

辐射计观测模拟系统的设计与研究

付秀丽^{1,2}, 施建成¹, 郭英³, 蒋玲梅⁴

(1. 北京石油化工学院信息工程学院 北京 大兴区 102617; 2. 中国科学院遥感应用研究所 北京 朝阳区 100101;
3. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 石家庄 050021; 4. 北京师范大学地理学与遥感科学学院 北京 海淀区 100875)

【摘要】基于物理参数反演和卫星数据同化系统的发展需要,设计了一个结合陆面、大气和传感器特征,基于辐射传输模型的辐射计观测数据模拟系统。综合考虑地形、地表异质性、大气等影响,可以直接应用到数据同化系统,进而为校正数据同化模式的静态参数提供基础,同时提高对辐射机理的理解和认识,促进地球物理参数反演。利用该模拟系统,模拟了先进微波扫描辐射计(AMSR-E)的全球观测,并与卫星实测数据进行了对比,对粗糙度进行敏感性分析,其影响可达38 K。

关键词 微波; 辐射传输; 粗糙度; 模拟

中图分类号 TP721.1

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.01.012

Study on Radiometer Observation Simulation System

FU Xiu-li^{1,2}, SHI Jian-cheng¹, GUO Ying³, and JIANG Ling-mei⁴

(1. College of Information Engineering, Beijing Institute of Petro-chemical Technology Daxing Beijing 102617;
2. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences Chaoyang Beijing 100101;
3. Center of Agricultural Resources Research, Institute of Genetic and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences Shijiazhuang 050021;
4. School of Geography, Beijing Normal University Haidian Beijing 100875)

Abstract Based on radiative transfer model, a radiometer observation simulation system is designed, which include the effects of topography, heterogeneity, and atmosphere. The difference between simulated and measured brightness temperatures is analyzed, a sensitivity study is also carried out to assess the relative contributes of the roughness. It is found that the roughness introduces an uncertainty of 38 k. The developed simulation system should be very useful in modeling and improving our understanding of radiant mechanism.

Key words microwave; radiative transfer; roughness; simulation

随着对地-气系统复杂性的进一步研究,陆面数据同化系统逐步发展起来。辐射计测量数据越来越多地被用于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。为同化亮温,需要对基于地表重要辐射传输过程的理解与研究,把陆面过程模式输出的部分参数或状态变量通过观测模拟系统,模拟为卫星观测到的数据,经过与卫星实际观测值比较,为数据同化的后序步骤提供调整依据。

一个快速、准确的辐射计观测模拟系统,至少可以满足基于物理机制的地理参数反演和直接同化卫星数据两个应用^[1]。

1 亮温模拟系统的设计研究

地球表面复杂多变,辐射计象元尺度内可能包

括裸土、植被、海洋、湖泊等,有平地、高山,地形复杂。研究表明^[2-6]辐射计接收的信号受地表类型,如元异质性、地形、大气等多因素影响,因此构建完备的模拟系统,要综合考虑包含地表和大气各因素的作用和各种辐射传输过程。

辐射计观测模拟系统在陆面数据同化系统中是一种重要的观测算子。同化需要观测误差,观测误差协方差矩阵是仪器误差协方差矩阵和前向模型协方差矩阵的总和,前向模型协方差矩阵基于前向模型的估计误差。由于卫星观测越来越精确,因此估计前向模型的误差对观测误差协方差矩阵意义重大。文献[7]指出前向模型对同化结果影响很大。所以模拟系统应尽量正确。

基于物理机制的地球物理参数反演算法^[8]要求模拟系统能够用于从卫星数据中提取地表物理信息。

此外, 辐射计观测模拟系统必须足够快速以满足实时计算需求, 并要具备可扩展性, 以便应用于不同的观测平台。

综上所述, 基于辐射传输模型的辐射计观测模拟系统在设计上应满足如下要求: 1) 辐射过程完整, 全面考虑影响因素; 2) 运算快速, 能够满足全球实时应用; 3) 尽量准确, 辐射传输过程的近似处理不被引入显著误差; 4) 易扩展, 可以应用于其他观测平台, 并能够满足有云、无云、降雨等大气情况。

在卫星平台上的辐射计接收到的信号包括:

- 1) 透过大气的地表辐射亮度温度; 2) 大气的下行辐射经过地表反射之后, 又被大气衰减后的部分;
- 3) 大气上行辐射; 4) 宇宙空间冷背景(2.7 K)下行经过大气衰减后被反射又被大气衰减的贡献。如下式(计算公式均为海面高度(海拔为0起算)):

$$T_{bp} = T_{bp} \exp(-\tau_{au}) + T_{au} + \exp(-\tau_{au}) \times (T_{ad} + T_{sky} \exp(-\tau_{ad})) \gamma_p \quad (1)$$

式中, T_{bp} 为卫星观测亮温; p 为极化方式; T_{bp} 为地表辐射亮温; τ_{au} 为大气光学厚度; T_{au} 和 T_{ad} 分别为向上和向下的大气辐射; γ_p 为地表反射率; T_{sky} 为宇宙背景辐射(2.7 K)。辐射计接收亮温示意图^[9]如图1所示。

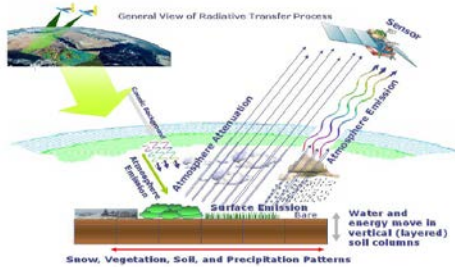


图1 辐射计接收亮温示意图

地表可以表示成不规则表面上的多层传输媒介, 本文考虑3层介质^[10], 如图2所示。上层和下层表示空间同质的具有统一介电常数的物质, 如顶层是介电常数为 ϵ_1 的空气, 下层是介电常数为 ϵ_3 的地表, 中间层是空间异质的散射体, 如雪粒子、植被覆盖等。

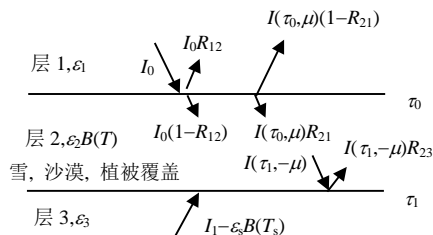


图2 地表结构示意图

3层的地表辐射传输方程^[10]为:

$$\mu \frac{dI(\tau, \mu)}{d\tau} = I(\tau, \mu) - \frac{\omega(\tau)}{2} \times \int_{-1}^1 P_s(\tau, \mu, \mu') I(\tau, \mu') d\mu' - [1 - \omega(\tau)] B(T) \quad (2)$$

文献[11]通过5种辐射传输计算方法进行对比分析发现, 在兼顾准确性的同时, Eddington二流近似能获得比较快的速度, 因此用二流近似^[10]求解式(2), 地表向上的发射率为:

$$\epsilon_p = \alpha R_{12} + (1 - R_{21}) \left\{ \frac{(1 - \beta)[1 + \gamma e^{-2\kappa(\tau_1 - \tau_0)}]}{(1 - \beta R_{21}) - (\beta - R_{21}) \gamma e^{-2\kappa(\tau_1 - \tau_0)}} + \frac{\alpha(1 - R_{12})[\beta - \gamma e^{-2\kappa(\tau_1 - \tau_0)}]}{(1 - \beta R_{21}) - (\beta - R_{21}) \gamma e^{-2\kappa(\tau_1 - \tau_0)}} \right\} \quad (3)$$

式中, $\alpha = I_0/\beta$; $\beta = (1 - \alpha)/(1 + \alpha)$; $\gamma = (\beta - R_{23})/(1 - \beta R_{23})$ 。从式(3)可以看出, 地表发射率主要取决于各层的光学厚度参数 (τ_1, τ_0) 和层间反射率 (R_{ij})。

被动微波遥感空间分辨率相对较低, 因此, 必须考虑象元地表异质性问题。借助热红外等其他高空分辨率的遥感地表覆盖产品判断象元异质性, 将地表的覆盖类型主要区分为裸露地表、植被覆盖区以及冰雪覆盖区、水表面, 用一个线性组合计算微波异质象元发射亮温:

$$T_{bp} = \sum_x f_x T_{B-x}(\theta, p) \quad (4)$$

式中, f_x 为异质象元不同地表覆盖类型的覆盖百分比; x 可表示裸土、植被、冰雪、水; $T_{B-x}(\theta, p)$ 用于计算不同类型地表的亮度温度。不同的地表覆盖已经发展了不同前向辐射传输模型^[11-18]。

地形主要通过3个方面影响辐射计观测^[4]:

- 1) 平坦表面的高度影响(大气路径); 2) 地形起伏对局地观测几何关系与极化旋转变化的影响; 3) 邻近效应和阴影效应(在不同的入射角、坡度角和方位角, 会使能够观测的坡面的面积增大或减小, 甚至在某些观测方向上被遮挡, 而无法观测, 即是阴影效应)。能够观测到面元的辐射则主要决定于向该面元所张的立体角。

局部表面的发射和反射关系如图3所示, 卫星观测角和局部入射角及旋转极化角的关系式^[4]为:

$$\cos \theta_l = \sin \theta \sin \alpha \cos \phi + \cos \theta \cos \alpha \quad (5)$$

$$\sin \varphi = \sin \phi \sin \alpha / \sin \theta_l \quad (6)$$

式中, θ_l 是局部入射角; ϕ 是旋转极化角。当局部入射角大于 90° 判断为阴影。

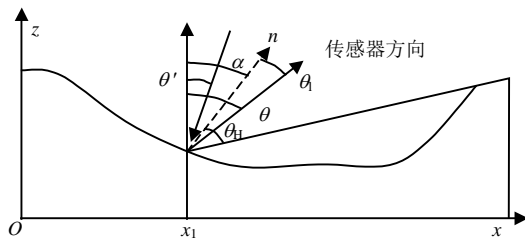


图3 地形起伏对局地观测的几何关系

地形起伏影响下的地表发射率 $E_V(\theta)$ 和 $E_h(\theta)$ 在全局参考系统(卫星-地球表面)里可表示为^[4]:

$$E_V(\theta) = E_{VL}(\theta_l) \cos^2 \varphi + E_{HL}(\theta_l) \sin^2 \varphi \quad (7)$$

$$E_h(\theta) = E_{VL}(\theta_l) \sin^2 \varphi + E_{HL}(\theta_l) \cos^2 \varphi \quad (8)$$

由于地表发射率普遍比较高(大于0.9),目前很多微波地表参数反演研究或忽略大气影响,或采用默认值,或采用区域参数化模型,但都不能很好地解决大气问题。通常说来,大气分子对微波的作用

主要集中在吸收、发射和散射。在晴空条件下,水汽和大气的云水在低频部分并不存在散射作用。对于平行平面无散射各向同性的假设情况下,可以采用解析法对辐射传输过程进行计算,本文采用 Eddington 二流近似方法^[19]。在中间层大气光学特性阶段计算过程中,大气中的氧气、水气对微波的影响采用了文献[20-21]给出的模型计算大气光学特性。

用陆面数据同化系统的输出模拟地表初始状态,因而设计可以考察误差积累对计算亮温的影响。定量个体随机误差和方差对系统优化分析非常重要。

综合地形、地表、大气等因素,辐射计观测模拟系统结构如图4所示。为满足可扩展性,整个模拟系统采用软件工程思想设计,模块化编程,随时可以引进最新发展的模型模拟或预研各种辐射计观测数据。

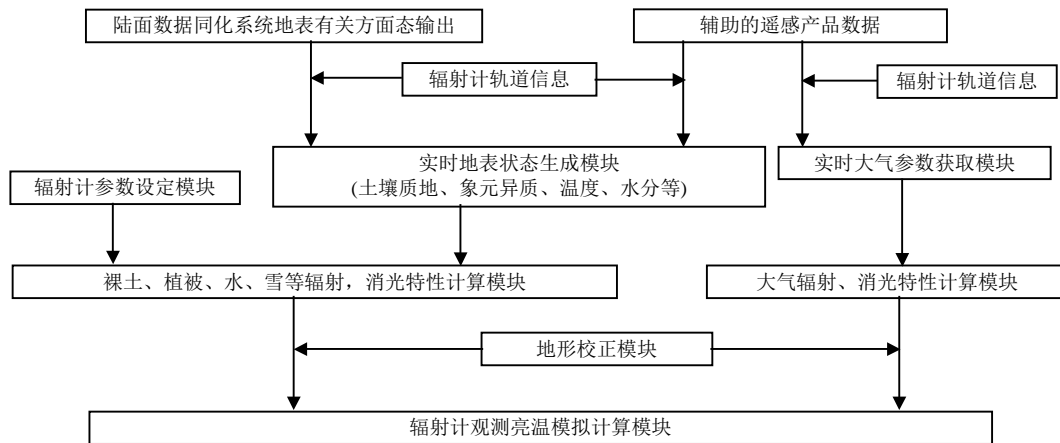


图4 辐射计观测模拟系统结构图

2 AMSR-E亮温模拟

高级微波扫描辐射计(advanced microwave scanning radiometer for EOS Aqua, AMSR-E)是一种被动式微波遥感仪,装载在美国地球观测卫星系统(earth observing system, EOS)的AQUA卫星上,于2002年5月4日发射,每日地方时间下午1:30过境,观测角度为55°,具有多个频率双极化,能够获取陆地、海洋和大气的参数,是目前分辨率较高的辐射计之一。

本文利用所设计的辐射计观测模拟系统模拟 AMSR-E数据,并与卫星实测进行比较分析。

2.1 地表状态模拟

地表状态主要包括地形、土壤及其覆盖物的物理状态参数。由全球陆面数据同化系统(GLDAS)和遥感产品提供。

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)、美国海洋和大气局(NOAA)国家环境预报中心(NCEP)联合开发。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,提供最优化近实时的地表状态变量(-60°~90°N, -180°~180°E)。其产品的空间分辨率有1°和0.25°两种,时间分辨率为3 h。本文采用分辨率更高的0.25°的NOAH产品数据, GLDAS产品数据格式为 GRIdded Binary(GRIB)格式, GLDAS同时提供植被冠层含水量,但由于在陆面模式中没有耦合植被生长模型,因此数据精度有限,本文没有采用其提供的植被数据。主要用到的地表状态变量如表1所示。

表1 GLDAS产品中用到的变量

变量名	说明
1 AvgSurfT/K	平均地表温度
2 SWE/kg·m ⁻²	雪水当量
3 SoilMoist1/kg·m ⁻²	第一层土壤(0~10 cm)的平均土壤水分

在linux环境下, 利用python语言编写程序从grib文件中提取所需变量, 利用fortran语言编写的程序, 根据辐射计过境时间合成地表状态图并进行变量单位转换, 模拟地表初始温度、水分和雪水当量状态。

植被信息利用中分辨率成像光谱仪(MODIS) 0.05°植被覆盖产品作为地球表面的植被状态。植被温度假设与地表温度相等。同时, 每个0.25×0.25的像元里面包括25个0.05°的地表覆盖像元, 用于计算每种地物所占比例作为像元异质信息。

土壤成分数据利用美国国家地球物理数据中心(NGDC)提供的全球8 km分辨率的土壤质地数据。

地形数据采用航天飞机雷达地形测绘任务(shuttle radar topography mission)分辨率为3 s的DEM地形数据。有效数据范围是北纬90°至南纬56°。根据地形数据计算出本地入射角和旋转极化角。

各分辨率不同的观测数据或产品数据根据最近邻法重采样成0.25°的等经纬度投影的数据, 以最后经过的测量值为准。在AMSR-E L2A级轨道亮温数据采样的同时进行GLDAS时间匹配, 得到时间同步的全球地表状态。

2.2 大气状态模拟

大气数据采用美国地球观测卫星系统(earth observing system, EOS)的AQUA卫星上MODIS分层大气数据(MOD07_L2), myd07提供根据压力分层的大气温度、露点温度和地理高度廓线。由于研究的产品不能提供实时的云的数据情况, 因此, 使用MODIS的产品质量控制数据获得晴空条件下的区域, 数据处理过程中, 利用IDL程序读出各个变量(包括质量)控制数据, 然后进行等经纬度投影。

在数据输入时, MODIS温度和压力可以直接输入辐射传输模型进行计算, MODIS 湿度廓线是根据压力分成垂直的20层进行计算。

3 模型选择

针对不同地表已经有很多算法计算表面反射率和光学厚度, 算法主要分为3类。第1类是经验回归算法, 这是一种直接的统计相关关系, 模型中使用的参数经常直接从有限的测量值中得到。其主要优点是简单、适应性强, 但其理论基础不完备, 缺乏对物理机理的足够理解和认识, 参数之间缺乏逻辑关系。它们一般仅具有局地应用价值, 对不同地区、不同条件, 往往可以得出多种统计规律, 所建立的统计模型缺乏广泛的普遍适用性。第2类是纯物理理论模型, 其特点是计算准

确, 理论基础完备, 适用宽波段, 适用于各种区域, 但是公式复杂, 运算速度慢, 很难直接应用于微波辐射计数据分析和地表参数反演, 难以满足实时要求。第3类是基于物理机制的参数化模型, 这类模型大多来源于物理理论模型, 参数物理意义明确, 计算准确, 形式简单, 并且运算速度快, 适合数据分析和参数反演。因此各模块在选择模型时, 基于模拟系统的要求, 主要选择基于物理机制的参数化模型。

4 模拟与比较

针对AMSR-E配置, 模拟2003年5月1日全球升轨观测数据。粗糙裸露地表用参数化模型^[23](QP模型), 其中介电模型采用应用较广的Dobson模型^[23]; 植被模型应用Wegmuller模型^[24], 其适用范围可达到1~100 GHz; 积雪模型选择考虑多次散射的干雪发射模型^[25], 水的前向模型选择文献[19]中所用的模型。由于QP模型不能应用到89 GHz, 所以没有模拟该频段。

辐射计观测模拟系统的模拟结果与辐射计实际观测该10.65 GHz的差值如图5所示, 可见对于垂直极化, 大部分相差在10 K以内。水平极化的模拟结果相对较差, 部分像元相差大于20 K。

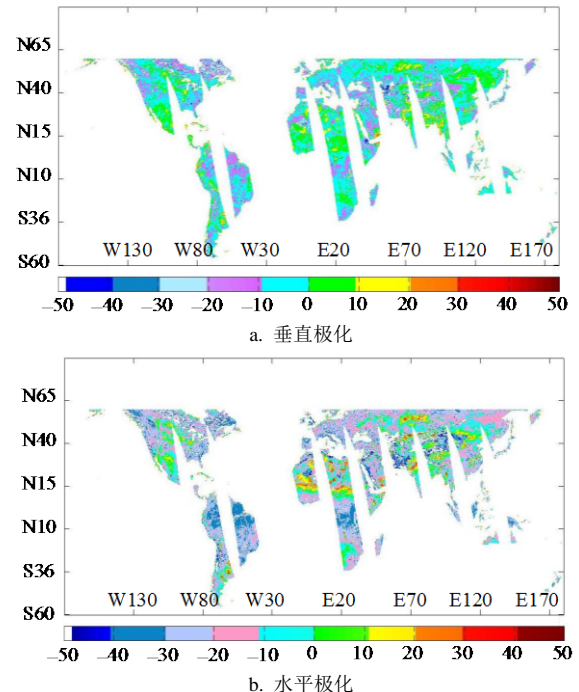


图5 模拟与实测差值分布图

AMSR-E亮温均方根误差(RSME)如表2所示。从表2可见, 垂直极化的模拟效果远远好于水平极化, 其原因可能是水平极化对地表粗糙度更为敏感。

表2 模拟结果与实际观测值的均方根误差

频率/GHz	水平极化H/K	垂直极化V/K
6.925	30.56	17.26
10.650	21.80	11.64
18.700	16.05	9.36
23.800	15.55	9.15
36.500	14.95	9.45

文献[12]表明,地表粗糙度对地表辐射特性的影响不能忽略,在全球范围内,粗糙度参数很难直接获取。本文研究中,粗糙度参数采用假定值势必引入模拟误差,图6表示了系统对粗糙度参数 S/L 的敏感性。可见,随着粗糙度参数的增大,垂直极化先变小然后略有增大,水平极化先上升然后下降。粗糙度的影响在垂直极化可达18 K,在水平极化可能达到38 K,可见,粗糙度对模拟结果影响很大。

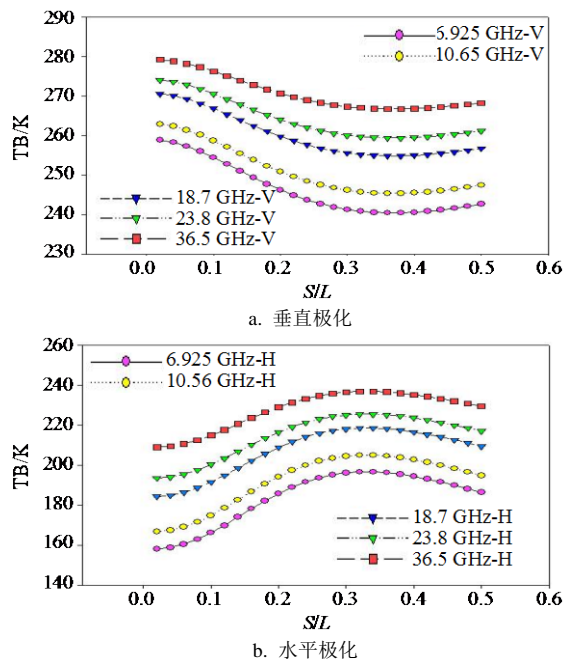


图6 粗糙度对模拟系统的影响

5 结论

本文研究了地-气辐射传输过程及其模型的发展,设计了基于辐射传输模型的辐射计观测模拟系统,模拟了AMSR-E观测数据,并与辐射计实际观测对比,对粗糙度参数做了敏感性分析,发现垂直极化效果较好。粗糙度对模拟系统影响较大,有待进一步研究。

目前,地-气过程发展了很多参数化模型,选择不同的模型会带来结构性误差;同时,同化系统的预报结果会导致输入误差,采用不同分辨率的辅助数据也会对模拟结果产生观测误差,对这3种情况的误差将在接下来的工作中给予研究。

参考文献

- [1] LIU Guo-sheng. A fast and accurate model for microwave radiance calculations[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 1998, 76(2): 335-343.
- [2] MÄTZLER C, HILTBRUNNER D, STANDLEY A. Relief effects for passive microwave remote sensing[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(12): 2403-2412.
- [3] NJOKU E G, CHAN S K. Vegetation and surface roughness effects on AMSR-E land observations[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, (100): 190-199.
- [4] TALONE M, CAMPS A, MONERRIS A, et al. Surface topography and mixed pixel effects on the simulated L-band brightness temperatures[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(7): 1996-2003.
- [5] WENG Fu-zhong, BANGHUA Y, NORMAN C G. A microwave land emissivity model[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(d17): 20115-20123.
- [6] SHI Jiang-cheng, JIANG Ling-mei, ZHANG Li-xin, et al. Parameterized multi-frequency-polarization surface emission model[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2005, 43(12): 2831-2841.
- [7] QIU Yu-bao, SHI Jian-cheng, JIANG Ling-mei, et al. Study of atmospheric effects on AMSR-E microwave brightness temperature over Tibetan Plateau[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium. [S.l.]: IEEE, 2007.
- [8] YANG Kun, WATANABE T, KOIKE T, 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]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2007, 85: 229-242.
- [9] 钟若飞, 郭华东, 王为民. 被动微波遥感反演土壤水分进展研究[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(1): 49-57.
- [10] ZHONG Ruo-fei, GUO Hua-dong, WANG Wei-min. Overview of soil moisture retrieval from passive microwave remote sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2005, 20(1): 49-57.
- [11] 邱玉宝. 陆面被动微波遥感大气影响分析与校正研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2008.
- [12] QU Yu-bao. Atmosphere influence analysis and its correction in passive microwave remote sensing over land [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [13] KIM M J, JAMES S J W. Intercomparison of millimeter-wave radiative transfer models[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2004, 42: 1882-1890.
- [14] WEGMULLER U, MATZLER C. Rough bare soil reflectivity model[J]. IEEE Tans Geosci Remote Sens, 1999, 37(3): 1391-1395.
- [15] 施建成, 蒋玲梅, 张立新. 多频率多极化地表辐射参数化模型[J]. 遥感学报, 2006, 10(4): 502-513.
- [16] SHI Jian-cheng, JIANG Ling-mei, ZHANG Li-xin. A parameterized multi-frequency-polarization surface emission model[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(4): 502-513.

(下转第79页)