doi:10.11676/qxxb2014.052 气象学报

沙漠地区土壤质地对不同频点微波地表发射率反演和模拟的影响*

吴 莹[1,2] 翁富忠[3]
WU Ying[1,2] WENG Fuzhong[3]

1. 南京信息工程大学 中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室,南京,210044
2. 南京信息工程大学 大气物理学院,南京,210044
3. NOAA/NESDIS/Center for Satellite Application and Research, College Park, MD 20742, USA
1. *Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing* 210044, *China*
2. *School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing* 210044, *China*
3. *NOAA/ NESDIS/ Center for Satellite Application and Research, College Park, MD* 20742, *USA*

2013-05-17 收稿,2014-04-28 改回.

吴莹, 翁富忠. 2014. 沙漠地区土壤质地对不同频点微波地表发射率反演和模拟的影响. 气象学报, 72(4): 749-759
Wu Ying, Weng Fuzhong. 2014. Effects of soil texture on the retrieved microwave emissivity at the different frequencies of a desert area and its modeling. *Acta Meteorologica Sinica*, 72(4): 749-759

Abstract In this study, the surface microwave emissivity of North Africa deserts is first retrieved from the AMSR-E (the Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System) measurements under clear atmospheric conditions. Then, the spectral characteristics of the retrieved emissivity are classified and analyzed with respect to the underlying soil texture types. The analyses indicate that the desert microwave emissivity is closely related with soil texture, and significantly varies with soil particle size and composition. For those soil texture types which are mainly dominated by large-size particles, the emissivity spectra of vertical (horizontal) polarization generally decrease (increase) with frequency. Yet, for those soil texture types which contain fairly small-size particles, the emissivity values are almost constant or slightly increasing (decreasing) with frequency for the vertical (horizontal) polarization. Furthermore, the microwave emissivity of the desert area also exhibits some seasonal variation, especially for the soils composed by small-size particles. The horizontal polarization (H-Pol) emissivity shows stronger seasonal variability than the vertical polarization (V-Pol) emissivity. These desert emissivity features are generally consistent with the simulations by the microwave land emissivity model of Weng et al (2001). The performance of Weng's model over the desert area has been greatly improved with its input parameters explicitly taking into account soil texture information including sand fraction and particle size, e.g., emissivity simulation bias of clay and clay loam decreased from 6% ,even 9% to less than 4%. Since Weng's model is an essential component in the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Global Forecast System (GFS), it is expected that such improvement would enhance the data assimilation over the desert area, and subsequently improve the accuracy of the numerical weather prediction (NWP) system.

Key words Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observation System (AMSR-E), Soil texture, Microwave land emissivity model, Desert area

---

* 资助课题:自然科学基金项目(41305033、41275043、41175035)、国家高技术研究发展计划资助项目 863 计划(2007AA061901)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)、南京信息工程大学校科研预研项目(2012X008)。
作者简介:吴莹,主要从事大气探测与遥感研究。E-mail: wuying_nuist@163.com

摘 要 首先运用先进微波扫描辐射仪(AMSR-E)资料反演了北非沙漠地区晴空条件下的地表微波发射率。然后根据不同的土壤类型,进一步分析了沙漠地表微波发射率频谱特性,并将增加土壤质地信息前、后的翁(Weng)氏微波地表发射率模型(2001)的模拟结果和反演结果进行了比较。结果表明,沙漠地表发射率与土壤质地密切相关,随土壤颗粒大小的不同变化明显。在沙漠土壤类型中,以大颗粒为主的土壤类型,其水平(垂直)极化的发射率通常随频率提高而增大(减小);而对于以较小粒子为主的沙漠土壤类型,地表发射率几乎为常数,或水平(垂直)极化的发射率随频率提高略有减小(增大)。并且,发射率的季节性特征明显,特别是以小颗粒组成的土壤,其水平极化的发射率比垂直极化的发射率表现出更强的季节性变化。以上这些发射率特征与翁氏模型模拟结果一致。此外,在翁氏模型的输入参数中增加土壤质地信息(土壤组分含量、粒径尺度)改善了翁氏模型在沙漠地区的模拟结果,特别是对于包含大量小粒子的沙漠土壤类型,如黏土和黏质壤土,模拟误差从6%—9%降低至4%以下。由于翁氏模型是美国国家环境预报中心(NCEP)全球同化和预报系统的重要组成部分,对翁氏模型的改进将提高沙漠地区卫星资料的利用率并有望改进数值天气预报的准确度。

关键词 先进微波扫描辐射计(AMSR-E),土壤质地,地表微波发射率模型,沙漠地区

中图法分类号 P422.2 TP722.6

1 引 言

随着现代遥测技术的不断改进和资料质量的提高,越来越多的卫星辐射观测资料通过数据同化系统被应用到数值天气预报领域中。作为同化各种卫星微波辐射资料所需要的一个重要参数(Errico, et al, 2007; 姚展予等, 2009; 王雨等, 2010; Yan, et al, 2011)——精确的地表发射率有利于提高全球中尺度天气预报的精度(Errico et al, 2007; Weng, et al, 2007),且地表辐射或有效反射率可直接用于监测裸露地表和植被覆盖地表的土壤水分(Mo, et al, 1987; Wegmuller, et al, 1999; Shi, et al, 2002; Zhao, et al, 2011; 金亚秋等, 1990; 施建成等, 2006; 陈亮等, 2009; 赵天杰等, 2009; 王磊等, 2006)。在同化过程中,需要运用前向辐射传输模式来模拟各种卫星通道的辐亮度或亮温(Weng, et al, 2007),并由此确定卫星观测数据的不确定性,而那些偏离模拟值太大的辐亮度或亮温观测通常在同化中被剔除,故前向辐射模拟的精度对资料的利用率以及后续的同化效果起着至关重要的作用。

前向模拟的精度受到模式中各种辐射过程,尤其是那些待定参数的影响。地表发射率的不确定性会大大降低星载微波辐射计探测资料的利用率,这就需要进一步改进目前现有的地表微波发射率模型,同时也需要发展新的发射率算法。

目前,中外有很多科学家正在持续研发可以直接放进数值天气预报模式的陆面地表微波发射率模型(Weng, et al, 2001, 2003; 刘硕松等, 2012; Pan, et al, 2012)。作为美国卫星探测资料同化联合中心(the U. S. Joint Center for Satellite Data Assimilation,JCSDA)通用辐射传输模式(Community Radiative Transfer Model,CRTM)的核心组成部分,Weng等(2001)开发的地表微波发射率模型(Weng, et al, 2005; Han, et al, 2006, 2010)已经被成功地用于美国国家环境预报中心的全球预报系统(GFS)。

然而,由于地形和地表的复杂性,同化系统中的陆表微波发射率模型仍然存在许多不确定性。从干旱的地表至茂密的植被或积雪等,陆表微波发射率取决于大量的地表参数(植被覆盖、土壤水分、表面粗糙度、冰或雪覆盖等);而且,这些地表参数的值在不同区域差异极大,故对于模型而言非常复杂。此外,陆表微波辐射率还是频率、偏振性以及卫星视角等的强函数。目前,对微波发射率的模拟和探测只是局限于有限的频率范围和地表类型(裸土、植被冠层和积雪等)(Jackson, et al, 1991; Fung, et al, 1992; Ferrazzoli, et al, 1996; Chen, et al, 2000, 2003; Weng, et al, 2001; Shi, et al, 2002; 施建成等, 2006)。提高微波地表发射率模型的模拟精度,对完善陆面同化过程等均具有非常重要的意义。

在Weng等(2001)陆表微波发射率模型中,沙漠通常被视为一种裸露土壤类型,并被当作一种密介质来处理。一些待定的模型参数,如密介质颗粒直径通常设定为常数(如1 mm),当频率超过80 GHz时,模型的发射率也假定为一个渐近常数。这些假定常数在一些地区可能明显偏离实际值,并由此成为模拟计算中的主要误差源之一。这种由模型参数不确定性造成的偏差,极大地影响了沙漠地区的微波观测数据同化,使得沙漠地区的卫星微波资料无法得到有效利用。因此,为了改进沙漠(或裸土)地区的微波遥测数据同化,提高微波资料的利用率,有必要对现有的地表参数量化及裸土发射率模

型本身的物理特性做进一步系统分析和改进。

在本研究中,首先用先进微波扫描辐射仪(Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System,AMSR-E)遥测资料反演出沙漠地表发射率谱的特征,并利用联合国粮农组织(FAO)(FAO, 1971—1981)和美国国家土壤地理数据集(the State Soil Geographic,STATSGO)(http://www.nrcs.usda.gov/technical/techtools/statsgo_db.pdf)定义的土壤类型,对反演的沙漠地表发射率谱进行分类分析。然后利用同样的分类法对 Weng 等(2001)模型的土壤参数进行分类,并测试了土壤质地参数(砂土含量、粒子尺度等)对沙漠地表发射率模拟的影响。通过对模型增加土壤质地因素前、后的模拟值比较,发现增加土壤质地信息可以有效地提高现有模型在沙漠地区的模拟精度。

2　沙漠地区地表发射率的反演计算

2.1　陆面微波发射率的反演方法

由于微波窗区通道的观测值受大气吸收、发射和散射的影响程度最低,地表发射率的反演较为准确。假设地表是平坦、镜面的,并且大气作为一种非散射平面,使用瑞利-金斯(Rayleigh-Jeans)近似,微波窗区通道的地表发射率可通过辐射方程(Weng, et al, 2001)由卫星亮温值导出

$$\varepsilon = \frac{T_b - T_u - T_d\Gamma}{\Gamma(T_s - T_d)} \tag{1}$$

式中,T_b 为卫星亮温观测值,T_s 为地表温度,可以由全球资料同化系统(GDAS)的输出得到;T_u 和 T_d 分别为上行和下行的大气辐射亮温,Γ 为大气透过率,可以用全球资料同化系统的温度和水汽廓线作为微波吸收模式的输入来计算。式(1)表明,卫星亮温值、地表粗糙度、地表温度和大气温、湿度廓线等的偏差均可能会影响反演的准确性(Yang, et al, 2011)。

2.2　研究区域

选取北非地区(4°—38°N,18°W—60°E)作为研究区域,这是因为该区域由卫星观测反演得到的地表发射率与其他地表类型相比存在最大的时空差异,再者沙漠地区植被稀少,土壤湿度极低,沙漠地表较为平坦,粗糙度较小,这就间接地减少了土壤质地参数以外其他因素在地表发射率分析中的影响。

2.3　资　料

利用 Aqua 卫星获取的 AMSR-E 亮温资料来反演陆地表面发射率,式(1)中的大气辐射分量以及大气透过率由美国国家海洋和大气局(NOAA)的通用辐射传输模式(CRTM)结合 NCEP 提供的全球资料同化系统的温、湿度廓线和地表温度计算得到。土壤质地分类数据由 NOAA 的 NOAH 陆面模拟系统(ftp://ftp.emc.ncep.noaa.gov/mmb/gcp/ldas/noahlsm/ver_2.7.1)提供。所有这些资料将用来分析晴空条件下北非沙漠地区不同土壤类型的地表发射率变化特征。除此之外,为了避免水体对地表发射率反演结果的影响,用陆地、海洋分布数据滤除研究区域内河流、湖泊等水体区域的数据。

2.3.1　卫星观测数据

采用 2008 年 Aqua/AMSR-E 降轨全球 0.25° 分辨率格点亮温数据。AMSR-E 是由先进的微波扫描辐射计改进而来,它搭载在美国宇航局对地观测卫星 Aqua 上(于 2002 年发射升空)。AMSR-E 提供 6.925、10.65、18.7、23.8、36.5 和 89.0 GHz 6 个频率、双极化共 12 个通道的微波观测值,主要用于观测大气、陆地、海洋和冰圈的参数(包括降水、海面温度、海冰年代和覆盖、雪水当量、表面湿度、表面风速、大气云水和水汽等)。

2.3.2　全球资料同化系统的数据

全球资料同化系统的大气廓线和地表参数可以作为通用辐射传输模式(CRTM)的输入,从而可以用来计算式(1)中的大气透过率、大气的上行和下行辐射。目前,全球资料同化系统通过同化所有的探空和卫星探测资料产生每天 4 个时次温度和水汽廓线的分析资料。本研究中,全球资料同化系统格点数据都经过重采样。由于全球资料同化系统数据是 360°×180°的格点数据,精度为 1°×1°,每天 4 个时次(00、06、12、18 时,世界时,下同),通过对时间和地理位置,即经纬度进行插值,使得全球资料同化系统资料在时间和空间上与 AMSR-E 的轨道像素相匹配。

全球资料同化系统资料与 AMSE-E 卫星资料时空匹配的具体步骤如下:

(1)直接读取每天的 AMSE-E L2A 亮温数据,获取每个像素的亮温值、过境时间、经度和纬度;

(2)将步骤(1)得到的全球范围的数据信息处理成 0.25°×0.25°的格点数据(包含每个像素的亮温值、过境时间、经度和纬度);

(3)读取全球资料同化系统资料,获取精度为 1°×1°每天 4 个时次(00、06、12、18 时)的全球范围

的地表和大气廓线参数；

(4)本研究仅讨论陆地表面，根据海陆分布数据，去除海洋数据。以步骤(2)的 AMSE-E 格点数据(每个像素的过境时间、经度和纬度)作为基准，将读取的每天 4 个时次的全球资料同化系统资料按一定权重同时进行经、纬度和时间上的差值，得出和步骤(2)的 AMSE-E 格点数据于时间上和地理经、纬度(空间)相匹配的全球资料同化系统格点资料(0.25°×0.25°)。

2.3.3 全球土壤质地分类数据库

采用 NOAH 陆面模式系统中的全球土壤质地分类数据库来对北非沙漠地区的土壤进行质地分类，并分析不同土壤质地类型的沙漠地表发射率特征。

NOAH 陆面模式系统中的土壤质地类型数据库包括全球 19 种土壤质地，分辨率为 1 km。它是基于联合国粮农组织(Zobler，1986)的土壤单元和土壤质地等级发展起来的。联合国粮农组织的原始土壤数据包含 106 种基本的土壤单元和与该单元相关的土壤质地（即颗粒大小)，土层坡度，最大含水量等数据。对于土壤学以外的许多应用，联合国粮农组织数据显得过分细化。NOAH 陆面模式系统中的土壤质地类型数据库利用联合国粮农组织中的土壤质地量化数据，并根据美国农业部(USDA)土壤质地的三角形分类法(http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/gcp/sfcimg/soiltex/index.html)来简化并命名相应的质地类型。不同土壤的质地按不同百分比的砂土、粉土和黏土来定义。这个数据库既适合大尺度的气候研究，也适合土壤学、农业、林业和水文等的小尺度研究。根据这一数据库，北非地区存在 14 种质地的土壤。

2.4 雨、云中液水和冰粒对反演结果影响的滤除

大气中的雨水、云中液态水和冰粒子可以显著改变亮温，特别是在频率高于 10 GHz 时。为了使从卫星测量值反演的表面发射率更加准确，需要确定由大雨和冰粒子引起的大气散射改变了的观测值。本研究用散射指数(Wilheit，et al，2003)排除受大气散射影响的像素。

3 沙漠地区地表发射率的变化特征

理论上，由式(1)可计算得到 AMSR-E 在全球范围的地表发射率，本研究仅讨论沙漠地表发射率和土壤类型的关系。根据 NOAH 陆面模式获得的地表纹理和土壤质地信息(图 1，表 1)，对北非沙漠地区不同土壤类型的 AMSR-E 地表发射率进行了分组计算。

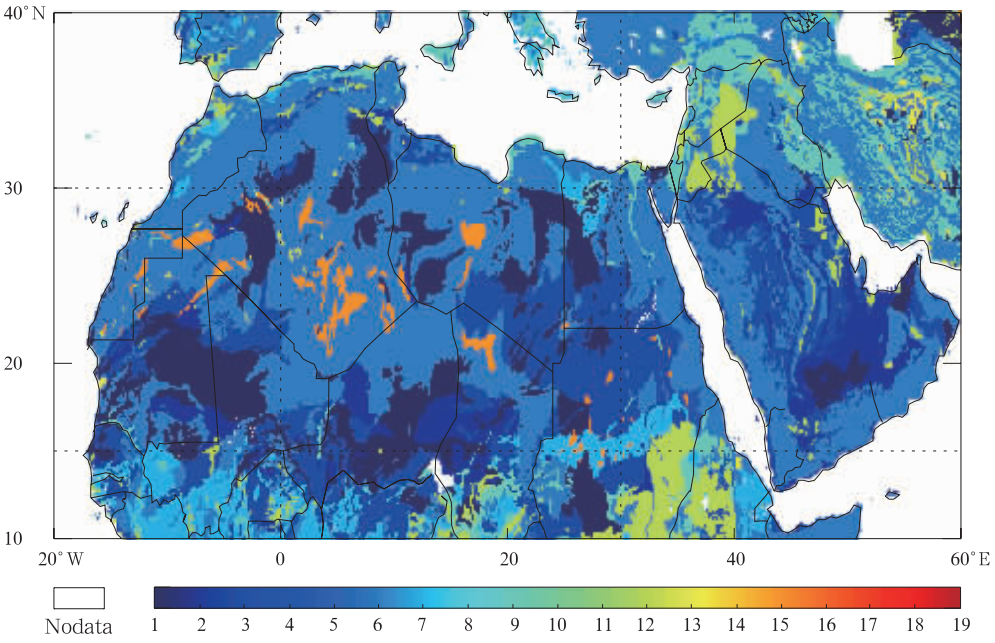


图 1 北非地区土壤类型分布

Fig. 1 Soil texture in northern Africa

表 1　土壤质地代码

Table 1　The code of soil texture

质地代码	质地类型	
	全球	北非地区
1	砂土(sand)	砂土(sand)
2	壤质砂土(loamy sand)	壤质砂土(loamy sand)
3	砂壤土(sandy loam)	砂壤土(sandy loam)
4	粉砂壤土(silt loam)	粉砂壤土(silt loam)
5	粉土(silt)	粉土(silt)
6	壤土(loam)	壤土(loam)
7	砂黏壤土(sandy clay loam)	砂黏壤土(sandy clay loam)
8	粉砂黏壤土(silty clay loam)	粉砂黏壤土(silty clay loam)
9	黏壤土(clay loam)	黏壤土(clay loam)
10	砂质黏土(sandy clay)	砂质黏土(sandy clay)
11	粉砂黏土(silty clay)	粉砂黏土(silty clay)
12	黏土(clay)	黏土(clay)
13	有机质(organic materials)	有机质(organic materials)
14	水(water)	/
15	基岩(bedrock)	基岩(bedrock)
16	陆冰(land-ice)	/
17	干盐湖(playa)	/
18	火山岩(lava)	/
19	白砂(white sand)	/

沙漠地表的发射率因土壤组成的不同发生显著的变化(图 2)。总体而言,不同地表类型的垂直极化发射率均随频率提高而呈逐渐减少趋势,而水平极化发射率则随频率提高而逐渐增大,极化差异随着频率增高而逐渐减少。可以看出,砂土和壤质砂土比较接近,砂壤土、粉土和粉壤土比较接近,壤土、黏壤土和粉质黏土比较接近,砂质黏土和粉砂黏壤土比较接近。

与上述砂土含量较高的土质相比,有机物、黏土和基岩的土壤发射率较低。当频率高于30 GHz时,粉砂黏壤土、砂质黏土、基岩的发射率几乎保持不变。砂土含量较高的土壤,如砂土、壤质砂土和砂壤土在较低频率一般显示出较大的极化差异,而黏土含量较高的土壤,如黏土、砂质黏土和砂质黏壤土的极化差异较小。这些特征可能与分层和材料介电性有关。

需要注意的是,在 18—23 GHz,发射率突然增大,这和通常的地表发射率频谱特征(一般为平滑曲线)(Ulaby, et al, 1986; Ferrazzoli, et al, 1996; Weng, et al, 2001)不一致,可能是由反演计算过程中的一些不确定性因素造成的(Yang, et al, 2011)。

尽管沙漠地区以干燥的裸土为主,研究区域内仍有一些稀疏植被。这些沙漠植被也会随季节和有限的降水发生一定程度的季节变化。接下来,进一步分析不同地表的微波发射率随季节的变化趋势。

由于粉砂黏壤土等的微波发射率变化较低,这

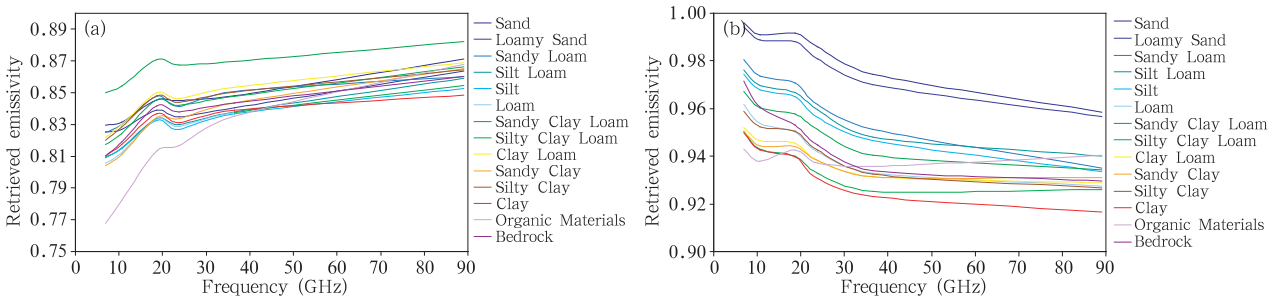


图 2　2009 年 1 月 1—5 日 AMSR-E 地表发射率反演平均值和土壤质地的关系(a. 水平极化,b. 垂直极化)

Fig. 2　AMSR-E retrievals of mean land surface emissivity vs. soil texture classes as a function of frequency, 1－5 January 2009(a. Horizontal polarization, b. Vertical polarization)

里仅仅比较砂土、壤质砂土、砂壤土、壤土、砂质黏壤土、黏壤土和黏土等 7 种地表。图 3a—h 是这 7 种地表的微波发射率在春、夏、秋、冬的变化。总的看来,砂质黏壤土的发射率一年四季变化较大,达到 0.07 左右;其次是黏土,达到 0.05 左右;其他地表的发射率随季节变化不明显,这可能与地表温度,土壤温、湿度,植被覆盖及生长状况有关。黏性土质一般具有较好的储水能力,因此土壤湿度和植被覆盖度较高。事实上,由图 3 可见,各种地表在夏季的发射率比在春、秋、冬季的略偏低。而且,水平极化的发射率比垂直极化的发射率表现出更强的季节变化特征。这是由于夏天雨水相对较多,植被生长旺盛,地表土壤所含的水分较多,使地表发射率略偏低。地表土壤含水量、植被含水量、叶片厚度对地表发射率的季节变化起重要作用(Weng, et al, 2001)。而与植被覆盖度紧密相关的地表粗糙度不仅决定地表的反射特性,而且也影响微波的极化,特别是水平方向的极化(Wang, et al, 1983; Mo, et al, 1987)。

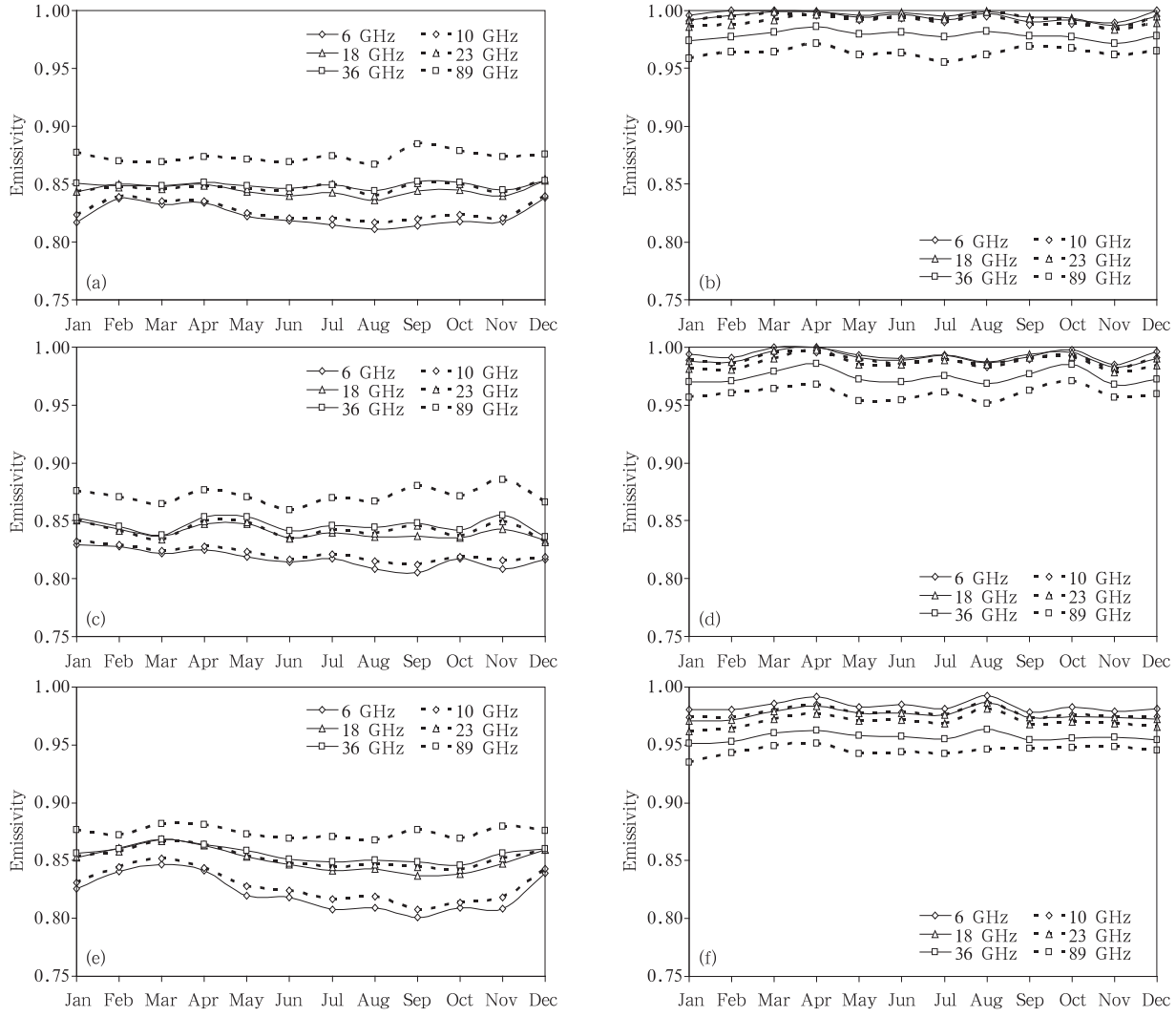


图 3 2008 年北非地区不同地表类型 AMSR-E 各个通道反演的地表发射率随时间的变化

(a、c、e、g、i、k、m. 水平极化,b、d、f、h、j、l、n. 是垂直极化;a、b. 砂土,c、d. 壤质砂土,e、f. 砂壤土,g、h. 壤土,i、j. 砂质黏壤土, k、l. 黏壤土,m、n. 黏土)

Fig. 3 Retrieved emissivities of each AMSR-E channel for the different soil types over northern Africa in 2008

(Left panels are for horizontal polarization, and right panels are for vertical polarization)

(a) and (b) sand, (c) and (d) loamy sand, (e) and (f) sandy loam, (g) and (h) loam, (i) and (j) sandy clay loam, (k) and (l) clay loam, and, (m) and (n) clay

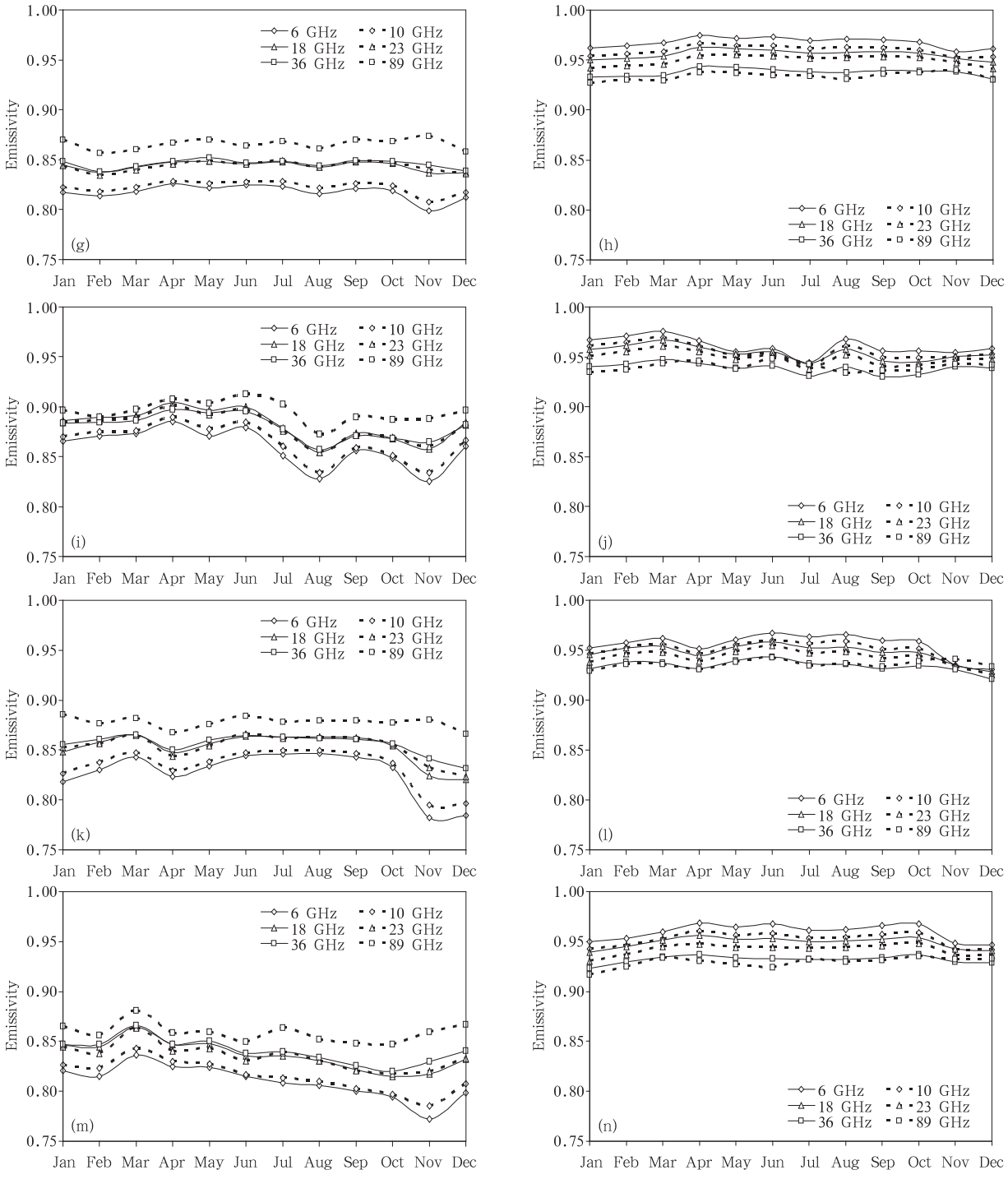


图 3 续

Fig. 3　(Continued)

4　微波地表发射率模型

Weng 等(2001)用二流近似发展了一个微波地表发射率模型。该模型不仅考虑了不同地表(如雪覆盖、沙漠和植被)的发射和散射过程,也考虑了发生在散射层上、下界面的反射和透射。而且,根据不同的频率范围,该模型给出了水平和垂直极化发射率对地表粗糙度的依赖函数。对于植被冠层,因为叶片尺度明显大于波长,该模型用几何光学导出相应的光学参数。对于一个有着较高粒子密度的介

质,如沙漠,该模型用密介质理论近似计算散射和吸收系数。目前,该模式已经包含了陆地表面大部分重要的辐射传输过程,从而可以应用于全球大部分陆地表面。

尽管该模式可以很好地模拟多种表面的发射率,但在沙漠地区该模型的计算偏差仍然较大。其原因之一是模型中的一些重要参数值存在不确定性,如散射体的几何尺度几乎无法从常规观测资料中获取。对于这些从常规观测资料中几乎无法准确确定的模式参数,模型一般设定其为常数。如在现有的模型版本中,沙漠土壤粒子的大小设置为1.0 mm,土壤的砂土含量设置成80%等。显然,这些参数的设定值并不适用于各种不同土壤类型,因而成为目前该模型的主要误差来源。为了减少模型参数不确定性对该模型的影响,利用该模型更详细地分析土壤质地对地表微波发射率的影响,首先从NOAH陆面模式的土壤质地数据库得到北非沙漠地区土壤质地类型、粒径尺度、砂土含量和黏土含量,然后用美国农业部分类法定义不同土壤类型的黏土、粉土和砂土比例,以及矿物颗粒的变化,并由此调整不同土壤类型对应的模式参数值。如下节所述,这种细化的模式参数可以非常有效地提高该模型在沙漠地区的模拟精度。

5 地表发射率反演结果和模拟结果的比较

从NOAH陆面模式土壤质地数据库得到本研究区域内的土壤类型分布以及相关的颗粒尺度、砂土百分含量和黏土百分含量分布情况。用该信息调整Weng等(2001)微波地表发射率模型计算中的参数,并且当粒子尺度接近或大于微波波长时,增加了米散射理论来计算粒子的散射。

需要注意的是,本研究使用的各种土壤类型中的粒径尺度、砂土含量和黏土含量等均为相应类型土壤的平均值。实际上,这些值在各种土壤类型中都有一定的取值范围,如,砂土类型的土壤,粒径尺度范围为0.05—2 mm,根据粒径尺度,从小到大又将之细分为极细小、细小、中等粗糙、粗糙、极粗糙这5种砂粒,而砂土含量范围则超过85%(含)。因此,本研究中使用的粒径尺度和土壤组分分布信息与实际的土壤类型尚有差别。

为了分析发射率和不同土壤质地的关系,用Weng等(2001)模型结合NOAA全球资料同化系统资料来模拟北非沙漠区域的发射率,并将模拟结果与卫星反演的发射率做比较。同时,为了更好地体现发射率和不同土壤质地的关系,去除了有植被覆盖的区域。根据全球资料同化系统给出的全球土壤湿度数据,可近似地认为,土壤湿度(取值范围为0—1)大于0.02地区生长着植被。

以卫星观测值反演的发射率作为"真值",来分析模拟的发射率偏差(图4)。图4a为用式(1)反演计算得的36.5 GHz垂直极化时的地表发射率,图4b、c分别为原有模型计算的发射率偏差和增加土壤质地差异并调整模式后的发射率偏差。由于水体亮温较低,而陆地亮温较高,故需要注意卫星观测到的海岸线附近陆地的亮温可能受到海洋发射的影响。

从图4b可以发现,最大偏差出现在包含大量小粒子的土壤类型区域中,如壤土、砂质黏壤土、黏壤土和黏土。在目前的Weng等(2001)模型版本中,对于沙漠散射体,密介质颗粒直径设置为1.0 mm,砂土体积含量设置为80%,这些常数对于黏土含量较高的土壤明显偏大。实际上,壤土、砂质黏壤土、黏壤土和黏土的直径远小于1.0 mm,尤其是黏土颗粒直径小于0.002 mm。而且,对于黏土含量较高的土壤,砂土体积含量应该远小于80%。

图4b中椭圆圈中的区域,原模拟偏差在6%—9%,经过改进后模拟偏差减为4%,甚至更小(图4c)。可见,在沙漠地区,Weng等(2001)模型的主要误差源是模式参数值的不确定性。经过模式参数的调整并且增加米散射计算后,模拟偏差相应减小,图4c中的发射率偏差总体上比图4b中的减小很多,特别是对于包含更多小粒子类型的土壤。例如,图4b中偏差最大的第3个椭圆形区域内,由图1可知,主要是以由小粒子组成的黏土和黏壤土为主。在此,为了便于计算,仍设定沙漠土壤组分为砂土和黏土两种(将美国农业部定义的粉土归入黏土一类),取的是每种土壤的平均含量和粒径尺度(表2),实际上,每一种土壤的组分含量和颗粒直径都有一定范围。如壤质砂土类型的土壤,黏土含量为10%—20%,粉土含量为0—15%,砂土的含量为70%—90%;而黏土颗粒的直径在0.002 mm以下,粉土颗粒的直径为0.002—0.05 mm,砂土颗粒的直径为0.05—2 mm。此外,偏差也与材料的介电特性(如石英的发射率比石灰石高)有关。

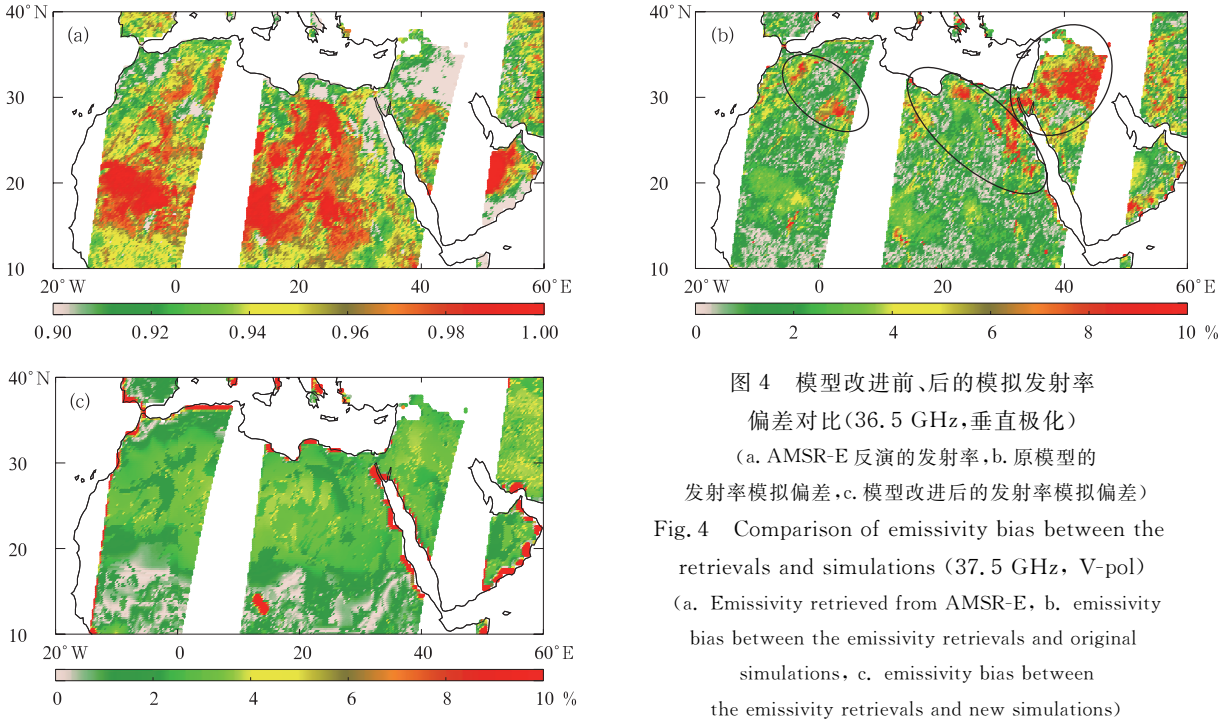


图 4　模型改进前、后的模拟发射率偏差对比(36.5 GHz,垂直极化)
(a. AMSR-E 反演的发射率,b. 原模型的发射率模拟偏差,c. 模型改进后的发射率模拟偏差)

Fig. 4　Comparison of emissivity bias between the retrievals and simulations (37.5 GHz, V-pol)
(a. Emissivity retrieved from AMSR-E, b. emissivity bias between the emissivity retrievals and original simulations, c. emissivity bias between the emissivity retrievals and new simulations)

表 2　土壤质地参数值

Table 2　Setting of the soil texture parameters

土壤类型	调整前的参数值			调整后的参数值		
	砂土含量(%)	黏土含量(%)	直径(mm)	砂土含量(%)	黏土含量(%)	直径(mm)
砂土	80	20	1	92	8	0.34704
壤质砂土				83	17	0.315585
砂壤土				65	35	0.252675
壤土				40	6	0.1653
砂质黏壤土				60	4	0.2352
黏壤土				32	68	0.13734
黏土				20	8	0.0554

6　结论和讨论

用 AMSR-E 亮温资料以及微波辐射传输模式反演了北非地区晴空条件下的地表发射率,并结合 NOAH 陆面模拟系统中的土壤质地分类信息,分析了该地区不同土壤类型的微波地表发射率的变化特征。根据美国农业部三角形分类法确定了不同类型土壤的黏土、粉土和砂土含量,以及土壤粒径尺度的变化,并由此调整现有的 NOAA 陆表微波地表发射率模式中的参数。比较了研究区域内新模拟的地表微波发射率与原模拟发射率误差。初步得到以下一些结果:

(1)地表发射率与地表类型密切相关。富含砂土的土壤的地表特性比较接近,如砂土和壤质砂土;富含粉土的土壤的地表特性比较接近,如粉土和粉砂壤土;富含黏土的土壤的地表特性比较接近,如砂质黏土和粉砂黏壤土;而壤土、黏壤土和粉土黏土比较接近。有机物、黏土和基岩的土壤的发射率较低。砂土含量较高的土壤一般显示较大极化差异,而黏土含量较高的土壤极化差异较小。这些特征可能与分层和材料矿物特性有关,如在微波波段,石英的发射率比石灰石高。陆面微波发射率的季节变化因不同地表而略有不同。

(2)地表发射率随矿物颗粒的差异变化明显。以大尺度颗粒为主的土壤类型,其水平(垂直)极化的发射率通常随频率提高而增大(减小);而对于以

较小粒子为主的沙漠土壤类型,频率高于 30 GHz 时地表发射率几乎为常数。此外,以小尺度颗粒组成的土壤,其发射率的季节性特征较明显,而且其水平极化的发射率比垂直极化的发射率表现出更强的季节性变化。

(3)地表发射率依赖于土壤质地的特性也要求理论模型在其实际应用中相应地考虑土壤质地的影响。土壤质地信息的增加,即增加了土壤组分含量、粒径尺度等参数的具体值,改善了 NOAA 陆表微波地表发射率模型在沙漠地区的模拟结果,特别是对于包含大量小粒子类型的沙漠土壤,调整参数后的模式模拟误差得到相当程度的减小。如在研究区域内,对于以由小粒子组成的黏土和黏壤土为主的土壤类型,模拟误差从 6%—9%降低至 4%以下。

本研究目前仅采用 2008 年的 AMSR-E 卫星降轨资料对北非地区的陆面微波发射率进行了研究,今后将进行更长时间范围的分析,更加全面地给出该地区发射率变化特征。同时,对于发射率时空变化的具体原因、升轨和降轨之间的差异还有待于结合更多资料和试验数据加以分析与验证。

致谢:感谢 NOAA/NESDIS/Center for Satellite Applications and Research (STAR) CalVal Program 对本研究的支持。

参考文献

陈亮,施建成,蒋玲梅等. 2009. 基于物理模型的被动微波遥感反演土壤水分. 水科学进展,20(5):663-667

金亚秋,张俊荣,赵仁宇. 1990. 多频段微波辐射计对土壤湿度的遥感和理论计算. 环境遥感,5(3):195-203

刘硕松,董佩明,韩威等. 2012. RTTOV 和 CRTM 对"罗莎"台风卫星微波观测的模拟研究与比较. 气象学报,70(3):585-597

施建成,蒋玲梅,张立新. 2006. 多频率多极化地表辐射参数化模型. 遥感学报,10(4):502-514

王磊,李震,陈权. 2006. MPDI 在微波辐射计植被覆盖区土壤水分反演中的应用. 遥感学报,10(1):34-38

王雨,傅云飞. 2010. 微波成像仪通道对降水云参数响应的数值模拟研究. 气象学报,68(3):315-324

姚展予,彭亮. 2009. 卫星微波被动遥感云中液态水的研究进展. 气象学报,67(2):331-341

赵天杰,张立新,蒋玲梅等. 2009. 利用主被动微波数据联合反演土壤水分. 地球科学进展,24(7):769-775

Chen K S, Wu T D, Fung A K. 2000. A Note on the Multiple Scattering in an IEM model. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 38(1): 249-256

Chen K S, Wu T D, Tsang L, et al. 2003. Emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with comparison to three-dimensional moment method simulations. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 41(1): 90-101

Errico R M, Ohring G, Bauer P, et al. 2007. Assimilation of satellite cloud and precipitation observations in numerical weather prediction models. J Atmos Sci, 64(11): 3737-3741

Ferrazzoli P, Guerriero L. 1996. Passive microwave remote sensing of forests: A model investigation. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 34(2): 433-443

FAO (United Nations Food and Agriculture Organization). 1971 - 1981. Soil map of the world. Vols. 1-10 (1: 5 M scale maps and accompanying texts), Paris, France

Fung A K, Li Z, Chen K S. 1992. Back scattering from a randomly rough dielectric surface. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 30(2): 195-200

Han Y, Delst van P, Liu Q, et al. 2006. JCSDA Community Radiative Transfer Model (CRTM): Version1. NOAA Technical Report NESDIS 122. NOAA, Washington, D. C

Han Y, van Delst P, Weng F Z, et al. 2010. An Overview on the JCSDA Community Radiative Transfer Model (CRTM) Version 2// Proc. 6th Annu. Symp. on Future Nat. Oper. Environ. Satellite Syst. -NPOESS and GOES-R

Jackson T J, Schmugge T J. 1991. Vegetation effects on the microwave emission of soils. Remote Sens Environ, 36(3): 203-212

Mo T, Schmugge T J. 1987. A Parameterization of the effect of surface roughness on microwave emission. IEEE Trans Geosci Remote Sens, GE-25(4): 481-486

Pan H P, Shi J C, Yang H, et al. 2012. Passive microwave radiance estimation by coupling a land surface emissivity model with CRTM// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich: IEEE, 2423-2425

Shi J C, Chen K S, Li Q, et al. 2002. A parameterized surface reflectivity model and estimation of bare-surface soil moisture with L-band radiometer. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 40(12): 2674-2686

Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. 1986. Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Volume II. Artech House. Norwood, MA, 02062

Wang J R, O'Neill P E, Jackson T J, et al. 1983. Multifrequency measurements of the effects of soil moisture, soil texture, and surface roughness. IEEE Trans Geosci Remote Sens, GE-21(1): 44-51

Wegmuller U, Matzler C. 1999. Rough bare soil reflectivity model. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 37(3): 1391-1395

Weng F Z, Yan B H, Grody N C. 2001. A microwave land emissivity model. J Geophys Res, 106(D17): 20115-20123

Weng F Z, Liu Q H. 2003. Satellite data assimilation in numerical weather prediction models, Part I: Forward radiative transfer and Jacobian modeling in cloudy atmospheres. J Atmos Sci, 60

(21): 2633-2646

Weng F Z, Han Y, van Delst P, et al. 2005. JCSDA community radiative transfer model (CRTM) // Proc. 14th Int. ATOVS Study Conf.. Beijing, China

Weng F Z, Zhu T, Yan B H. 2007. Satellite data assimilation in numerical weather prediction models. Part II: Uses of rain affected microwave radiances for hurricane vortex analysis. J Atmos Sci, 64(11): 3910-3925

Wilheit T, Kummerow C D, Ferraro R. 2003. NASDA rainfall algorithms for AMSR-E. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 41(2): 204-214

Yan B H, Weng F Z. 2011. Effects of microwave desert surface emissivity on AMSU-A data assimilation. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 49(4): 1263-1276

Yang H, Weng F Z. 2011. Error sources in remote sensing of microwave land surface emissivity. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 49(9): 3437-3442

Zhao T J, Zhang L X, Shi J C, et al. 2011. A physically based statistical methodology for surface soil moisture retrieval in the Tibet Plateau using microwave vegetation indices. J Geophys Res, 116(D8), doi: 10.1029/2010JD015229

Zobler L. 1986. A World Soil File for Global Climate Modeling. NASATM-87802. NASA, Washington, D C