

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0133

ZHOU Jingtian, QIU Yubao, HUANG Lin, et al. Analysis of the evolution of snow cover and microwave irradiation based on Nordic Snow Radar Experiment[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(5):1501–1512. [周静恬, 邱玉宝, 黄琳, 等. 基于NoSREx实验的积雪演化及微波辐射分析研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(5):1501–1512.]

基于NoSREx实验的积雪演化及微波辐射分析研究

周静恬^{1,2,3}, 邱玉宝^{1,2,4}, 黄琳^{1,2,3}, Juha LEMMETYINEN^{4,5},

石利娟^{1,2,4}, 李青寰^{1,2,4}, 施建成⁶

(1. 中国科学院 空天信息创新研究院 数字地球重点实验室, 北京 100094; 2. 可持续发展大数据国际研究中心, 北京 100094; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国科学院 空天信息创新研究院-芬兰气象研究所 北极观测联合研究中心(JRC-AO), 芬兰 索丹屈莱 FI-99660; 5. 芬兰气象研究所 北极空间中心, 芬兰 赫尔辛基 FI-00560; 6. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190)

摘 要: 在被动微波雪水当量反演中, 积雪物理参数随时间的变化特征影响着反演精度, 为理解积雪随时间演化的特征及其对微波辐射亮温的影响, 本研究选用2009—2013年北欧积雪实验(Nordic Snow Radar Experiment, NoSREx)积雪地面观测和微波辐射测量数据, 通过雪深和温度把雪期分为积累期(10月—次年2月)、稳定期(2—4月)和消融期(4—5月), 发现各个雪期的积雪演化特征为: 雪颗粒形状在积累期前期以融态颗粒(Melt Forms, MF)为主, 积累期后期和稳定期以圆形颗粒、片状颗粒、深霜为主, 消融期以MF为主; 整个雪季底层雪粒径从小变大再变小的过程, 粒径最大值出现在稳定期的2至3月, 约为2.5~4.0 mm, 均出现在近地表雪层, 而表层粒径较小且较为稳定。通过雪深和微波亮度差(18~37 GHz)的关系分析, 表明亮温差在不同雪期对于雪深的依赖关系不同, 在积累期和稳定期, 雪深变化与亮温差变化具有明显的正相关; 在消融期由于积雪融化的影响, 其相关性较差; 基于多层积雪微波辐射模型(MEMLS)构建了一维微波辐射模拟环境, 模拟表明MEMLS模型在3个雪期的垂直极化10.65 GHz和18.7 GHz模拟结果较37 GHz和90 GHz更好; 10.65 GHz V极化在入射角为50°且稳定期时, 微波亮温模拟均方根误差(RMSE)结果最小, 为2.49 K。3个雪期90 GHz模拟结果水平极化优于垂直极化, 由于受表层积雪变化影响, 90 GHz模拟结果较不稳定, 尤其是消融期时, RMSE最小也达到了42.7 K。本研究有助于理解积雪随时间演化的特征及其对微波辐射模拟的影响, 表明在被动微波雪水当量反演算法中, 针对不同积雪期需要考虑积雪演化动态过程。

关键词: 积雪; 微波辐射亮温; NoSREx实验; MEMLS模型

中图分类号: P436.63⁵; P407.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)05-1501-12

0 引言

积雪是冰冻圈最为活跃的季节性要素, 是全球气候变化的灵敏指示器^[1]。针对积雪的监测具有重要的现实意义, 当前被动微波遥感在积雪监测方面具有不可替代的作用。积雪微波辐射传输模型模拟可开展过程和机理研究, 仿真环境可重现积雪演变、积雪与微波相互作用等重要过程, 是被动微波

积雪参数——雪深和雪水当量反演算法发展的基础。

针对积雪的物理特性是影响空间监测的重要因素, 其演变特性存在较大的空间异质性^[2-3], 积雪物理特性的演化影响微波辐射^[4-5], 从而影响雪深/雪水当量反演算法^[6-7]。当前计算雪深/雪水当量的算法主要是半经验线性算法^[8-9], 其不确定性来源于雪物理特性变化及下垫面变化和大气变化影响^[4],

收稿日期: 2021-02-09; 修订日期: 2021-09-01

基金项目: 国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项(2017YFE0111700; 2019YFE0105700); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA19070201); 中国科学院国际合作局对外合作重点项目(131211KYSB20170041); 国家自然科学基金项目(41371351)资助

作者简介: 周静恬, 硕士研究生, 主要从事微波遥感应用研究. E-mail: zhoujt@aircas.ac.cn

通信作者: 邱玉宝, 研究员, 主要从事微波遥感、冰雪及北极环境遥感和数据科学研究. E-mail: qiuyb@aircas.ac.cn

其中雪的物理特性演变过程对算法影响较大^[10]。由于积雪反演算法在时间上和空间上还存在很大的不确定性,导致精度受到影响^[7,11-12]。通过改进算法参数来更好捕捉动态积雪演变过程,或耦合发射率模型和陆表模型,或耦合发射率模型和由天气驱动的积雪演变模型将很可能提高雪深/雪水当量反演算法准确性^[13]。结合实验测量的雪深等辅助信息^[14]或了解积雪的先验知识^[15]有助于减少雪深/雪水当量反演算法的不确定性。

为应对上述挑战,论文采用在北欧地区的2009—2013年积雪地面和地基微波实验观测数据集^[16-17],研究不同积雪期的分期判断方法,探讨了芬兰积雪实验场积雪特性的时间序列变化以及地基微波辐射计观测亮温差与雪深变化关系,最后采用MEMLS模型^[18-20]开展积雪微波辐射的模拟、对比和分析研究。

1 实验数据、模型和方法

1.1 实验数据

北欧积雪实验(Nordic Snow Radar Experi-

ment, NoSREx)是ESA Earth Explorer 7 候选任务CoReH2O^[21](寒冷地区水文学高分辨率观测)中Phase A研究组成部分,该实验目的是在北极寒带森林地区的代表性地点提供整个冬季连续时间序列的地面、主被动微波积雪观测。实验区域位于芬兰气象研究所北极研究中心 Sodankylä 的观测站,地理位置为67.3618°N,26.6338°E(图1)。实验采用了包括10.65、18.7、37、90 GHz四个频率的微波辐射计系统,其中在2011—2012年实验期间频段21 GHz替换了90 GHz,四个入射角分别为30°、40°、50°、60°,获得了水平和垂直极化下的观测亮温以及标准差。地面观测数据包括积雪参数的人工和自动测量,人工测量是指每隔3~5天进行雪坑(snow pit)观测,其参数包括雪深、密度和雪水当量、雪密度剖面、雪温度剖面、雪层评估,观测天数在2009—2013四年依次为91、31、23、32天。自动测量参数包括温度、露点温度、风速、气压、雪深、地表湿度和温度、气温、雪水当量等,每天共测量8次,每次间隔3小时,观测天数在2009—2013年依次为365、365、366、365天^[16]。

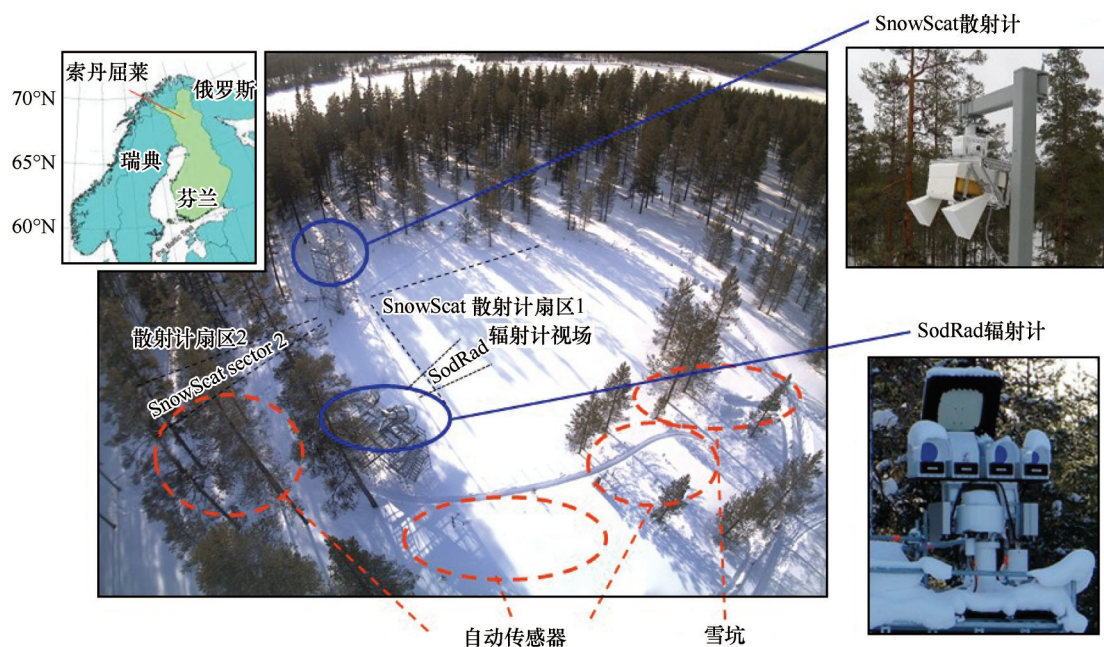


图1 NoSREx IOA的网络摄像头图像以及主要微波仪器,SnowScat散射计和SodRad辐射计系统的照片^[16]

Fig. 1 Webcam image of NoSREx IOA and photographs of main microwave instruments, the SnowScat scatterometer and the SodRad radiometer system^[16]

该数据集已用于积雪相关模型模拟^[22-23]、反演积雪参数^[24-25]、改进算法^[26]、耦合雪物理和辐射传输模型^[27-29]、分析观测数据^[29-31]等研究。

1.2 多层积雪微波辐射模型

多层积雪微波辐射传输模型(MEMLS)是由Wiesmann等^[18-19]开发的一个针对多层积雪的被动

微波辐射传输模型,适用频率范围为 5~100 GHz。它以辐射传输为基础,将积雪根据物理特性分为多层,利用六流近似理论来描述每个雪层内部的多次散射与吸收,同时考虑了雪层之间的界面散射。由于模型在特定环境下开发,在不同环境下的适应性不同,为了将其有效应用到芬兰积雪试验场,在该研究中需要调整模型的输入参数地表均方根高度参数的值。

1.3 研究方法

1.3.1 积雪积累期、稳定期和消融期确定

根据气温和积雪厚度的变化,把积雪期划为 3 个雪期,其中积雪“积累期”为出现降雪后积雪逐渐累积的过程,表现为雪深随时间呈现显著增加趋势,气温基本已降低至 0℃以下;积雪“稳定期”为气温连续低于 0℃时,雪深随时间增加趋势减小,即积雪压

实的过程,表现为雪深出现增加明显变缓或甚至下降趋势;积雪“消融期”为随着温度升高且连续 5 日大于 0℃,积雪进入融化或消融,可能伴随再冻结过程,表现为雪深迅速减小,气温基本维持在 0℃以上。

针对芬兰 Sodankylä 地区,根据其地面观测数据的温度和雪深组合特征(图 2),研判 3 个时期开始和结束时间,方法为:积累期开始时间为雪深一周内连续大于 5 cm,气温处于从 0℃以上过渡到 0℃以下阶段,此前气温不低于 -20℃;积累期结束时间也是稳定期开始时间,为连续 3 个周内雪深变化范围为 ±5 cm 以内,气温至少连续 5 天低于 0℃;稳定期结束时间也是消融期开始时间,为连续 5 天气温大于 0℃,雪深处于减小状态,一般为 50~70 cm;消融期结束时间为雪深一周内连续小于 5 cm,气温处于 0℃以下过渡到 0℃以上阶段。

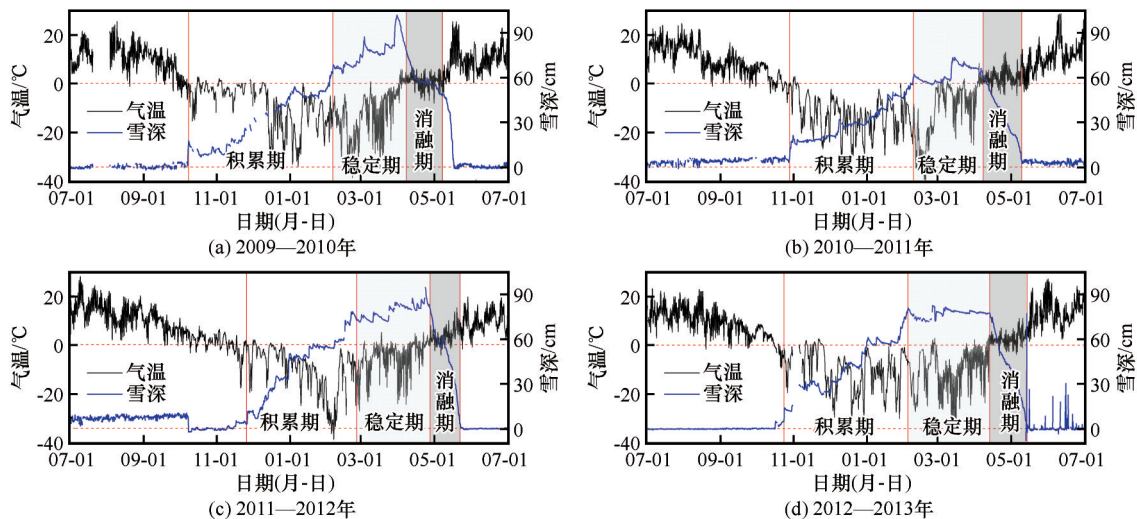


图 2 2009—2013 年气温和雪深时序变化图

Fig. 2 Changes of temperature and snow depth from 2009 to 2013

1.3.2 模型输入确定

MEMLS 模型输入包括频率、入射角、天空背景亮度温度、散射系数、积雪参数、地表温度以及积雪-土壤界面反射率^[19]。天空背景的亮度温度所需的大气透射率参照 Pulliainen 等^[32-33]的提出的统计反演方法,天空背景亮度温度所需的上下行大气亮度温度由 Aschbacher^[34]提出的公式估算。散射系数参照 Matzler 等^[18]的工作,采用玻恩近似计算。输入的积雪参数包括积雪层数、积雪温度、积雪湿度、积雪密度、积雪盐度、积雪厚度,指数相关长度,指数相关长度采用 Durand 等^[35]的经验公式通过积雪粒径估算,其他参数由 NoSREx 实验的地面测量获得^[16]。陆地积雪的盐度通常认为是 0^[36-37],本次模拟

也将积雪盐度设为 0。地表温度由 NoSREx 实验的地面测量数据获得。水平极化和垂直极化的积雪-土壤界面反射率,本研究是利用 Wang & Choudhury (1981)半经验模型(简称 QHN)计算^[38-39]。QHN 模型中所需的土壤介电常数采用 Dobson 模型计算^[40]。土壤-雪界面的粗糙程度通过土壤粗糙度来反映^[41-42]。土壤粗糙度通常用均方根高度和表面相关长度两个统计变量表示,其具体定义可见文献^[43-44]。土壤粗糙度较难直接测量,通常采用最小化成本函数(cost function)^[45-48]的方法估算。本研究选用的代价函数如下:

$$CF = \frac{1}{2m} \sum (T_M - T_s)^2 \quad (1)$$

式中: CF 为代价函数的值; m 为模拟次数; T_m 为测量亮温; T_s 为模拟亮温。

2 积雪演化特征分析

2.1 不同积雪期的判定

气温和雪深随时间变化如图 2 所示。气温日波动性和月波动性较大, 年波动性相似, 一般在 11—12 月降低到 0℃ 以下, 在 4—5 月上升到 0℃ 以上;

每年雪深的变化趋势相似, 一般从 10—11 月逐渐累积, 在 3—4 月达到最大值, 在 4 月下旬至 5 月迅速融化。根据图 2 以及本文 1.3.1 章节的分类标准, 判定芬兰 Sodankylä 的积雪期分为积累期、稳定期和消融期, 积累期一般为 10 月—次年 2 月, 时长约为 4~5 个月; 稳定期为 2—4 月, 时长约为 2 个月; 消融期为 4—5 月, 时长约为 1 个月, 其具体结果时间如表 1。

表 1 不同雪期分类的时间(年-月-日)
Table 1 Time classification of different snow peroid (yyyy-mm-dd)

积累期	稳定期	消融期
2009-10-08—2010-02-05	2010-02-05—2010-04-07	2010-04-07—2010-05-07
2010-10-28—2011-02-08	2011-02-08—2011-04-07	2011-04-07—2011-05-09
2011-11-25—2012-02-15	2012-02-15—2012-04-26	2012-04-26—2012-05-21
2012-10-24—2013-02-04	2013-02-04—2013-04-13	2013-04-13—2013-05-14

2.2 雪颗粒形状变化

图 3 展示了自然积雪的分层特性。如图可知, 融化状态(Melt Forms, MF)主要出现在积累期早期(10—12 月)和消融期(4—5 月)。降水粒子(Precipitation Particles, PP)和分解碎片降水粒子(Decomposing and Fragmented precipitations particles, DF)主要出现在近雪表层(图中均为绿色), 且主要在 4 月前出现。在积累期后期和稳定期, 积雪分层颗粒形状出现的种类主要是圆形颗粒(Rounded Grains, RG)、片状颗粒(Faceted Crystals, FC)、深霜(Depth Hoar, DH)。在消融期主要类别为融化状态。图 3(c)可见深蓝色较少, 表明 2011—2012 年缺乏深霜层, 这与该年较其他年份更温和的气温有关, 色带参考季节性陆面积雪的国际分类^[49]。

2.3 雪粒径变化

结合图 3~4 可知: (1) 在整个雪季, 研究区域的垂直剖面上每个积雪层粒径不同, 一般底层积雪粒径最大且为深霜层, 即深霜层粒径最大, 底层粒径会从小变大再变小, 表层粒径一直较小且变化不大。(2) 在积累期早期, 10—12 月, 雪深较浅时, 雪的粒径也较小, 一般在 1.5 mm 以内。(3) 随着雪深的积累, 在积雪底层的粒径逐渐增大。在积累期早期 10—12 月从较小的 0.25~1 mm, 在积累期后期(1—2 月)增长为 1~3 mm。(4) 随着雪深增加速度减缓, 在积累期后期和稳定期(1—4 月), 近地表的粒径维持在 2 mm 左右, 均出现了增加到至少 2.5 mm 的现象。(5) 在融雪期 4—5 月, 观测雪层的颗粒形状大多数为融雪状态, 积雪融化, 粒径相较稳定期的表层

大底层小, 为 1 mm 左右。(6) 靠近积雪表面的粒径值始终较小, 基本维持在 1.5 mm 以内, 但少数情况下会出现较大值。(7) 观测的平均粒径的最大值出现在每年的稳定期, 2—3 月, 值为 2.5~4 mm, 均出现在近地表层。

3 微波辐射亮温模拟分析

3.1 微波亮温差对雪深变化的依赖分析

为研究线性亮温梯度算法(18 GHz 和 37 GHz, V 和 H)在北欧实验区域的适用性, 分析了微波亮温差对雪深变化的依赖性(图 5)。积累期(12 月—次年 2 月)和稳定期前期(2—3 月), 雪深和亮温差(18~37 GHz)整体来看具有一致的变化趋势, 局部来看具有相反的波动性, 即雪深小幅度减小亮温差反向增加, 如图 5 中矩形框中的部分: 黑线和锯齿形状的红色和蓝色曲线反向波动, 这可能是由于融雪使得亮温差减小, 而后积雪重新冻结亮温差增大。在稳定期后期(3—4 月), 由于 3 月雪深均大于 60 cm, 亮温差对雪深增加不再敏感趋于饱和, 体现了算法的局限性^[21]; 局部反向现象较之前不明显, 这可能是由于早期融雪形成的雪壳结构逐渐松弛为更典型的冬末降雪^[31], 雪粒径和雪颗粒形状均改变。在消融期(4—5 月), 随着积雪迅速融化雪深减小, 亮温差值波动性较大基本维持在 ±15 K 以内, 亮温差与雪深线性相关性不明显。

雪深的变化和亮温差变化在积累期和稳定期总体上具有相似性, 但局部来看没有明显的一致性, 这可能是由于积雪亮温还会受到如含水量、积

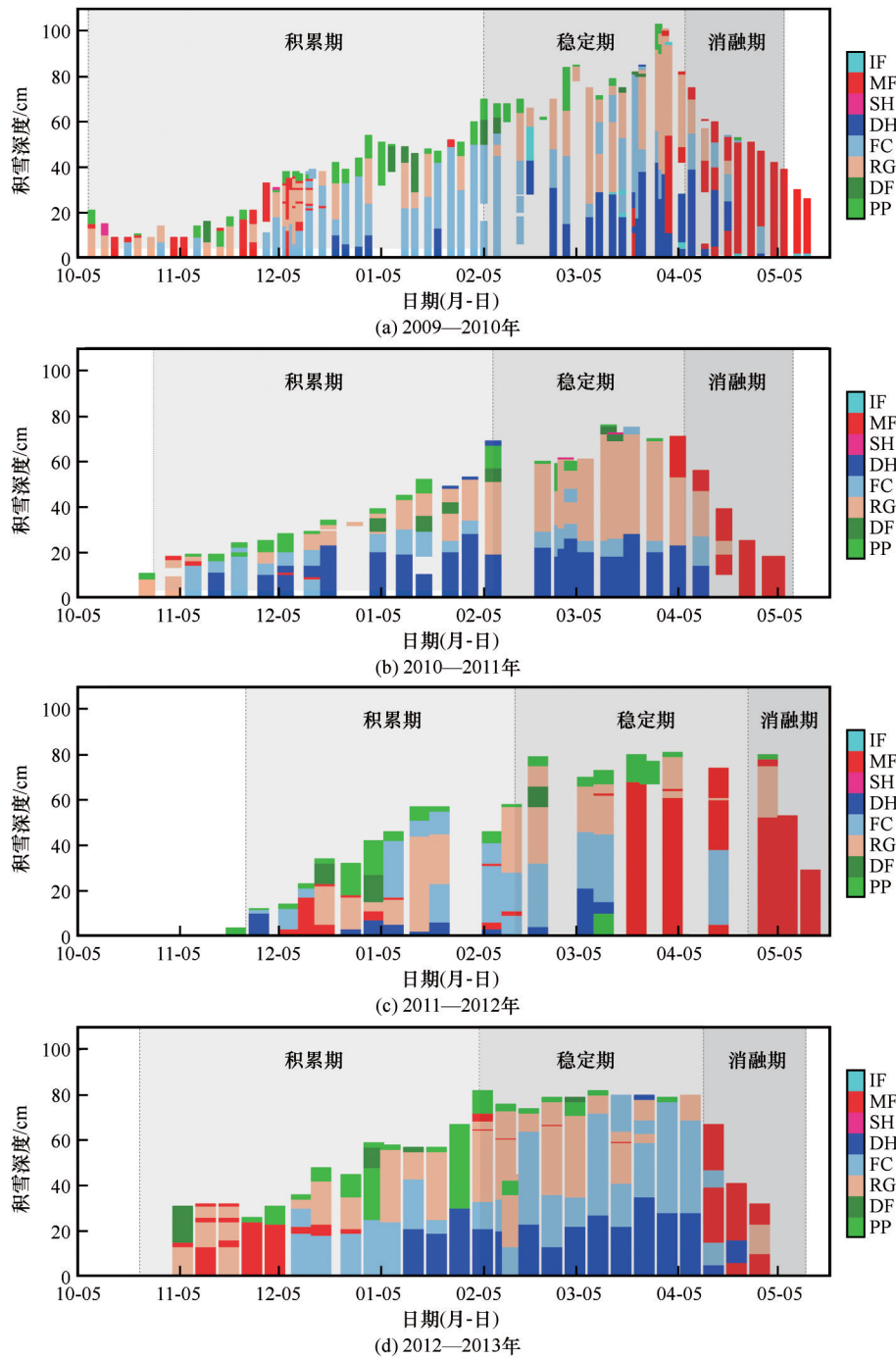


图3 2009—2013年自然积雪的分层特性

Fig. 3 Stratification characteristics of snow cover from 2009 to 2013

雪粒径以及雪颗粒形状等的影响,而这些参数均随着时间变化。由上一章可知整个雪季积雪演变较大,因此需在算法中考虑随时间演化的积雪特征,已有研究考虑积雪动态变化的算法^[8]。微波亮温差对雪深和线性函数在不同时期依赖性不同,进一步表明提高反演算法精度需考虑参数的动态变化。

3.2 MEMLS 模型参数值调整

模型模拟所需要的土壤粗糙度参数较难直接

测量,且其对模型模拟结果有一定影响,在模拟前需要确定土壤粗糙度参数的值。地表均方根高度的值由土壤本身的性质决定,不同情况下该数值可以在数毫米到几十毫米之间变化^[39]。采用1.3.2章节所述方法,得出的不同频率和入射角的最优值(表2),大多数情况下,在值为0.001 m时均方根误差最小,因此在模拟时将垂直和水平极化下的地表粗糙度值均设为0.001 m。潘金梅等^[18–20]的研究表

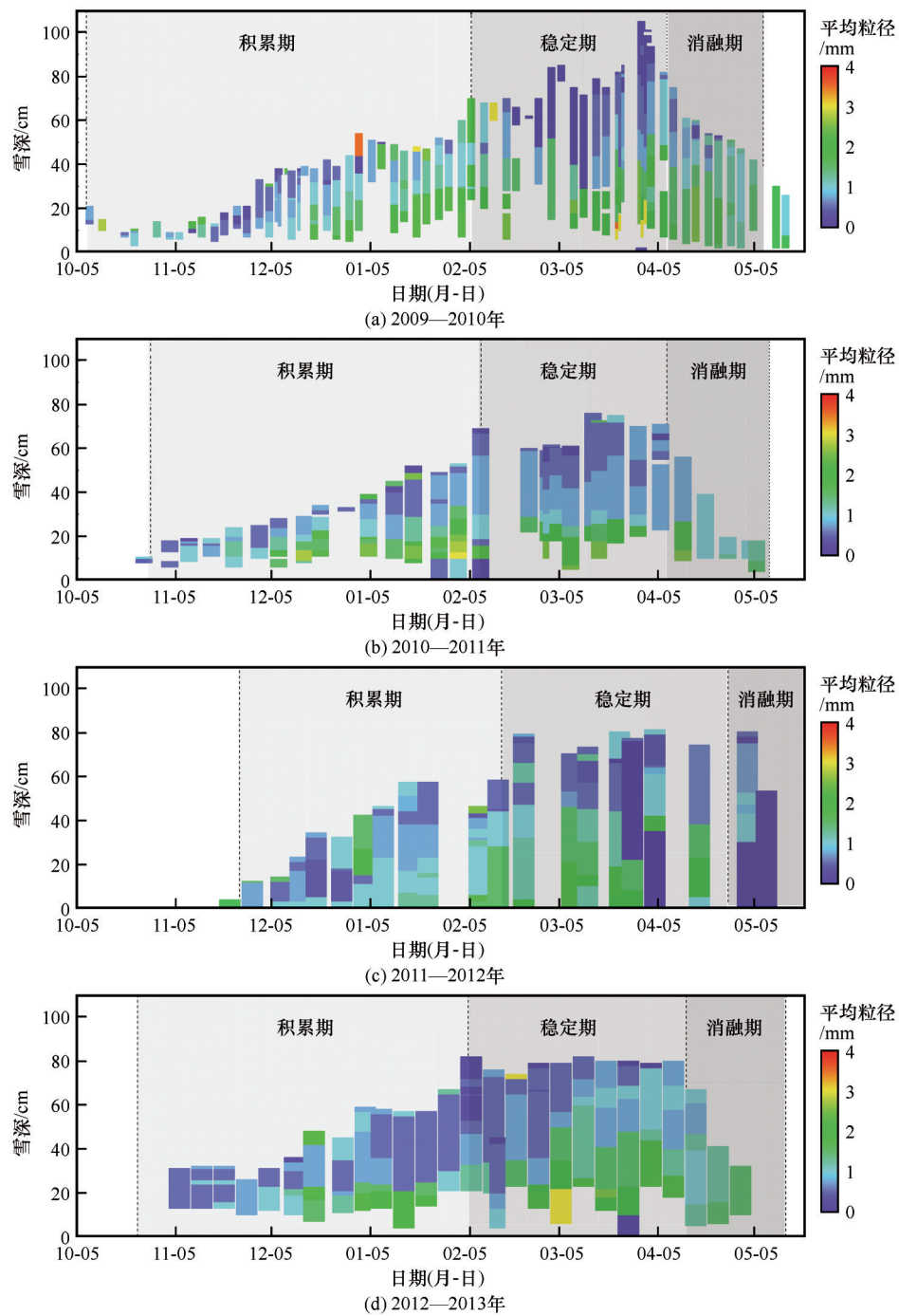


图4 2009—2013年雪季积雪粒径演变

Fig. 4 Evolution of snow grain size in snow season from 2009 to 2013

明 Sodankylä地区的地表均方根高度大约为0.001 m, 与本研究的估算结果吻合。

3.3 微波辐射亮温模拟结果验证

调整参数值后,基于MEMLS模型模拟2009—2013年的微波辐射亮温,用观测亮温和模拟亮温的均方根误差评估模拟的准确性。如表3所示,在10.65 GHz频率下,入射角度为50°和60°,极化方式为垂直时模拟结果最好,RMSE分别为4.79 K和

4.72 K。其次模拟结果较好的是18.7 GHz频率下,入射角为50°和60°,极化方式为垂直极化,RMSE分别为7.13 K和7.25 K。频率为37 GHz时,模拟结果较差,当水平极化入射角为60°时RMSE达到21.76 K。模拟结果最差的是在90 GHz下,极化方式为垂直极化,入射角为50°和60°,RMSE分别为22.37 K和22.14 K。因此在低频波段的垂直极化的模拟结果较好,高频模拟结果较差。

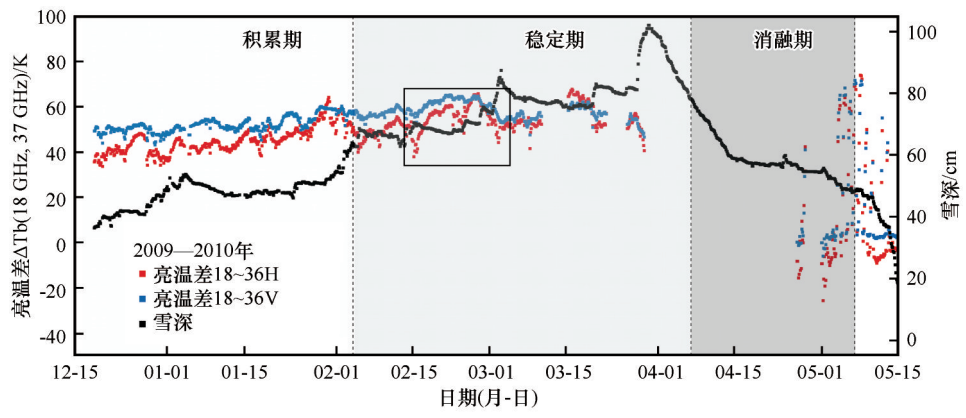


图5 2009—2010年雪深和亮温差(18 GHz和37 GHz)在50°入射角条件下随时间的变化
Fig. 5 Variation of snow depth and brightness temperature difference (18 GHz and 37 GHz) with time at 50° incident angle from 2009 to 2010

表2 地表均方根误差参数最优值
Table 2 Optimal values of surface root mean square error parameters

频率/GHz	入射角	水平极化	垂直极化
		地表均方根误差最优值/m	
10.5	30°	0.005	0.001
	40°	0.003	0.001
	50°	0.003	0.001
	60°	0.003	0.001
18.7	30°	0.003	0.002
	40°	0.002	0.001
	50°	0.001	0.001
	60°	0.001	0.001
37	30°	0.001	0.001
	40°	0.001	0.001
	50°	0.001	0.001
	60°	0.001	0.001
90	30°	0.001	0.001
	40°	0.001	0.001
	50°	0.001	0.001
	60°	0.001	0.001

比较不同积雪期的模拟准确度(表4),在10.65 GHz且垂直极化下,除入射角为40°,稳定期的模拟亮温的RMSE均小于其他两时期;在18.7 GHz

且垂直极化下,在入射角为40°和60°,稳定期的模拟亮温的RMSE小于其他两时期;在37 GHz且垂直极化下,MEMLS模型在稳定期的模拟效果较积累期和消融期更好;在90 GHz的模拟结果较差,模拟亮温和观测亮温的RMSE均大于20 K。将2009—2013年模拟出的亮温和观测亮温进行了对比分析(图6)。总体上,水平极化较垂直极化的观测和模拟亮温波动性更大;10.65 GHz和18.7 GHz相较37 GHz和90 GHz的模拟亮温更为接近观测亮温;稳定期较积累期和消融期的模拟亮温更为接近观测亮温。

4 结论与讨论

依据2009—2013年北欧积雪观测数据,分析了芬兰Sodankylä研究区域的雪季的不同时期的积雪物理演化过程,并利用MEMLS模型对积雪的微波辐射亮温进行了模拟,分析认为:基于温度和雪深的变化情况,可将整个雪季分为积累期(10月—次年2月)、稳定期(2—4月)、消融期(4—5月)。

地面观测数据分析表明,积雪物理演化过程有如下3点特征:1)气温和雪层温度在稳定期达到最低,雪深在稳定期末积累到最厚;2)积累期和稳定

表3 模拟和观测亮度温度的均方根误差
Table 3 Root mean square errors of simulated and observed brightness temperatures

频率/GHz	V垂直极化RMSE/K				H水平极化RMSE/K			
	30°	40°	50°	60°	30°	40°	50°	60°
10.65	10.77	10.21	4.79	4.72	19.06	35.33	14.24	11.10
18.7	11.16	8.72	7.13	7.25	22.12	12.48	12.82	17.44
37	14.52	14.82	15.21	15.12	13.23	18.56	19.34	21.76
90	18.47	21.26	22.37	22.14	20.03	23.10	18.89	20.49

表4 不同积雪期模拟和观测亮度温度的均方根误差

Table 4 Root mean square errors of simulated and observed brightness temperatures in different snow period						
频率/GHz	积雪期观测条件			积累期	稳定期	消融期
10.65	水平极化 $\Delta T_b/\%$	入射角	30°	30.64	52.59	31.13
			40°	25.19	29.01	14.40
			50°	13.20	13.82	12.30
			60°	10.35	10.93	18.19
	垂直极化 $\Delta T_b/\%$	入射角	30°	12.97	8.27	6.75
			40°	9.38	11.48	6.74
			50°	4.47	2.49	5.87
			60°	26.20	3.41	6.52
18.7	水平极化 $\Delta T_b/\%$	入射角	30°	37.60	30.66	25.66
			40°	21.48	8.62	11.71
			50°	21.38	12.89	9.75
			60°	31.32	30.37	12.36
	垂直极化 $\Delta T_b/\%$	入射角	30°	14.47	10.11	3.59
			40°	10.83	7.26	3.80
			50°	8.44	6.41	4.15
			60°	8.26	5.32	7.41
37	水平极化 $\Delta T_b/\%$	入射角	30°	15.41	12.53	26.91
			40°	24.91	22.34	27.53
			50°	30.16	31.05	23.03
			60°	35.80	36.74	33.49
	垂直极化 $\Delta T_b/\%$	入射角	30°	19.54	13.34	24.57
			40°	22.17	13.93	29.46
			50°	21.68	19.43	25.56
			60°	23.94	14.31	37.85
90	水平极化 $\Delta T_b/\%$	入射角	30°	22.63	43.74	42.70
			40°	23.90	42.20	57.13
			50°	26.47	40.16	48.10
			60°	27.01	17.98	45.98
	垂直极化 $\Delta T_b/\%$	入射角	30°	25.74	48.54	43.63
			40°	28.01	50.46	58.94
			50°	29.79	49.45	50.64
			60°	28.57	32.24	49.85

期颗粒形状主要为圆形粒径、片状颗粒和深霜,深霜粒径较大;3)积累期早期会出现融化状态和降水粒子,消融期积雪颗粒形状主要为融化状态。

从3个积雪期与雪深、亮温差的关系来看,积累期(10月—次年2月)和稳定期前期(2—3月),雪深和亮温差(18~37 GHz)整体来看变化趋势一致,在稳定期后期(3—4月),雪深均超过60 cm,亮温差趋于饱和。在消融期(4—5月),积雪迅速融化雪深减小,亮温差(18和37 GHz)基本维持在±15 K以内且波动性较大,积雪微波辐射亮温差和雪深两者的关系随着雪季的不同时期变化,难以用静态半经验反演算法进行描述。这可能是由于积雪物理特性本

身(从而微波辐射)随时间具有较大的变异性,后续可考虑针对不同积雪期的积雪演化动态过程来改进积雪反演算法。

MEMLS模型输入的地表均方根高度参数设为0.001 m^[20]较为适合芬兰实验环境,校正后的MEMLS模型在较低频率(10.65 GHz、18.7 GHz),较高入射角(50°和60°)且垂直极化下能更好的模拟地基辐射计观测亮温。3个雪期均在低频(10.65 GHz和18.7 GHz)的垂直极化下,模拟结果较好。在稳定期的10.65 GHz、50°入射角且垂直极化下模拟结果最佳, RMSE最低为2.49 K。对于37 GHz且垂直极化下,稳定期的模拟效果较积累期和消融期更

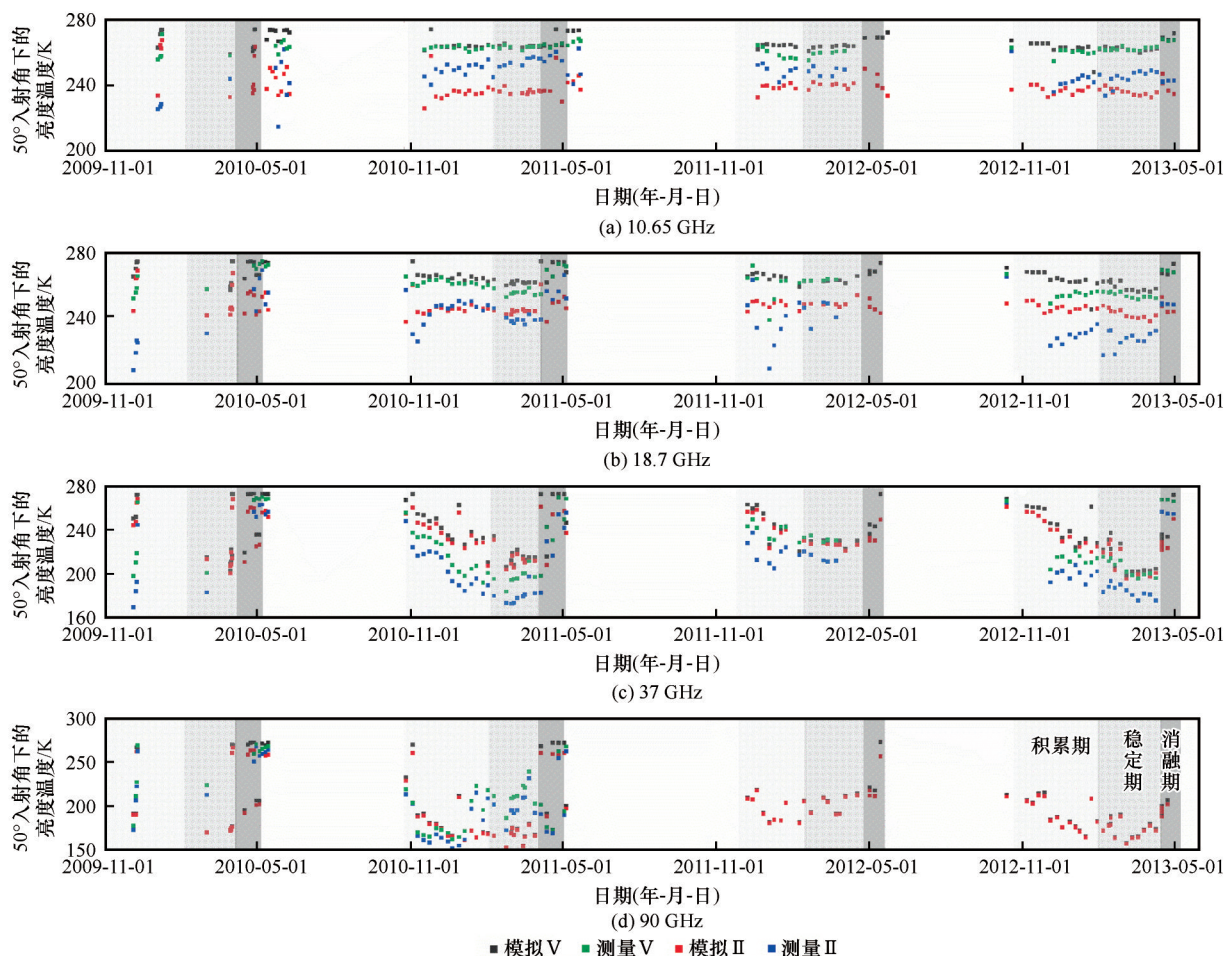


图6 2009—2013年入射角50°、垂直(V)和水平极化(H)下10.65、18.7、37 GHz和90 GHz的测量和模拟亮度温度

Fig. 6 Measured and simulated brightness temperature at 10.65, 18.7, 37 GHz and 90 GHz at incident angle 50°, vertical (V) and horizontal polarization (H) from 2009 to 2013

好,这表明根据气温和雪深变化来分类积雪期,可更好的表征积雪演化对微波辐射信号的影响。模拟结果在低频段(10.65 GHz和18.7 GHz)较好,可考虑结合较低频段来改进反演算法。

MEMLS模型模拟和观测亮温的误差是由模型本身的局限性以及观测参数误差等因素造成的。模拟结果受各个输入参数的影响,不同参数对模拟结果影响程度不同^[50]。驱动MEMLS模型模拟的参数通过积雪剖面调查获取,该调查为了尽可能详细地捕捉积雪变化,由专家每隔3~5天且连续四个冬季开展雪坑(snow pit)测量。根据该高质量的积雪剖面调查结果进行模拟,模拟和观测亮温仍存在误差,这表明一些影响积雪辐射传输过程的重要变量可能在模型中并没有得到有效的体现,因此有必要开展新的积雪模型研究。此外,地面观测参数在模型模拟和积雪反演中能够起到重要的指导作用,但为模型和反演算法确定合理的积雪结构等效参数

从而让模型更好的反映真实情况同样重要。虽然辐射计观测点和积雪剖面调查点的空间距离非常近,但积雪结构的空间变异性依然会导致模拟的结果和辐射计观测结果出现差异,这在一定程度上反映出将传统地面调查技术获取的积雪结构信息直接运用于模型模拟的局限性。而且,积雪剖面调查获取积雪结构信息的过程中会存在调查者主观因素的影响(例如如何确定积雪中每一层的边界以及如何选取粒径的测量位置),这也会导致辐射计观测结果和模拟结果出现偏差。一般而言,高频波段比低频波段对积雪粒径更敏感,而水平极化比垂直极化对积雪分层结构更敏感。本次模拟结果低频优于高频,且低频(10.65 GHz和18.7 GHz)的垂直极化优于水平极化,高频(90 GHz)的水平极化优于垂直极化,这说明积雪结构信息在模型模拟中的重要性。一方面,积雪剖面调查取样过程中的细微偏差足以对模拟结果产生显著影响;另一方面,模型

模拟中的理想化条件和自然条件下积雪的状况存在区别,物理理论和实际观测的有效连接还迫切的需要更深入的研究。

参考文献(References):

- [1] Xiao Xiongxin, Zhang Tingjun. Passive microwave remote sensing of snow depth and snow water equivalent: overview [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(6): 590-605. [肖雄新, 张廷军. 基于被动微波遥感的积雪深度和雪水当量反演研究进展[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(06): 590-605.]
- [2] Grünwald T, Schirmer M, Lehning M. Measurements of small scale spatial and temporal variability of snow depth and SWE in a small mountain catchment [C]//*Proceedings ISSW*. 2009.
- [3] López-Moreno J I, Fassnacht S R, Heath J T, et al. Small scale spatial variability of snow density and depth over complex alpine terrain: Implications for estimating snow water equivalent[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 55: 40-52.
- [4] Markus T, Powell D C, Wang J R. Sensitivity of passive microwave snow depth retrievals to weather effects and snow evolution[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(1): 68-77.
- [5] Kang D H, Barros A P. Observing system simulation of snow microwave emissions over data sparse regions—Part II: multi-layer physics[J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2011, 50(5): 1806-1820.
- [6] Jiang Linmei, Shi Jiancheng, Zhang Lixin. Comparison of dry snow emission model with experiential measurements[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(4): 515-522. [蒋玲梅, 施建成, 张立新. 积雪辐射模型验证[J]. *遥感学报*, 2006, 10(4): 515-522.]
- [7] Shi Jiancheng, Xiong Chuan, Jiang Linmei. Review of snow water equivalent microwave remote sensing[J]. *Science China Earth Sciences*, 46(4): 529-543. [施建成, 熊川, 蒋玲梅. 雪水当量主被动微波遥感研究进展[J]. *中国科学: 地球科学*, 2016, 46(4): 529-543.]
- [8] Kelly R E, Chang A T, Tsang L, et al. A prototype AMSR-E global snow area and snow depth algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(2): 230-242.
- [9] Li Xin, Che Tao. A Review on Passive Microwave Remote Sensing of Snow Cover[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(3): 487-496. [李新, 车涛. 积雪被动微波遥感研究进展[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(3): 487-496.]
- [10] Brucker L, Royer A, Picard G, et al. Hourly simulations of the microwave brightness temperature of seasonal snow in Quebec, Canada, using a coupled snow evolution-emission model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(8): 1966-1977.
- [11] Hall D K, Kelly R E J, Riggs G A, et al. Assessment of the relative accuracy of hemispheric-scale snow-cover maps [J]. *Annals of Glaciology*, 2002, 34: 24-30.
- [12] Huang Xiaodong, Li Xubing, Liu Changyu, et al. Remote sensing inversion of snow cover extent and snow depth/snow water equivalent on the Qinghai-Tibet Plateau: advance and challenge[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(5): 1138-1149. [黄晓东, 李旭冰, 刘畅宇, 等. 青藏高原积雪范围和雪深/雪水当量遥感反演研究进展及挑战[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(5): 1138-1149.]
- [13] Saberi N, Kelly R, Flemming M, et al. Review of snow water equivalent retrieval methods using spaceborne passive microwave radiometry[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(3): 996-1018.
- [14] Tedesco M, Reichle R, Low A, et al. Dynamic approaches for snow depth retrieval from spaceborne microwave brightness temperature[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 1955-1967.
- [15] 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: 14-29.
- [16] Lemmetyinen J, Kontu A, Pulliainen J, et al. Nordic snow radar experiment[J]. *Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems*, 2016, 5(2): 403-415.
- [17] Leppanen L, Kontu A, Hannula H-R, et al. Sodankylä manual snow survey program[J]. *Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems*, 2016, 5(1): 163-179.
- [18] Matzler 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.
- [19] Wiesmann A, Matzler C. Microwave emission model of layered snowpacks[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70(3): 307-316.
- [20] Pan J, Durand M, Sandells M, et al. Differences between the HUT snow emission model and MEMLS and their effects on brightness temperature simulation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(4): 2001-2019.
- [21] Rott H, Cline D W, Duguay C, et al. CoReH₂O: high-resolution X/Ku-band radar imaging of cold land processes[C]//2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium-IGARSS. IEEE, 2013: 3479-3482.
- [22] Chang W, Tsang L, Lemmetyinen J, et al. Bicontinuous/DMRT model applied to active and passive microwave remote sensing of terrestrial snow[C]//2014 13th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (MicroRad). IEEE, 2014: 103-106.
- [23] Tan S R, Chang W M, Tsang L, et al. Modeling both active and passive microwave remote sensing of snow using Dense Media Radiative Transfer (DMRT) theory with multiple scattering and backscattering enhancement[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(9): 4418-4430.
- [24] Parrella G, Della Corte A, Hajnsek I, et al. Snow properties retrieval using TerraSAR-X dual-polarization data [C]//2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2012: 4410-4413.
- [25] Cui Y R, Xiong C, Lemmetyinen J, et al. Estimating Snow Water Equivalent with Backscattering at X and Ku Band Based on Absorption Loss[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(6).
- [26] Xiong C, Shi J C, Lemmetyinen J. Refinement of the X and Ku band dual-polarization scatterometer snow water equivalent retrieval algorithm [C]//2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2014: 2419-2422.
- [27] 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.
- [28] Kang D H, Tan S R, Kim E J. Evaluation of brightness temperature sensitivity to snowpack physical properties using coupled snow physics and microwave radiative transfer models [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019,

- 57(12): 10241-10251.
- [29] Kang D H, Tang S, Kim E J. Interpreting snowpack radiometry using currently existing microwave radiative transfer models [C]//Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVII. SPIE, 2015, 9637: 186-194.
- [30] Lemmetyinen J, Pulliainen J, Arslan A, et al. Analysis of active and passive microwave observations from the NoSREx campaign [C]//2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2011: 2737-2740.
- [31] Lemmetyinen J, Pulliainen J, Kontu A, et al. Observations of seasonal snow cover at X and Ku bands during the NoSREx campaign [C]//EUSAR 2014; 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar. VDE, 2014: 1-4.
- [32] Pulliainen J, Karna J P, Hallikainen M. Development of geophysical retrieval algorithms for the MIMR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31 (1): 268-277.
- [33] Pulliainen J T, Grandell J, Hallikainen M T. Retrieval of surface temperature in boreal forest zone from SSM/I data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(5): 1188-1200.
- [34] Aschbacher J. Land surface studies and atmospheric effects by satellite microwave radiometry [J]. 1993.
- [35] Durand M, Kim E J, Margulis S A. Quantifying uncertainty in modeling snow microwave radiance for a mountain snowpack at the point-scale, including stratigraphic effects [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46 (6): 1753-1767.
- [36] Gu L, Fan X, Li X, et al. Snow Depth Retrieval in Farmland Based on a Statistical Lookup Table from Passive Microwave Data in Northeast China [J]. Remote Sensing, 2019, 11(24): 3037.
- [37] Harlow R C, Essery R. Tundra snow emissivities at MHS frequencies: MEMLS validation using airborne microwave data measured during CLPX-II [J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2012, 50(11): 4262-4278.
- [38] Wang J R, Choudhury B J. Remote sensing of soil moisture content, over bare field at 1.4 GHz frequency [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1981, 86(C6): 5277-5282.
- [39] Montpetit B, Royer A, Wigneron J P, et al. Evaluation of multi-frequency bare soil microwave reflectivity models [J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 162: 186-195.
- [40] Dobson M C, Ulaby F T, Hallikainen M T, et al. Microwave dielectric behavior of wet soil-Part II: dielectric mixing models [J]. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 1985, (1): 35-46.
- [41] Wang Xue, Liu Quanming, Ma Teng. Inversely calculating the roughness of bare soil surface in cold-arid irrigation regions using the SAR method [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(6): 74-80. [王学, 刘全明, 马腾. 西北寒旱灌区裸露地表粗糙度 SAR 反演建模方法研究 [J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(6): 74-80.]
- [42] Moreno R G, Álvarez M C D, Alonso A T, et al. Tillage and soil type effects on soil surface roughness at semiarid climatic conditions [J]. Soil and Tillage Research, 2008, 98(1): 35-44.
- [43] Allmaras R R, Burwell R E, Larson W E, et al. Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage [R]. Washington: U. S. Department of Agriculture, Conservation Research Report No. 7. 1966: 34-46.
- [44] Jiang Chongya, Fang Hongliang, Wei Shanshan. Review of land surface roughness parameterization study [J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(3): 292-303. [江冲亚, 方红亮, 魏珊珊. 地表粗糙度参数化研究综述 [J]. 地球科学进展, 2012, 27(3): 292-303.]
- [45] Grant J P, Saleh-Contell K, Wigneron J P, et al. Calibration of the L-MEB model over a coniferous and a deciduous forest [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(3): 808-818.
- [46] Ma C F, Li X, McCabe M F. Retrieval of high-resolution soil moisture through combination of Sentinel-1 and Sentinel-2 data [J]. Remote Sensing, 2020, 12(14): 2303.
- [47] Akbar R, Moghaddam M. Radar-radiometer soil moisture estimation with joint physics and adaptive regularization in support of SMAP [C]//2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2014: 3634-3637.
- [48] Lawrence H, Wigneron J P, Demontoux F, et al. Evaluating the Semiempirical H-Q model used to calculate the L-band emissivity of a rough bare soil [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(7): 4075-4084.
- [49] Fierz C, Armstrong R L, Durand Y, et al. The international classification for seasonal snow on the ground [R]. Paris: IHP-VII Technical Documents in Hydrology, No. 83, IACS Contribution No. 1, UNESCO-IHP, 2009.
- [50] Bai Yunjie, Lu Ling, Li Xin, et al. Sensitivity analysis on snow parameters impacting passive microwave brightness temperature of snow: a study based on MEMLS [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(5): 622-630. [白云洁, 卢玲, 李新, 等. 积雪微波辐射亮温对积雪参数的敏感性分析——以多层积雪微波辐射模型为例 [J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(5): 622-630.]

Analysis of the evolution of snow cover and microwave irradiation based on Nordic Snow Radar Experiment

ZHOU Jingtian^{1,2,3}, QIU Yubao^{1,2,4}, HUANG Lin^{1,2,3}, Juha LEMMETYINEN^{4,5},
SHI Lijuan^{1,2,4}, LI Qinghuan^{1,2,4}, SHI Jiancheng⁶

(1. Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. International Research Center of Big Data for Sustainable Development Goals, Beijing 100094, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Joint Research Center for Arctic Observations, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences and Arctic Space Center, Finnish Meteorological Institute (JRC-AO), Chinese Academy of Sciences, Sodankylä FI-99660, Finland; 5. Finnish Meteorological Institute, Helsinki FI-00560, Finland; 6. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In passive microwave snow water equivalent retrieval algorithms, the change characteristics of snow cover physical parameters over time affect the inversion accuracy. This paper uses Nordic Snow Radar Experiment (NoSREx) datasets from 2009 to 2013 to study the snow cover evolution characteristics over time and its influence on the microwave brightness temperature. Based on the change of snow depth and temperature, the snow period in the northern arctic inland regions is divided into the snow accumulation period (October to February), the snow stable period (February to April) and the snow melting period (April to May). Firstly, characteristics of the snow evolution process in different periods are analyzed. The shape of snow particles is mainly melting forms (MF) in the early accumulation period, and rounded grains (RG), faceted crystals (FC), and depth hoar (DH) in the late accumulation period and stable period, the snow melting period is dominated by MF; from the accumulation period to the snow melting period, the snow particles in the bottom layer will grow from small to large and then small. The maximum particle size appears in the annual stable period (February to March), the value is about 2.5~4.0 mm, all appear in the layer near the ground surface, the surface particle size is always small and relatively stable. Secondly, through the analysis of the relationship between snow depth and microwave brightness difference (18 and 37 GHz), the brightness temperature difference has different dependence on snow depth in different snow accumulation periods. During the accumulation period and the stable period, the changes of snow depth and the brightness temperature difference are positively similar; during the melting period, the correlation is not obvious due to the influence of snow melting. Thirdly, combined with the simultaneous observation of ground-based radiometers and the Microwave Emission Model of Layered Snowpacks (MEMLS), a forward one-dimensional microwave simulation environment was constructed, the results showed that three periods of 10.65 GHz and 18.7 GHz and the simulation results under vertical polarization are better at 37 GHz and 90 GHz; under 10.65 GHz, at the stable period, vertical polarization and an incident angle of 50°, the microwave brightness temperature simulation results are the best, RMSE is 2.49 K; compared with vertical polarization, the simulation results under three periods of 90 GHz are better under horizontal polarization; due to changes in the surface snow, the 90 GHz simulation results are unstable, especially during the snow melting period, the minimum RMSE reached 42.7 K. This research is helpful to understand the characteristics of snow cover evolution over time and its influence on microwave radiation simulation. It shows that in the passive microwave snow water equivalent retrieval algorithm, the dynamic process of snow cover evolution needs to be considered in different snow periods.

Key words: snow; microwave brightness temperature; NoSREx; MEMLS

(责任编辑: 车涛)