

引用格式: Wu Lili, Chen Yueqing, Zhu Ming, *et al.* A New Method of Simulating Bright Temperature of Snow Cover based on Snow Grain Size Evolution Process[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(3): 606-614. [武黎黎, 陈月庆, 朱明, 等. 一种基于雪粒径演化过程的积雪亮温模拟新方法[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(3): 606-614.]

doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.3.0606

一种基于雪粒径演化过程的积雪亮温模拟新方法

武黎黎^{1,2}, 陈月庆^{1,2,3}, 朱明⁴, 李晓峰³, 赵凯³

(1. 信阳师范学院 地理科学学院, 河南 信阳 464000;

2. 信阳师范学院 河南省水土环境污染协同防治重点实验室, 河南 信阳 464000;

3. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102;

4. 河南大学 环境与规划学院, 河南 开封 475004)

摘要:本研究采用 HUT 模型、DMRT 模型和 MEMLS 模型模拟积雪雪粒子与不同波段(18.7 GHz 和 36.5 GHz)微波相互作用(吸收和消光), 并用于辐射传输模型。而雪粒径的获取一直是一个难点, 本研究由 Jordan91 雪粒径演化模型演化得到雪粒径, 并将其作为辐射传输模型的输入参数, 基于像元内实测数据进行混合像元 18.7 和 36.5 GHz 水平极化亮温模拟。结果表明: 采用 HUT 模型、DMRT 模型和 MEMLS 模型的消光系数在 18.7 GHz 时模拟亮温的偏差分别为 -3.6、-1.8 和 -0.7 K, 在 36.5 GHz 时分别为 4.0、10.4 和 14.4 K。对于 18.7 GHz 水平极化和 36.5 GHz 水平极化, 基于有效雪粒径的亮温模拟与基于雪粒径演化过程的亮温模拟精度呈现出很好的线性关系。因此, 基于雪粒径演化过程的方法是一种合适的获取辐射传输模型中雪粒径参数的方法。

关键词: 积雪粒子; 散射特性; 亮温模拟; 微波成像仪(MWRI)

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2020)03-0606-09

1 引言

积雪是气候变化的信息指标, 在全球气候变化过程中发挥着重要的作用^[1]。它可以影响区域的地表能量平衡、水文过程及生态系统功能, 同时也是冰冻圈中分布最广泛的要素^[2-3]。在许多山区, 融雪径流可作为稳定的水源。积雪以其高发射率和低导热率对陆地和大气之间的能量交换过程具有重要意义^[4-6]。因此进行积雪特性及其动态变化的检测是十分有必要的。遥感为积雪的全球日常监测提供了可能性, 是进行积雪监测的重要工具^[7]。被动微波(PM)遥感提供了时空积雪变化信息, 已成为估算积雪深度和雪水当量的有效方法, 在积雪遥感中有着其他遥感数据所不能替代的作用^[2,8]。

搭载多通道扫描微波辐射计 SMMR 的风云-7

卫星、美国国防气象气象卫星计划 DMSP(Defense Meteorological Satellite Program) 搭载专用微波辐射计成像仪 SSM/I 和 Aqua 卫星搭载的 AMSR-E 等一系列被动微波传感器的发射升空, 使积雪被动微波遥感取得了迅速发展^[9-12]。我国于 2010 年成功发射的极轨气象卫星风云-3(FY-3) 携带有微波成像仪(MWRI), 开始获取多频率双极化的亮度温度数据, 利用被动微波数据 MWRI 研究积雪成为一大热点。随着高空间分辨率的被动微波传感器如 AMSR-E 和我国 FY3 的 MWRI 数据的应用, 被动微波遥感将逐渐成为积雪遥感业务监测的重要手段^[13-14]。

被动微波遥感具有能够穿透雪层、全天候和高时间分辨率等优点, 但是其空间分辨率较低

收稿日期: 2019-05-24; 修订日期: 2020-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701395、41871248)。

作者简介: 武黎黎(1988-), 女, 山东菏泽人, 副教授, 博士, 主要从事雪深被动微波遥感反演方法研究。E-mail: wu.lili0330@163.com

(MWRI为10 km),由于地物的复杂性,在一个像元内可能存在草地、林地和裸地等多种地物类型。混合像元内的植被、地形和积雪的不均质性增加了模型模拟复杂度,植被的存在会使微波对积雪的敏感性减少。

自20世纪80年代以来,国内外学者发展了多种积雪的被动微波遥感模型,如多层积雪的被动微波辐射传输模型(the Microwave Emission Model of Layered Snowpacks, MEMLS)^[15-16]、考虑森林影响的微波辐射半经验模型(the Helsinki University of Technology Snow Emission Model, HUT)^[17]、致密介质传输理论模型(Dense Media Radiative Transfer Model, DMRT)^[18-19]。这些模型均建立在模拟积雪雪粒子与不同波段微波相互作用(吸收和消光)的物理机理基础之上。HUT模型中消光系数采用经验的公式^[20],吸收系数由积雪的介电常数得到。MEMLS模型基于对辐射传输方程的六流近似解来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^[15]。DMRT模型考虑了积雪的微观结构对辐射的影响以及积雪散射的相干作用,辐射传输方程中采用积雪的消光系数来描述积雪的散射和吸收过程,其消光系数决定着积雪的体散射大小。因此消光系数的合适与否直接关系到能否准确地进行亮温模拟。

影响亮温模拟的另外一个重要参数是雪粒径。但雪粒径的获取具有较大的难度,一方面雪粒径具有垂直分布和水平分布的空间分布特点,另一方面雪粒径具有在时间序列上的变化的特点。本研究采用Jordan91雪粒径演化模型^[21]演化得到的雪粒径作为辐射传输模型的输入参数,基于像元内实测数据进行混合像元18.7和36.5 GHz水平极化亮温模拟。被动微波像元内的积雪亮温模拟准确与否关系到能否深入理解微波与雪层相互作用机理以及雪参数的精确反演。

2 研究方法

2.1 3种积雪微波辐射传输模型

地表部分的辐射是覆盖积雪最主要的微波辐射来源。积雪的体散射作用使得积雪对地表辐射有衰减,衰减作用随着积雪深度的增加而增强,微波辐射计显示的亮温就越小。积雪的衰减作用在不同微波频率下有不同的表现,积雪在18.7 GHz的体散射较弱,而在36.5 GHz有较强的体散射,并且

随着雪深增加积雪在36.5 GHz的体散射增强,雪深与18.7和36.5 GHz亮温差成正比,正是利用这一原理进行被动微波雪深反演。因此在被动微波雪深反演及正向模型模拟时用到的频段为和36.5 GHz。

对于18.7 GHz($\lambda=16$ mm)和36.5 GHz($\lambda=8$ mm)来说,雪粒径远远小于波长,因此,可以将雪粒子假设为球形。积雪的消光包括散射和吸收两个过程,消光系数描述了积雪层的微波和散射能力,辐射传输方程中采用消光系数来描述积雪的散射和吸收过程,积雪的消光系数决定着积雪的体散射大小。

基于被动微波遥感的积雪研究中具有代表性的辐射传输模型包括HUT模型^[17]、DMRT模型^[18-19]、MEMLS模型^[15-16]。HUT模型中消光系数采用经验的公式^[20],吸收系数由积雪的介电常数得到。对于18~60 GHz,消光系数的计算公式如下所示。

$$ke_{HUT} = 0.0018 * fGHz^{2.8} * d0^2 \quad (1)$$

其中: ke_{HUT} 为消光系数(db/m), $fGHz$ 为频率(GHz), $d0$ 为雪粒径的大小(mm)。

DMRT模型中,积雪粒子被认为离散的散射体,且位置具有随机性,因此,整个积雪层可视作基于离散体的非均匀的随机介质,相干场采用准晶格近似(Quasi-Crystalline Approximation, QCA)处理,非相干场采用相关阶梯近似,用PY(Percus-Yevick)近似等分布函数得到微粒位置间的相关分布。DMRT模型中,半径为 a_i 、介电常数为 ϵ_i 的散射粒子,有效传播常数可以用以下公式表示:

$$K^2 = k_0^2 + \frac{3K_0^2}{D} \sum_{i=1}^{n_0} f_i y_i \left[1 + i \frac{2K_0^3}{3D} \left(a_i^3 y_i + \sum_{j=1}^{n_0} a_j^3 y_j \sqrt{\frac{n_j}{n_i}} H_{ij} \right) \right] \quad (2)$$

其中:

$$K_0^2 = k_0^2 + \frac{3K_0^2}{D} \sum_{i=1}^{n_0} f_i y_i \quad (3)$$

$$y_i = \frac{k_{si}^2 - k_0^2}{3K_0^2 + (k_{si}^2 - k_0^2)}, k_{si}^2 = k_0^2 \frac{\epsilon_i}{\epsilon_0} \quad (4)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^{n_0} f_i y_i \quad (5)$$

$$H_{ij} = \sqrt{n_i n_j} \int d\vec{r} [g_{ij}(\vec{r}) - 1] \quad (6)$$

其中: f_i 为雪粒子占雪层的体积百分比, n_i 为单位体积内粒子数, k_0 和 ϵ_0 分别为真空中的波长和介电常数, g_{ij} 为通过PY分布函数计算得到的成对分布函数, H_{ij} 可以通过矩阵运算计算得到。消光系数

ke_{DMRT} 由以下公式得到:

$$ke_{DMRT} = 2 * im(K) \quad (7)$$

其中: $im(K)$ 为有效传播常数的虚部。

MEMLS 模型中散射系数是基于实测数据用雪密度进行参数化后获得, 六流散射系数如公式(8)所示。其中相关长度公式^[22]如公式(9), D_0 表示雪的光学晶粒尺寸(mm)。

$$ks_{MEMLS} = (9.2 * Pex - 1.23 * \rho + 0.54)^{2.5} * (fGHz/50)^{2.5} \quad (8)$$

$$P_{ex} = D_0 * 0.16 \quad (9)$$

其中: ks_{MEMLS} 为六流散射系数(NP/m), P_{ex} 为指数相关长度(mm), ρ 为雪密度(g/cm^3), $fGHz$ 为频率(GHz)。

MEMLS 模型和 DMRT 模型对积雪微波辐射没有考虑森林及大气的辐射传输过程, 不适合被动微波像元级亮温模拟。而 HUT 模型^[17]考虑了土壤表面、森林和大气对于亮温的影响, 在此模型中, 假设积雪为均质的一层介质。HUT 模型对于积雪、森林和大气的辐射传输过程描述如公式(10)~(13)所示。

$$Tb = t_{atm} * Tb_{gnd} + Tatm_{up} + t_{atm} * (1 - e_{gnd}) * (Tatm_{down} + t_{atm} * 2.7K) \quad (10)$$

$$Tb_{gnd} = f * Tb_{for} + (1 - f) * Tb_{snow} \quad (11)$$

$$Tb_{for} = (1 - 1/L_{for}^2 * (1 - esnow)) * T \quad (12)$$

$$Tbsnowd = Tb0^+ * \exp(- (ke - qks) \sec\theta * d) + ka / (ke - qks) * T * (1 - \exp(- (ke - qks) \sec\theta * d)) \quad (13)$$

其中: Tb 为到达传感器亮温, t_{atm} 为大气透过率, $Tatm_{up}$ 和 $Tatm_{down}$ 分别大气上行辐射和大气下行辐射, Tb_{gnd} 和 e_{gnd} 分别为到达森林一大气界面的亮温和发射率。模型中假设冻土、积雪和森林的物理温度都为 T , Tb_{for} 和 Tb_{snow} 为分别为有森林覆盖处和无森林覆盖积雪亮温。 L_{for} 为森林衰减因子, $esnow$ 为经过积雪衰减的冻土发射率。 $Tbsnowd$ 为积雪一大气界面下的亮温, $Tb0^+$ 为土壤一积雪界面上的亮温, 模型中假设积雪微波辐射的散射以前向散射为主, 采用 0.96 的经验系数来度量被散射到前向的辐射能量的比例。 ke 、 ks 和 ka 分别为消光、散射和吸收系数 ($ke = ka + ks$)。

Kontu 等^[23]认为该模型中 d_0 应由平均雪粒径得到的发生散射的有效雪粒径, 公式如(14)和(15)所示。 D_{ave} 是积雪深度加权平均之后的平均雪粒径, D_i 为每一层的雪粒径, d_i 为每一层的积雪深度。

$$d_0 = 1.5(1 - e^{-1.5D_{ave}}) \quad (14)$$

$$D_{ave} = \sum_{i=1}^n (D_i * d_i) / \sum_{i=1}^n d_i \quad (15)$$

HUT 模型中冻土发射率是由粗糙裸土发射率模型得到的^[24], 计算得到的冻土的发射率在 18.7GHz 水平极化和 36.5 GHz 水平极化相同。戴礼云等^[25]假设新疆的冻土发射率为 0.93。在本研究中, 假设 18.7 GHz 水平极化和 36.5 GHz 水平极化时冻土发射率为 0.93。由于本研究中微波成像仪 (MWRI) 数据选择的是降轨数据 (若某天没有降轨数据, 则该天不进行亮温模拟), 在东北地区的过境时间大致为 1 点钟, 因此 HUT 模型中选择 1 点钟的参数作为模型的输入参数。冻土、积雪物理温度 T 采用 3.1 节中的 1 点钟积雪温度, 森林的物理温度 T_{can} 采用 3.1 节中的 1 点钟的空气温度作为近似。

2.2 Jordan91 雪粒径演化模型

Jordan91 雪粒径演化模型^[21]是由 Jordan 提出的, 雪粒径演化的核心公式如(16)所示。其中, d_0 为雪粒径的大小(m), t 为时间(s), g_1 为可调整参数, 建议值为 $5 \times 10^{-7} m^4/kg$, Pa 为大气压(mb), T 为积雪温度($^{\circ}C$), $\left| \frac{\partial T}{\partial z} \right|$ 为积雪温度变化梯度。 C_{KT} 的计算公式为公式(17)。本研究中认为积雪为干雪, 积雪中的液态水的体积含量 ≤ 0.02 , 因此 $k=i$, i 表示干雪的状态。参数 $cl_i = 8.047 \times 10^9 kg/m^3 \cdot K$, $L_{vi} = 2.838 \times 10^6 J/kg$, $R_w = 461.296 J/kg \cdot K$ 。此外, $D_{eos} = 0.92 \times 10^{-4} m^2/s$ 。

$$\frac{\partial d_0}{\partial t} = \frac{g_1}{d_0} D_{eos} \left(\frac{1000}{Pa} \right) \left(\frac{T}{273.15} \right)^6 C_{KT} \left| \frac{\partial T}{\partial z} \right| \quad (16)$$

$$C_{KT} = \frac{cl_k}{T^2} \left[\frac{L_{vk}}{R_w T} - 1 \right] \exp\left(-\frac{L_{vk}}{R_w T}\right) \quad (17)$$

Jordan91 雪粒径演化模型中积雪温度采用 3.1 节中的积雪温度, 大气压采用 3.1 节中的大气压数据。Jordan91 雪粒径演化模型对新雪的雪粒径大小不敏感^[26], 因此模型假设积雪的初始粒径为 0.3 mm。积雪温度梯度由 3.1 节中积雪分层雪温计算得到。雪粒径的演化以天为时间间隔, 分别演化得到逐日的雪粒径。演化得到的雪粒径作为 HUT 模型的参数输入。

2.3 混合像元亮温模拟

由 HUT 模型分别模拟纯森林像元和纯农田像元的亮温, 纯森林像元和纯农田像元亮温采用森林覆盖度线性加权的方式计算得到混合像元的亮温, 公式如(18)所示。雪深反演所用的频段和极化方式是 18.7 和 36.5 GHz 水平极化, 因此本研究是对 18.7 和 36.5 GHz 水平极化亮温进行模拟。

$$Tb_{mixed} = f * Tb_{forest} + (1 - f) * Tb_{farmland} \quad (18)$$

其中: Tb_{mixed} 为混合像元亮温, Tb_{forest} 为纯森林像元亮温, $Tb_{farmland}$ 为纯农田像元亮温。

3 研究区与数据

3.1 研究区实验数据

在吉林省长春市选择一个 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 像元作为研究区进行测量实验, 研究区土地类型如图 1 所示, 测量时间为 2014 年 12 月 8 日至 2015 年 2 月 5 日(此期间的雪为干雪), 时间间隔为 1 d。在研究区内选择 7 个采样点(4 个森林采样点和 3 个农田采样点)进行积雪参数测量, 每个采样点处测量的积雪参数包括每一层积雪的雪粒径、雪温、雪深, 测量的大气参数为气压。7 个采样点的位置如图 1 所示。

在 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 像元内选择 8 个点进行了森林参数的测量, 样方选择 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的大小, 测量样方内树的总数和每棵树的树高和胸径。用这些参数计算得到森林材积量数据^[27]。用 8 个点的森林材积量的平均值($196.79\text{ m}^3/\text{ha}$)作为该像元的森林材积量。使用 U 盘温度计(MicroLite USB 数据记录仪)来记录每小时的地面温度和空气温度。将一点钟地面温度和空气温度的平均值作为一点钟积雪温度。

3.2 FY-3B MWRI 数据

FY-3B 卫星是中国第二代极轨气象卫星。其携带的微波成像仪(MWRI)有 5 个频段, 其中每个

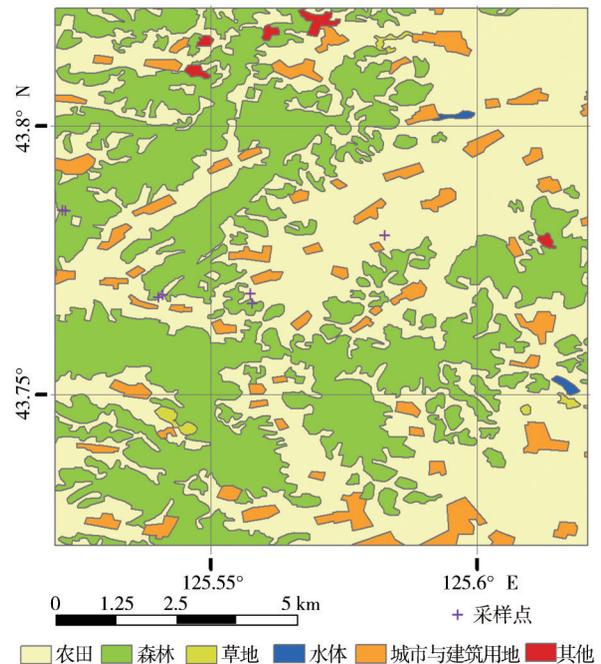


图 1 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 像元内的土地利用类型图

Fig.1 Land cover map of $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ pixel

频段都有水平极化和垂直极化两种极化方式。MWRI 的具体的参数见表 1。本研究中使用 FY3B 卫星微波成像仪(MWRI)的 L1 级降轨亮温数据, 频段和极化方式为 18.7 GHz 和 36.5 GHz 水平极化亮温数据, 分辨率为 10 km, 投影方式采用经纬度投影。

表 1 FY-3B 微波成像仪(MWRI)的性能参数

Table 1 The property parameter of Microwave Radiation Imager (MWRI) on FY-3B

频率/GHz	10.65	18.7	23.8	36.5	89
极化	V, H				
主波束效率	$\geq 90\%$				
地面分辨率 $\leq \text{km} \times \text{km}$	51×85	30×50	27×45	18×30	9×15
带宽/MHz	180	200	400	900	$2 \times 2\ 300$
扫描方式	圆锥扫描				
幅宽/Km	1 400				
扫描周期/s	1.7 ± 0.1				
天线视角/ $^\circ$	45 ± 0.1				

4 结果与分析

4.1 基于观测雪粒径和用演化公式模拟的雪粒径分析

实测的雪粒径关系着 Jordan91 雪粒径演化模型能否正确模拟雪粒径, 进行亮温模拟。由 7 个采样点(4 个森林采样点和 3 个农田采样点)的实测雪粒径和用 Jordan91 模拟的雪粒径进行比较(若某一天

没有实测雪粒径数据, 对其进行断点)。实测的粒径和 Jordan91 雪粒径演化模型模拟的雪粒径如图 2 所示。

由图 2 可知, 用实测的粒径和 Jordan91 雪粒径演化模型模拟出来的以森林和农田雪粒径具有一致性, 总体呈上升趋势。相对于实测的粒径, 模拟的雪粒径上升趋势较为平缓, 实测雪粒径波动较大, 可能是在测量期间下雪或其他原因, 导致雪粒

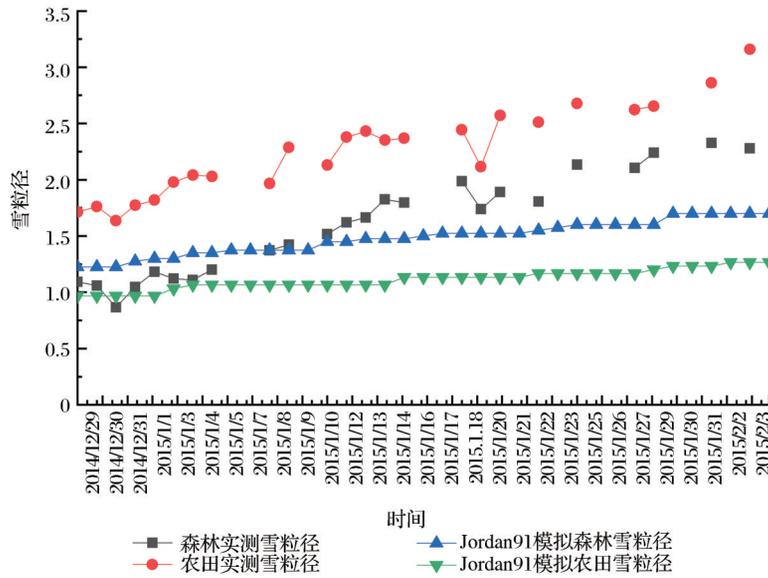


图2 基于 Jordan91模型模拟的雪粒径和实测雪粒径对比图

Fig.2 Comparison of snow grain size and measured snow grain size based on the Jordan91 model

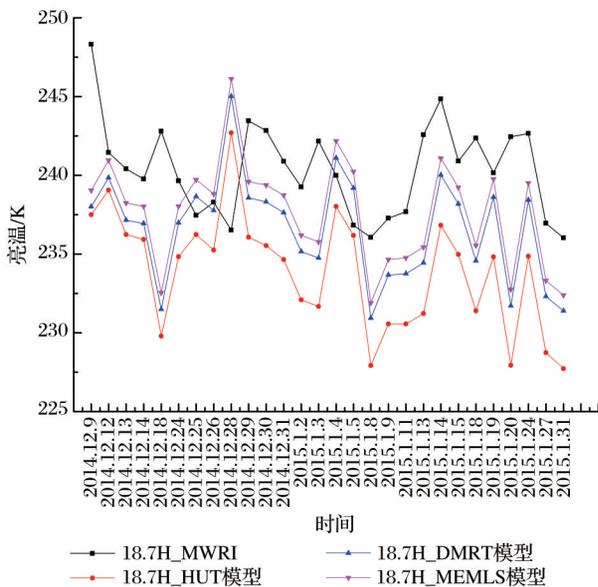
径大小变化较大。

4.2 基于有效雪粒径的亮温模拟

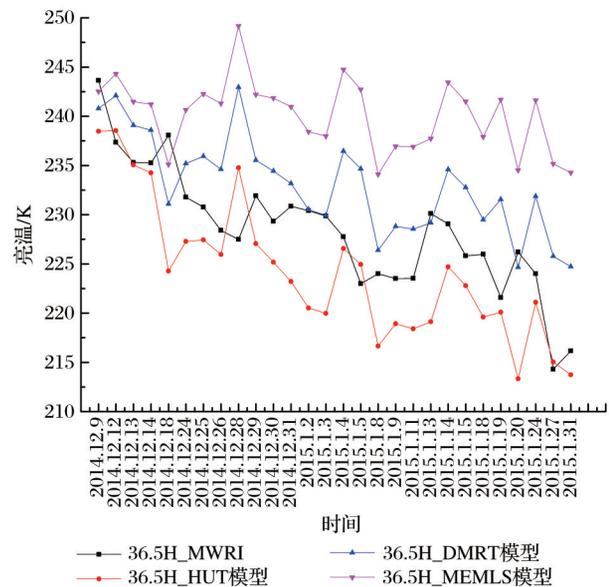
有效雪粒径在2.1节已介绍,如公式(14)所示。由7个采样点(4个森林采样点和3个农田采样点)的实测雪粒径和公式(15)得到平均雪粒径,代入公式(14)得到有效雪粒径。4个森林采样点的有效雪粒径的平均值作为纯森林像元的有效雪粒径,3个

农田采样点的有效雪粒径的平均值作为纯农田像元的有效雪粒径。

利用2.1节中的积雪微波辐射传输模型,分别采用HUT模型、DMRT模型和MEMLS模型的消光系数进行混合像元亮温模拟。18.7GHz水平极化模拟亮温与微波成像仪(MWRI)亮温的对比如图3(a)所示,36.5GHz水平极化模拟亮温与微波成像仪(MWRI)亮温的对比如图3(b)所示。



(a) 18.7 GHz水平极化



(b) 36.5 GHz水平极化

图3 基于有效雪粒径的模拟亮温与微波成像仪(MWRI)亮温的对比如图

Fig.3 Comparison of simulation brightness temperature and brightness temperature of Microwave Radiation Imager (MWRI) based on effective snow grain size

由图3可知,18.7 GHz水平极化时,采用HUT模型、DMRT模型和MEMLS模型的消光系数模拟亮温与MWRI亮温有很好的一致性,尤其是采用DMRT模型和MEMLS模型的消光系数模拟的亮温效果更好;36.5 GHz水平极化时,采用HUT模型和DMRT模型的消光系数模拟亮温与微波成像仪(MWRI)亮温具有较好的一致性,而采用MEMLS模型的消光系数模拟亮温则高于MWRI亮温。

为了更精确地评价采用不同消光系数模拟亮温的精度,把微波成像仪(MWRI)亮温作为真值,分别计算了模拟亮温的均方根误差(RMSE)、偏差(Bias)和平均误差(ME),公式如(19)~(21)所示。其中 Tb_s 代表模拟亮温, Tb_0 代表微波成像仪(MWRI)亮温, n 代表点的个数。采用不同消光系数模拟亮温的均方根误差、偏差和平均误差如表2所示。

$$RMSE = \left(\sum_{i=1}^n \frac{(Tb_s - Tb_0)^2}{n} \right)^{1/2} \quad (19)$$

$$Bias = \sum_{i=1}^n \frac{Tb_s - Tb_0}{n} \quad (20)$$

$$ME = \sum_{i=1}^n \frac{|Tb_s - Tb_0|}{n} \quad (21)$$

由表2可知,18.7 GHz水平极化时,采用HUT

模型、DMRT模型和MEMLS模型的消光系数模拟亮温的偏差分别为-6.5、-3.8和-2.7 K,模拟亮温与MWRI亮温有很好的一致性;36.5 GHz水平极化时,采用HUT模型和DMRT模型的消光系数模拟亮温的偏差分别为-4.2、4.6和11.7 K,采用HUT模型、DMRT模型的消光系数模拟亮温与MWRI亮温有很好的一致性,而采用MEMLS模型的消光系数模拟亮温高估了亮温。

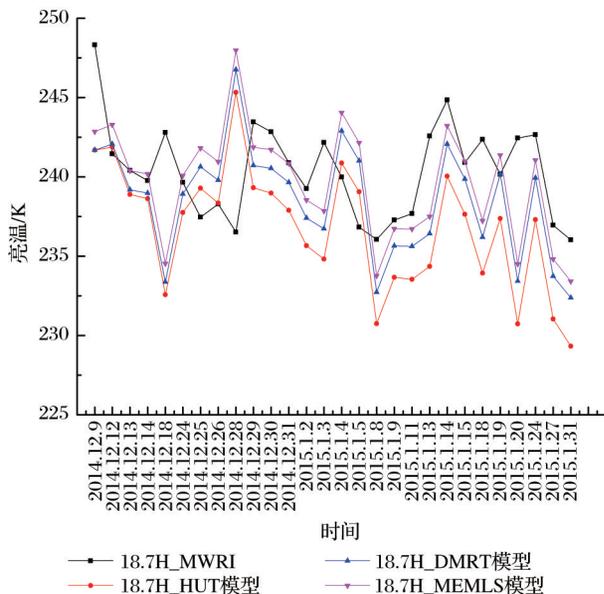
表2 采用不同消光系数模拟亮温的均方根误差、偏差和平均误差

Table 2 The RMSE, Bias and ME of simulation brightness temperature using different extinction coefficient

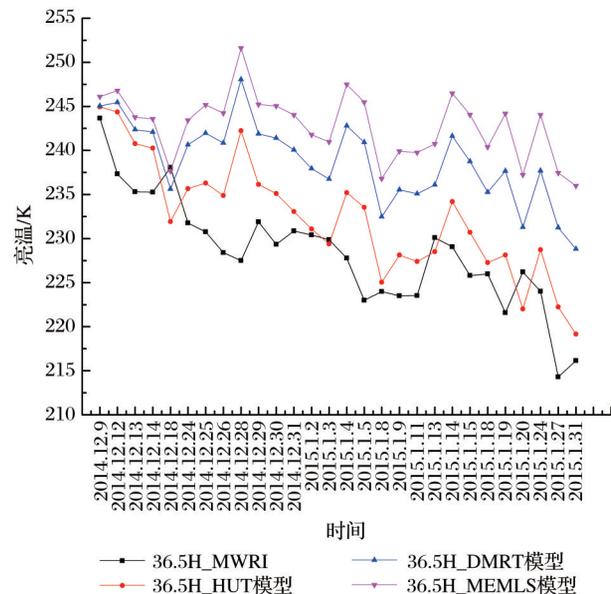
消光系数	HUT模型		DMRT模型		MEMLS模型	
频率和极化	18.7H	36.5H	18.7H	36.5H	18.7H	36.5H
RMSE(K)	7.7	6.2	5.6	6.5	4.9	13.1
Bias(K)	-6.5	-4.2	-3.8	4.6	-2.7	11.7
ME(K)	6.9	5.0	4.7	5.5	4.0	12.0

4.3 基于雪粒径演化过程的亮温模拟

由Jordan91雪粒径演化模型分别演化像元内7个采样点(4个森林采样点和3个农田采样点)的雪粒径,4个森林采样点的雪粒径平均值作为纯森林像元的雪粒径,3个农田采样点的雪粒径的平均值作为纯农田像元的雪粒径。



(a) 18.7 GHz水平极化



(b) 36.5 GHz水平极化

图4 基于雪粒径演化过程的模拟亮温与微波成像仪(MWRI)亮温的对比图

Fig.4 Comparison of simulation brightness temperature and brightness temperature of Microwave Radiation Imager (MWRI) based on snow grain size evolution

利用2.1节中的积雪微波辐射传输模型,分别采用HUT模型、DMRT模型和MEMLS模型的消

光系数进行混合像元亮温模拟。18.7 GHz水平极化模拟亮温与微波成像仪(MWRI)亮温的对比如

图4(a)所示,36.5 GHz水平极化模拟亮温与微波成像仪(MWRI)亮温的对比如图4(b)所示。

由图4可知,18.7 GHz水平极化时,采用HUT模型、DMRT模型和MEMLS模型的消光系数模拟亮温与MWRI亮温有很好的-致性;36.5 GHz水平极化时,采用HUT模型的消光系数模拟亮温与MWRI亮温有很好的-致性,而采用DMRT模型和MEMLS模型的消光系数模拟亮温会高估亮温。

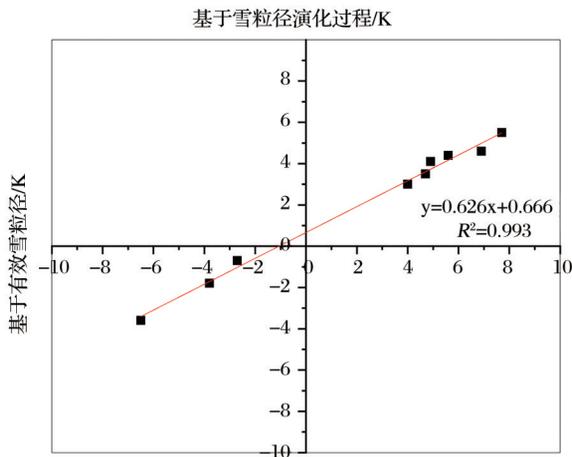
为了更精确地评价采用不同消光系数模拟亮温的精度,利用公式(13)~(15)计算模拟亮温的均方根误差(RMSE)、偏差(Bias)和平均误差(ME),结果如表3所示。

由表3可知,18.7 GHz水平极化时,采用HUT

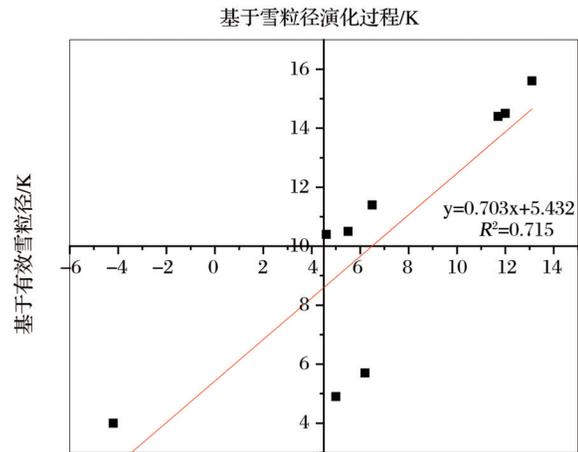
表3 采用不同消光系数模拟亮温的均方根误差、偏差和平均误差

Table3 The RMSE, Bias and ME of simulation brightness temperature using different extinction coefficient

消光系数 频率和极化	HUT模型		DMRT模型		MEMLS模型	
	18.7H	36.5H	18.7H	36.5H	18.7H	36.5H
RMSE(K)	5.5	5.7	4.4	11.4	4.1	15.6
Bias(K)	-3.6	4.0	-1.8	10.4	-0.7	14.4
ME(K)	4.6	4.9	3.5	10.5	3.0	14.5



(a) 18.7 GHz水平极化



(b) 36.5 GHz水平极化

图5 基于有效雪粒径的亮温模拟与基于雪粒径演化过程的亮温模拟精度的相关关系

Fig. 5 Correlation between simulation brightness temperature based on effective snow grain size and brightness temperature simulation based on snow grain size evolution

5 结 语

本研究利用HUT积雪微波辐射传输模型进行像元内亮温模拟,其中雪粒径和消光系数是HUT模型的关键参数。而雪粒径的获取一直是一个难点。本文利用实测数据,基于有效雪粒径和演化雪粒径采用HUT模型、DMRT模型和MEMLS模型

模型、DMRT模型和MEMLS模型的消光系数模拟

亮温的偏差分别为-3.6、-1.8和-0.7 K,模拟亮温与MWRI亮温有很好的-致性;36.5 GHz水平极化时,采用HUT模型、DMRT模型和MEMLS模型的消光系数模拟亮温的偏差分别为4.0 K、10.4 K和14.4 K,采用DMRT模型和MEMLS模型的消光系数模拟亮温会高估亮温。基于有效雪粒径的亮温模拟与基于雪粒径演化过程的亮温模拟精度的相关关系如图5所示。

由图5可知,对于18.7 GHz水平极化和36.5 GHz水平极化,基于有效雪粒径的亮温模拟与基于雪粒径演化过程的亮温模拟精度呈现出很好的线性关系,18.7 GHz水平极化时 R^2 为0.993,36.5 GHz水平极化时 R^2 为0.715。雪粒径的获取一直是一个难点,加上雪粒径的分层特性与空间分布不均,另一方面雪粒径随着时间变化,使得雪粒径的野外获取更加困难。有效雪粒径由野外实测雪粒径计算得到,

而基于有效雪粒径的亮温模拟与基于雪粒径演化过程的亮温模拟精度呈现出很好的线性关系,因此,基于雪粒径演化过程的方法是一种合适的获取辐射传输模型中雪粒径参数的方法。

的消光系数分别进行亮温模拟,雪粒径的获取则采用Jordan91模型雪粒径和有效雪粒径。

对于18.7 GHz水平极化和36.5 GHz水平极化,基于有效雪粒径的亮温模拟与基于雪粒径演化过程的亮温模拟精度呈现出很好的线性关系,18.7 GHz水平极化时 R^2 为0.993,36.5 GHz水平极

化时 R^2 为 0.715。因此,基于雪粒径演化过程的方法是一种合适的获取辐射传输模型中雪粒径参数的方法。

参考文献 (References):

- [1] Xiao Lin, Che Tao, Dai Liyun. Evaluation on the Spatial Characteristics of Multiple Snow Depth Datasets over China[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(6): 1133-1145. [肖林, 车涛, 戴礼云. 多源雪深数据在中国的空间特征评估[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(6): 1133-1145.]
- [2] Xiao X, Zhang T, Zhong X, *et al.* Support Vector Regression Snow-depth Retrieval Algorithm Using Passive Microwave Remote Sensing Data [J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 210: 48-64. doi: 10.1016/j.rse.2018.03.008.
- [3] Zhang Zheng, Xiao Pengfeng, Zhang Xueliang, *et al.* Analysis of the Characteristics of Snow Albedo during the Snowmelt Period of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(6): 1146-1154. [张正, 肖鹏峰, 张学良, 等. 青藏高原融雪期积雪反照率特性分析[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(6): 1146-1154.]
- [4] Liang J Y, Liu X P, Huang K M. Improved Snow Depth Retrieval by Integrating Microwave Brightness Temperature and Visible/Infrared Reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 156: 500-509.
- [5] Cohen J. Snow Cover and Climate [J]. Weather, 1994, 49: 150-156.
- [6] Gong G, Cohen J, Entekhabi D, *et al.*, Y. Hemispheric-scale Climate Response to Northern Eurasia Land Surface Characteristics and Snow Anomalies [J]. Global and Planetary Change, 2007, 56: 359 - 370.
- [7] Kontu A, Lemmetyinen J, Vehviläinen J, *et al.* Coupling SNOWPACK-Modeled Grain Size Parameters with the HUT Snow Emission Model [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 194: 33-47.
- [8] Che Tao, Li Xin, Gao Feng. Estimation of Snow Water Equivalent in the Tibetan Plateau Using Passive Microwave Remote Sensing Data (SSM/I) [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(3): 363-368. [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[J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 363-368.]
- [9] Kunzi K F, Patil S, Rott H. Snow Cover Parameters Retrieved from NIMBUS-7 Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) Data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1982, 20(4): 452 - 467.
- [10] Chang A T C, Foster J L, Hall D K, *et al.* Snow Water Equivalent Estimation by Microwave Radiometry [J]. Cold Regions Science and Technology, 1982, 5(3): 259-267.
- [11] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Volume II: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory [M]. Norwood, MA: Artech House, 1982: 457 - 1064.
- [12] Cao Meisheng, Li Xin, Chen Xianzhang, *et al.* Remote Sensing on Cryosphere [M]. Beijing: Science Press, 2006. [曹梅盛, 李新, 陈贤章, 等. 冰冻圈遥感 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [13] Chen Xiuxue, Li Xiaofeng, Wang Guangrui, *et al.* Based on Snow Cover Survey Data of Accuracy Verification and Analysis of Passive Microwave Snow Cover Remote Sensing Products in Northeast China [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(6): 1181-1189. [陈秀雪, 李晓峰, 王广蕊, 等. 基于积雪调查数据的东北地区被动微波积雪遥感产品精度验证与分析[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(6): 1181-1189.]
- [14] Liu Baokang, Feng Shuqing, Du Yu'e, *et al.* Research Progress and Prospect of Remote Sensing with Passive Microwave from Snow [J]. Pratacultural Science, 2009, 26(11): 37-43. [刘宝康, 冯蜀青, 杜玉娥, 等. 积雪被动微波遥感研究进展与前景展望[J]. 草业科学, 2009, 26(11): 37-43.]
- [15] Wiesmann A, Mätzler C. Microwave Emission Model of Layered Snowpacks [J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 70(3): 307 - 316.
- [16] Mätzler C, Wiesmann A. Extension of the Microwave Emission Model of Layered Snowpacks to Coarse-grained Snow [J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 70(3): 317 - 325.
- [17] Pulliainen J T, Grandell J, Hallikainen M T. HUT Snow Emission Model and Its Applicability to Snow Water Equivalent Retrieval [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(3): 1378 - 1390.
- [18] Tsang L, Chen C T, Chang A T C, *et al.* Dense Media Radiative Transfer Theory based on Quasicrystalline Approximation with Applications to Passive Microwave Remote Sensing of Snow [J]. Radio Science, 2000, 35(3): 731 - 749.
- [19] Jin Y Q. Radiative Transfer of Snowpack/Vegetation Canopy at the SSM/I Channels and Satellite Data Analysis [J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 61(1): 55 - 63.
- [20] Hallikainen M T, Ulaby F, Deventer T V E. Extinction Behavior of Dry Snow in the 18 to 90 GHz Range [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1987, 25(6): 737 - 745.
- [21] Jordan R. A One-dimensional Temperature Model for a Snow Cover: Technical Documentation for SN THERM. 89 [R]. Hanover, NH, Special Report, 1991: 91-16.
- [22] Christian M. Relation Between Grain-size and Correlation Length of Snow [J]. Journal of Glaciology, 2002, 48(162): 461-466.
- [23] Kontu A, Pulliainen J. Simulation of Spaceborne Microwave Radiometer Measurements of Snow Cover Using In Situ Data and Brightness Temperature Modeling [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(3): 1031 - 1044.
- [24] Wegmüller U, Mätzler C. Rough Bare Soil Reflectivity Model [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(3): 1391 - 1395.

- [25] Dai L., Che T., Wang J., *et al.* Snow Depth and Snow Water Equivalent Estimation from AMSR-E Data based on a Priori Snow Characteristics in Xinjiang, China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 127(1): 14-29.
- [26] Huang C L., Margulis S A., Durand MT, *et al.* Assessment of Snow Grain-size Model and Stratigraphy Representation Impact on Snow Radiance Assimilation: Forward Modeling Evaluation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(11): 4551-4564.
- [27] Meng Xianyu. *Forest Measurement (Third Edition)*[M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 2006.[孟宪宇. 测树学(第三版)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006.]

A New Method of Simulating Bright Temperature of Snow Cover based on Snow Grain Size Evolution Process

Wu Lili^{1,2}, Chen Yueqing^{1,2,3}, Zhu Ming⁴, Li Xiaofeng³, Zhao Kai³

(1. *School of Geographic Sciences, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China;*

2. *Henan Key Laboratory for Synergistic Prevention of Water and Soil Environmental Pollution, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China;*

3. *Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China;*

4. *School of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng, 475004, China)*

Abstract: This research used HUT model, DMRT model and MEMLS model to simulate interactions (absorption and extinction) between snow grains for different wave bands (18.7 GHz and 36.5 GHz) of microwave which were used for radiative transfer model. Obtaining the snow grain size is always a difficulty. So this research used Jordan91 snow grain size evolution model to evolve snow grain size which was regarded as input parameter of radiative transfer model, and used measured data to simulate spaceborne brightness temperature for 18.7 GHz horizontal polarization and 36.5 GHz horizontal polarization in a mixed pixel. The results showed that the bias of simulation brightness temperature using extinction coefficient of HUT model, DMRT model and MEMLS model for 18.7 GHz horizontal polarization were -3.6 K, -1.8 K and -0.7 K respectively, and for 36.5 GHz horizontal polarization were 4.0 K, 10.4 K and 14.4 K respectively. For 18.7 GHz horizontal polarization and 36.5 GHz horizontal polarization, the bright temperature simulation based on effective snow grain size shows a good linear relationship with the brightness temperature simulation based on snow grain size evolution process. Therefore, the method based on the snow grain size evolution process is a suitable method for obtaining the snow grain size parameter in the radiative transfer model.

Key words: Snow grain; Scattering characteristics; Brightness temperature simulation; Microwave Radiation Imager (MWRI)