. 5 Soil moisture comparison of observations, outputs of Experiment 1 and Experiment 2 in 10 cm,30 cm,60 cm,100 cm layers at Xishuangbanna Station

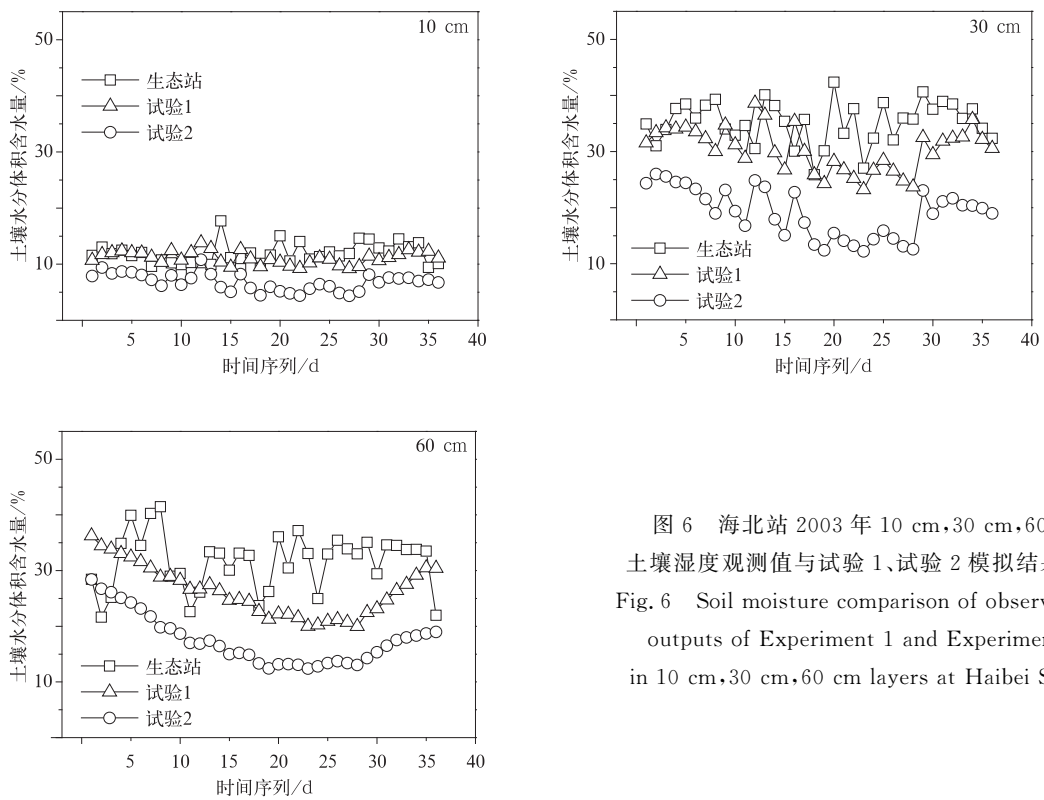


图 6 海北站 2003 年 10 cm,30 cm,60 cm 土壤湿度观测值与试验 1、试验 2 模拟结果对比
Fig. 6 Soil moisture comparison of observations, outputs of Experiment 1 and Experiment 2 in 10 cm,30 cm,60 cm layers at Haibei Station

3.2.3 作物植被条件下的单点检验

图7为封丘站观测数据与试验1、试验2模拟结果比较。由图7可知,在作物生态系统条件下,同样可以较好地模拟土壤湿度变化特征,同化过程也增强了土壤湿度的模拟精度。封丘站试验2的结果

与封丘站观测值的平均偏差分别为0.59%,2.9%,4.21%和8.76%,小于试验1的3.12%,9.17%,8.15%和11.31%。可见,LIS对于封丘站的模拟效果好,经同化过程后的模拟误差明显降低。

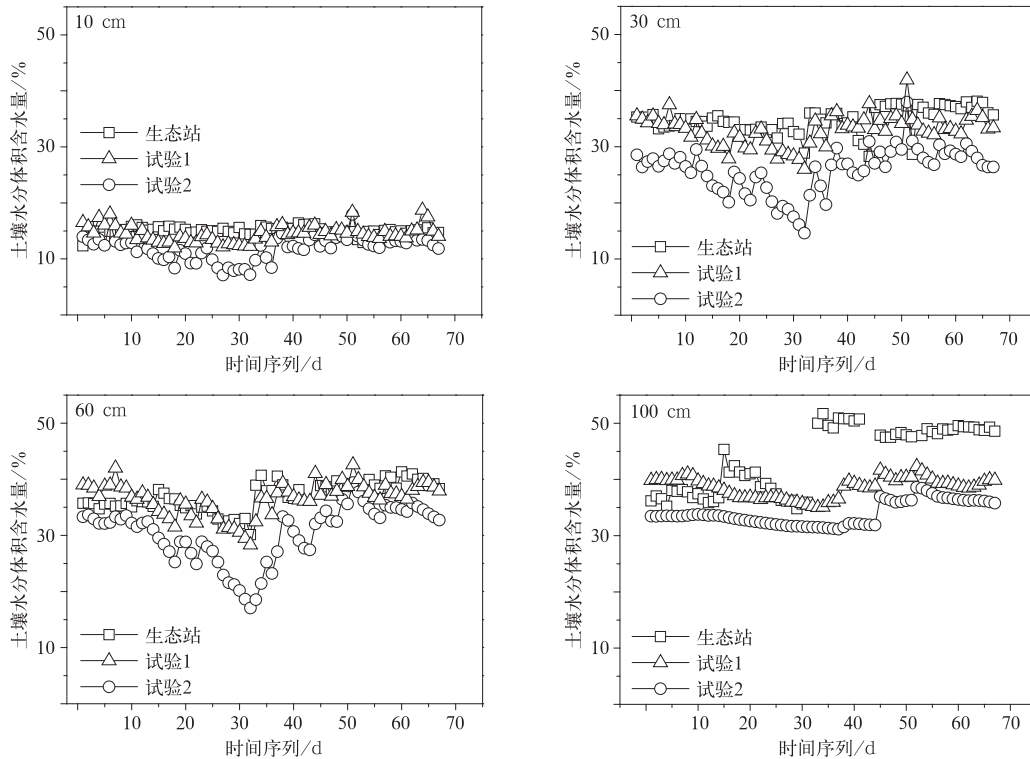


图7 封丘站2003年10 cm,30 cm,60 cm,100 cm 土壤湿度观测值与试验1、试验2模拟结果对比

Fig. 7 Soil moisture comparison of observations, outputs of Experiment 1 and Experiment 2 in 10 cm,30 cm,60 cm,100 cm layers at Fengqiu Station

3.2.4 不同植被条件单点检验结果比较

由上述分析可见,同化过程在森林生态系统、草地生态系统以及作物生态系统中都有提高土壤湿度模拟精度的作用,但在不同植被条件下的同化效果有所不同(表2)。6个生态站土壤湿度试验2模拟结果均较试验1更接近于观测值,除了桃园站的均

方根误差呈反效果。从各植被条件下的数值对比可见,LIS同化效果在草原生态系统中要好于其他生态系统,这一方面与AMSR-E土壤湿度在不同植被条件下的准确性有关,另一方面与陆面过程模型在不同植被条件下的模拟能力有关。

表2 不同植被条件下试验1、试验2 10 cm 土壤湿度模拟结果与生态站观测值对比(单位:%)

Table 2 10-cm soil moisture observations and outputs of Experiment 1, Experiment 2 in different vegetation conditions(unit:%)

统计量	森林生态系统		草地生态系统		作物生态系统	
	长白山站	西双版纳站	海北站	内蒙古站	桃园站	封丘站
试验1 偏差	6.97	3.07	5.02	3.22	3.36	3.12
试验2 偏差	5.27	2.23	0.71	1.90	2.49	0.59
试验1 均方根误差	8.65	4.09	5.66	4.32	4.10	3.89
试验2 均方根误差	7.62	3.76	2.53	3.53	4.26	1.79

注:以上数值均为土壤水分体积含水量平均值。

4 小 结

本文采用 LIS 的 NOAH 陆面过程模型及 2003 年 AMSR-E 土壤湿度产品,开展基于集合卡尔曼滤波的土壤湿度同化模拟试验,得到 2003 年垂直深度为 4 层、水平空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的土壤湿度模拟结果,结论如下:

1) 使用农气站和生态站观测资料对试验结果的数值精度及空间分布特征进行检验,结果表明:同化过程整体有效提高了模拟精度,模拟出的土壤湿度空间分布特征与实际相符。

2) 试验 2 土壤湿度模拟结果与观测数据相比给出了土壤水平尺度上更加详尽的信息,与卫星反演数据相比给出了土壤垂直尺度上更加丰富的信息。

3) 试验 2 土壤湿度模拟结果具有时空相对连续且精度相对准确的特性,可为气候变化和干旱监测提供作为参考的分析数据。

土壤湿度模拟同化过程有效性依赖于卫星反演产品的精度,AMSR-E 土壤湿度反演产品精度在个别地区和时段仍存在问题,而目前 AMSR-E 已停止运行无法提供产品,同时土壤湿度产品在反演过程中的反演误差会累积到同化过程中。今后的工作一方面可尝试同化我国 FY-3B 微波成像仪的土壤湿度产品,另一方面可尝试利用地表微波辐射传输模型直接同化卫星微波通道辐射亮温,进一步改进土壤湿度的模拟精度。另外,同化过程在不同植被条件下的效果有差别,这主要是陆面过程模型在不同下垫面条件下对土壤湿度的模拟能力存在差异所致,因此陆面过程模型的改进也是提高土壤湿度模拟精度的有效手段之一。

参 考 文 献

- [1] 全兆远,张万昌. 土壤水分遥感监测的研究进展. 水分保持通报,2001,27(4):107-113.
- [2] Lawford R G. An Overview of Soil Moisture and Its Role in the Climate System//Soil Moisture Modeling and Monitoring for Regional Planning, Proc No. 9 NHRI Symposium. National Hydrological Research Centre,1992.
- [3] 孙丞虎,李维京,张祖强,等. 淮河流域土壤湿度异常的时空分布特征及其与气候异常关系的初步研究. 应用气象学报,2005,16(2):129-138.
- [4] Koster R,Suarez M,Heiser M. Variance and predictability of precipitation at seasonal-to-interannual timescales. *J Hydrometeorol*,2000,1:26-46.
- [5] Yang F,Kumar A,Lau W K M. Potential predictability of US summer climate with 'perfect' soil moisture. *J Hydrometeorol*,2004,5:883-895.
- [6] 左志燕,张人禾. 中国东部夏季降水与春季土壤湿度的联系. 科学通报,2007,52(14):1722-1724.
- [7] Zhan Yanling,Lin Zhaohui. Therelationship between the June precipitation over the Mid-lower Reaches of the Yangtze River Basin and the spring soil moisture over the East Asian Monsoon Region. *Acta Meteor Sinica*,2011,25(3):355-363, doi:10.1007/S13351-011-0310-6.
- [8] 郭维栋,马柱国,王会军. 土壤湿度——一个跨季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(1):20-27.
- [9] Famiglietti J S,Wood E F. Evapotranspiration and runoff from large land areas; Land surface hydrology for atmospheric general circulation models. *Surveys in Geophysics*,1991,12:179-204.
- [10] Goodrich D C,Unkrich C L. KINEROS-A Kinematic Runoff and Erosion Model//Proc 2nd Federal Interagency Conf on Hydrologic Modeling. 2002.
- [11] 王磊,文军,张堂堂. 卫星被动微波遥感土壤湿度研究进展. 气象科技,2009,37(1):67-73.
- [12] 汪潇,张增祥,赵晓丽. 遥感监测土壤湿度水分研究综述. 土壤学报,2007,44(1):157-163.
- [13] Kumar S V,Reichle R H,Koster R D, et al. Role of subsurface physics in the assimilation of surface soil moisture observations. *J Hydrometeorology*,2009,10(6),1534. 10. 1175/JHM1134. 1.
- [14] 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.
- [15] Brian A C,Lohmann D,Kenneth E M, et al. Land surface model spin-up behavior in the North American Land Data Assimilation System (NLDAS). *J Geophys Res*,2003,108:22-27.
- [16] 林朝晖,杨小松,郭裕福. 陆面过程模式对土壤含水量初值的敏感性研究. 气候与环境研究,2001,6(2):240-248.
- [17] Sujay V K,Rolf H R,Christa D P L, et al. A land surface data assimilation framework using the land information system; Description and applications. *Advances in Water Resources*,2008,31:1419-1432.
- [18] McLaughlin D. An integrated approach to hydrologic data assimilation; Interpolation, smoothing, and filtering. *Advances in Water Resources*,2002,25:1275-1286.
- [19] 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.
- [20] 师春香,谢正辉,钱辉,等. 基于卫星遥感资料的中国区域土壤湿度 EnKF 数据同化. 中国科学:地球科学,2011,41(3):375-385.
- [21] Entekhabi D,Nakamura H,Njoku E G. Solving the inverse problem for soil moisture and temperature profiles by sequential assimilation of multi-frequency remotely sensed observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*,1994,32:438-

- 448.
- [22] Reichle R H, Entekhabi D. Downscaling of radio brightness measurements for soil moisture estimation: A four-dimensional variational data assimilation approach. *Water Resour Res*, 2001, 37(9): 2353-2364.
- [23] 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(1): 3405-3420.
- [24] Chen T H, Coauthors. Cabauw experimental results from the Project for Inter-comparison of land-surface parameterization schemes. *J Climate*, 1997, 10: 1194-1215.
- [25] Kenneth M. The Community Noah Land-Surface Model (LSM). NCEP/EMC, 2005.
- [26] Evensen G, van Leeuwen P J. Assimilation of Geosat altimeter data for the Agulhas current using the ensemble Kalman filter with a quasi-geostrophic model. *Mon Wea Rev*, 1996, 124: 85-96.
- [27] Pfaendner J, Bloom S, Lamich D. Documentation of the Goddard Earth Observing System (GEOS) Data Assimilation System Version. NASA Tech Memo:104606, 1995.
- [28] Derber J C, Parrish D F, Lord S J. The new global operational analysis system at the National Meteorological Center. *Wea Forecasting*, 1991, 6: 538-547.
- [29] Miller D A, White R A. A conterminous United States multi-layer soil characteristics dataset for regional climate and hydrology modeling. *Earth Interactions*, 1998, 2(2): 1-26.
- [30] 王秀明, 俞小鼎, 朱禾. NCEP 在分析资料在强对流环境分析中的应用. *应用气象学报*, 2012, 23(2): 139-146.
- [31] 许影, 丁一汇, 赵宗慈. 美国 NCEP/NCAR 近 50 年全球再分析资料在我国气候变化研究中可信度的初步分析. *应用气象学报*, 2001, 12(3): 337-347.
- [32] 元来福, 王继琴. 从农业需水量评价我国的干旱状况. *应用气象学报*, 1995, 6(3): 86-92.
- [33] 王晓云, 郭文利, 奚文, 等. 利用“3S”技术进行北京地区土壤水分监测应用技术研究. *应用气象学报*, 2002, 13(4): 422-431.

Assimilation Experiment of LIS Based on AMSR-E Soil Moisture Products

Yang Xiaofeng Lu Qifeng Yang Zhongdong

(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

Soil moisture is an important part of the soil, playing an important role in energy and mass exchange between land and atmosphere. It is an important environment factor and the process parameter of hydrology, meteorology and other researches. In order to accurately depict and understand the interaction between land and atmosphere, precise and high resolution soil moisture contour information is needed. But whether using the objective measurement or numerical prediction of land surface process simulation, soil moisture contour line with spatial-temporal continuum and good precision can't be obtained. In order to eliminate the error, data assimilation method (EnKF) is used to process passive microwave inversion products (AMSR-E) and land surface model (NOAH) outputs, and then shallow soil moisture information is transmitted to deeper soil layers by land assimilation system (LIS). These methods are used to calculate soil moisture with high precise, high resolution and low error. Through these methods, 4-layer (10 cm, 30 cm, 60 cm, 100 cm) soil moisture data with spatial resolution of 0.25° by 0.25° for the year of 2003 are obtained.

Agro-meteorological-station soil moisture data and ecological-station data are used to verify the 4-layer soil moisture results. The simulation accuracy of the land surface model is improved when data assimilation method is used, the simulation accuracy in different layers is different, and the accuracy in the grassland ecosystem is higher than that in crop and forest ecosystems. The spatial characteristics of assimilation results match with real values, which is high in the southeast and low in the northwest. Assimilation soil moisture data has more detailed information in horizontal scales compared to station data and has more de-

tailed information in vertical scales compared to the passive microwave inversion products.

The accuracy of the assimilation process depends on the passive microwave inversion products (AMSR-E). However, AMSR-E has stopped running and inversion errors of passive microwave inversion products will be accumulated in data assimilation run. In order to solve these problems, passive microwave inversion products of FY-3B can be used experimentally. Besides, assimilation experiment can be started by directly assimilate radiation brightness temperature of microwave channels. Simulation accuracy of soil moisture can be further improved through these processes. Effect of assimilation experiment is different in different vegetation, which mainly depends on capabilities of land surface model. Therefore, improving the land surface model is also an effective means to improve soil moisture simulation accuracy.

Key words: LIS; soil moisture; EnKF; AMSR-E; assimilation experiment

《应用气象学报》征稿简则

《应用气象学报》(双月刊)是大气科学理论与应用研究的综合性学术期刊,主要刊登反映新理论与新技术在大气科学中的应用,以及大气科学理论与实践相结合,应用于各个有关领域的研究论文、业务系统和研究简报;国内外大气科学与应用气象科学发展中的新动态与新问题的探讨与评论;国内外重要学术会议或研究、业务活动的报道;气象书刊评介。

投稿要求和注意事项:

1. 论点明确、文字精炼。摘要请按文摘四要素(目的、方法、结果、结论)撰写,列出 3~8 个关键词,作者姓名请附汉语拼音,所在单位请附中、英文全名、地名、邮编。要求中文摘要为 200~400 字,英文摘要为 500 个单词左右(并请附对应的中文译文)。

2. 插图请插入文中适当位置,要求准确、清晰、美观。图中物理量、单位请勿遗漏,中、英文图题及说明写在插图下面。表格请采用三线表形式,并列出中、英文表题。

3. 参考文献请择主要的列入,并请按文中引用顺序标号。期刊书写格式:作者. 文章题目. 刊名,年,卷(期):起止页. 专著书写格式:作者. 书名. 译编者. 出版地:出版社,出版年:起止页。

4. 计量单位请按《中华人民共和国法定计量单位》列出,已废止的单位请换算成法定计量单位。

5. 科技术语和名词请使用全国自然科学名词审定委员会公布的名词。外国人名和地名,除常用者外请注原文。

6. 网上投稿(<http://qk.cams.cma.gov.cn>)请同时寄送全体作者签名的《承诺书》(请网上自行下载)。稿件自收到之日起,将在 6 个月内决定刊用与否,来稿一经刊登,酌情收取版面费,并酌付稿酬。

7. 文中的数字及符号必须清楚无误,易混淆的外文字母、符号,请标注文种,大、小写,正、斜体,黑、白体,公式中的上、下标。

8. 本刊已加入“中国学术期刊(光盘版)”、“万方数据——数字化期刊群”和“中文科技期刊数据库”。本刊所付稿酬包含光盘稿酬和刊物内容上网服务报酬。凡向本刊投稿的作者(除事先声明外),本刊视为同意将其稿件纳入此两种版本进行交流。

欢迎投稿。投稿请登录 qk.cams.cma.gov.cn。

地址:中国气象科学研究院《应用气象学报》编辑部,邮政编码:100081;电话:(010)68407086,68408638;网址:qk.cams.cma.gov.cn; E-mail:yyqxzb@cams.cma.gov.cn, yyqxzb@163.com。