

文章编号: 1000-0240(2009)02-0198-09

# 冻融交替季节黑河上游代表性地物 类型的微波辐射时序特征

张立新<sup>1,2</sup>, 赵少杰<sup>1,2</sup>, 蒋玲梅<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学/中国科学院 遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

**摘 要:** 被动微波遥感是监测全球土壤冻融的有利手段, 然而由于缺乏实验观测数据, 对冻土的微波辐射特征和机理并不是很清楚. 2008年3月利用地基微波辐射计(RPG-8CH-DP Radiometer)在黑河流域上游对典型地物 18.7 GHz 和 36.5 GHz 的微波辐射进行了连续观测, 获取了3种典型土地类型的冻融过程中两个频率双极化的微波辐射特征, 计算了土壤冻融过程中发射率和亮温梯度的时序特征并进行了分析. 结果表明: 土壤冻结会引起土壤发射率的变化, 变化的大小主要受土壤表层很薄一层土壤的含水量影响, 这是因为这两个波段对土壤的微波穿透深度很小. 另外, 尽管土壤冻结后亮温梯度会降低, 但大多数情况下并没有观测到冻土负的亮温梯度.

**关键词:** 被动微波遥感; 冻土; 亮温梯度; 微波辐射计; 黑河流域

**中图分类号:** TP722.6; P642.14 **文献标识码:** A

## 1 概述

### 1.1 研究意义

陆地表层的冻融过程发育广泛, 且动态性强. 冻融过程的实质是陆地表层水的相变过程, 温度低于 0℃, 液态水相变为冰, 发生冻结; 温度高于 0℃时, 则发生相反的过程. 由于水冰相变潜热巨大, 并且对地表介质的结构会产生一定的影响. 因此, 地表冻融过程的发育, 在诸多的地球表层过程中占有重要的地位, 其主要的效应体现在以下几个方面: 1) 伴随相变过程的发生, 潜热的释放和吸收, 大大减缓了地表温度的快速升降, 对温度有调蓄作用, 使其保持适宜的范围; 2) 岩土孔隙水的相变, 会造成水文地质条件的改变. 冰晶堵塞孔隙, 形成隔水层, 或伴随融化使得隔水层消失, 导致浅层地下水的运动发生变化; 3) 孔隙水的冻融交替, 一方面显著影响岩土层的导热性能; 另一方面还会显著影响毛细水的运动, 导致地气交换伴随冻融过

程交替而发生较大变化; 4) 冻融过程也是一个重要的物理风化过程, 会导致表层岩土变得松软, 利于耕作, 但不利于水土保持和工程运行; 5) 表层冻融过程, 也会造成径流条件的改变, 特别是冻结期间, 雪水融化不易下渗, 往往形成洪水灾害, 造成巨大损失; 6) 冻结期间, 植被一般会停止发育, 使碳循环逆转. 由此看来, 开展冻融过程的监测, 对于更为全面地理解陆地表层过程及其对人类活动的影响和响应具有重要的理论意义和应用价值.

随着太阳高度角的变化, 陆地表层发生冻结的区域也随之改变. 除了受太阳高度角的影响之外, 地形地貌、海拔高度、大气运动、植被状况、土壤水分等影响热平衡的因素也是制约冻融过程发育时空分布的重要指标. 由于地表的复杂性, 到目前为止, 还没有一个令人信服的数字表达陆地表层冻融过程发育的最大面积, 更不用提某一时刻的面积了. 面积大、动态变化强、地表结构复杂, 使得开展地面冻融过程时空分布测量难度很大. 尽管现有

收稿日期: 2009-01-06; 修订日期: 2009-03-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2007CB714400; 2007CB714403); 中国科学院西部行动计划(二期)项目(KZCX2-XB2-09); 公益性(气象)科研专项(GYHY200706044); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20060027016)资助

作者简介: 张立新(1966—), 男, 河北保定人, 教授, 2000年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获博士学位, 现主要从事地表参数微波遥感研究. E-mail: lxzhang@bnu.edu.cn

的气象台站提供了一些有用的数据,但其分布的密度和覆盖的区域并不足以控制大面积的冻融动态变化。已有的研究工作表明,微波遥感,特别是被动微波遥感,由于其对土壤水分变化响应敏感,受大气影响小,时间分辨率高,成为对冻融过程监测的最有潜力的方法。正如光学遥感的波谱测量一样,在发展利用被动微波监测冻融过程算法之前,需要了解冻融过程中地物的微波辐射特征。本文选择了祁连山黑河流域上游地处甘肃省民乐和山丹县南部的扁都口山前平原、青海境内阿柔乡以及冰沟作为研究区域,利用微波辐射计开展了主要地物类型的微波辐射时序特征测量,为面向黑河流域水文生态研究的微波遥感冻融状态监测算法开发打下了基础。

## 1.2 研究现状和拟解决的科学问题

围绕利用被动微波遥感判别地表冻融状态国内外研究者已经做了很多探索工作。最早的工作见于1974年,England<sup>[1]</sup>发展了考虑体散射的冻土微波辐射模型,研究表明:冻土中微波辐射响应深度要大于融土,冻融土亮温存在显著差异。这为冻土冻融状态的微波遥感判别算法开发提供了理论基础。在此基础上,Zuerndorfer等<sup>[2-3]</sup>发展了基于37 GHz辐射亮温和谱梯度的双参数冻结指数的概念,并应用于SMMR数据,对北部大平原的冻融状态进行了判别分类。Judge等<sup>[4]</sup>基于SSM/I的配置,对判别算法进行了调整,采用37 GHz垂直极化亮温,以及37 GHz与19 GHz垂直极化亮温谱梯度作为判据,并给定阈值范围,用以区分冻土、湿土和干土。晋锐等<sup>[5]</sup>对被动微波遥感监测土壤冻融界限的研究,进行了很好的总结。曹梅盛等<sup>[6]</sup>和Zhang等<sup>[7]</sup>在不同区域运用以上判据时,发现给定的阈值并不具有普适性,需要根据地表状况进行修正。尽管该算法基于星载辐射计观测数据得到了一定程度的应用,但对算法的物理解释和阈值的确定还缺乏足够的理论基础,对冻土微波辐射特征的机理研究还不够充分。例如,判据中对谱梯度出现负值的解释为土壤冻结后在微波波段变得更加透明,土壤的非均质性造成的体散射变暗效应增大,但对高频波段来讲变暗的幅度要大于低频波段,因此会导致谱梯度对应土壤冻结状态而逆转为负值<sup>[2, 8]</sup>,似乎还缺乏更充分的理论和实验支持。很显然,影响冻土亮温变化的因素很多,除了体散射和频率以外,还包括土壤质地、土壤初始含水量、土壤容重、地表植被状况、粗糙度等因素。为了确定这些因素

对微波辐射的影响,有必要开展针对不同地表类型的微波辐射试验研究。有关该方面的研究,需要特别提及的是Wegmuller<sup>[9]</sup>在1990年冬季,为考察冻结作用对裸土微波辐射特征的影响而开展的地面微波辐射测量试验。试验采用了地基辐射计-散射计系统,其中辐射计有4个波段,3.1, 4.6, 7.2和10.6 GHz,均有H、V两种极化方式。文中给出了24 h时间段内两个冻融周期的数据,结果显示:冻结和融化作用在很短的时间内会引起地表微波辐射特征的显著变化,从观测的数据来看,冻结作用使得亮温增加,而融化则相反。当然,更为实质性的影响体现在发射率上,冻结使发射率增加。但注意到,冻结后高频亮温变暗的现象并不明显,几乎可以认为没有发生。此外,在模拟方面,Zhang等<sup>[10]</sup>在土水混合介质介电模型<sup>[11-12]</sup>的基础上发展了冻土介电模型,通过与裸土面散射模型AIEM<sup>[13]</sup>的集成,模拟了各水土要素在可变范围内对冻土微波辐射特征的影响。Mironov等<sup>[14]</sup>对不同有机质的土壤冻融过程中的微波辐射进行了连续的观测,并利用多层相干模型对结果进行了解释。以上研究工作在细节上还存在不一致性,从地面试验的角度来看,需要开展的研究工作主要有:1)测量典型地表冻融期间的微波辐射,考察粗糙度、土壤初始含水量、温度、土壤质地等因素对微波辐射的影响;2)结合新的传感器配置,如AMSR/E、FY3辐射计等,在地面层次验证和发展双参数冻结指数算法。

黑河流域发源于青藏高原东部边缘的祁连山,一直延伸到内蒙古地区的腹地,是典型的内陆河流域。黑河上游地区地物类型丰富,冬季冻融过程发育,积雪、冻土在流域水循环中占有重要地位。为了提高利用被动微波遥感监测土壤冻融状态的精度,2008年3月在上游区域开展了星-机地遥感综合试验,其中一项重要的工作就是利用多波段地基微波辐射计测量典型地物的冻融辐射特征。

## 2 试验背景和仪器

### 2.1 试验背景

在国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“陆表生态环境要素主被动遥感协同反演理论与方法”(2007CB714400)和中国科学院西部行动计划(二期)项目“黑河流域遥感-地面观测同步试验与综合模拟平台建设”(KZCX2-XB2-09)的联合资助下,于2008年3—7月期间,选择高寒与干旱为主要特征的黑河流域为试验区,开展了一次基础性的、多

尺度的、多学科联合的星-机-地遥感综合观测试验. 试图为流域科学研究提供一套多分辨率的、高质量的数据集, 以促进流域尺度天地一体化自动观测系统的建立; 同时为生态环境遥感主被动定量遥感协同建模、反演、验证和示范应用提供多尺度、多时相的星-机-地同步的主被动遥感数据, 促进遥感机理研究.

本文介绍的研究工作主要是在黑河上游开展的冻融过程地基微波辐射测量试验. 试验代表性区域选择了 2 处(图 1), 一个是青海省祁连县黑河上游东支八宝河子流域的阿柔乡; 另一个是甘肃省民乐县东部和山丹县西部交界童子坝河流域的扁都口地区. 阿柔乡中心观测样区( $100^{\circ}26' N$ ,  $38^{\circ}03' E$ )选择在八宝河流域中部河谷地带, 海拔 3 000 m, 地势开阔平坦. 该地区土壤的主要类型是栗钙土和黑钙土, 有机质含量较高, 年均气温在  $0.6^{\circ}C$  以上, 受西南季风的影响降水量较多, 且有从低处向高处递增的趋势, 地表主要由高山草甸覆盖. 扁都口观测区( $100^{\circ}56' N$ ,  $38^{\circ}13' E$ )地处河西走廊中段南侧的洪积冲积扇上, 地势开阔, 平均海拔 2 800 m, 略呈南高北低的态势, 平均坡度约 5% 左右. 该区黄土类物质堆积覆盖层较厚, 土壤为栗钙土和黑钙土, 具有明显腐殖质积累和钙化过程, 有机质含量高, 质地较好. 该区年均气温在  $2^{\circ}C$  左右, 年降水量 200~410 mm, 年蒸发量 1 600~1 800 mm, 最大冻土深度 150~250 cm.

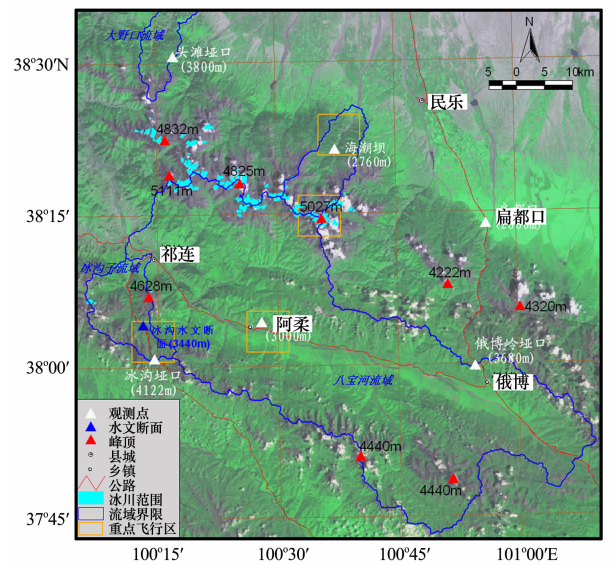


图 1 试验样区位置图

Fig. 1 Map showing the position of experimental plots

2.2 仪器设备与测量方法

2.2.1 微波辐射计结构和性能

试验中所采用的微波辐射计系统由 4 部分组成: 4 频段双极化微波辐射计(RPG-8CH-DP Radiometer), 液压升降平台, 载运车辆和供电系统. 辐射计 4 个频段天线中心频率分别是 6.925 GHz, 10.65 GHz, 18.70 GHz 和 36.50 GHz, 带宽均为 400 MHz, 半功率波束宽度分别为  $6.85^{\circ}$ ,  $6.11^{\circ}$ ,  $10.25^{\circ}$ , 和  $10.25^{\circ}$ . 系统主要性能和技术指标如表 1 所示<sup>[15]</sup>:

表 1 微波辐射计系统主要技术指标

Table 1 Main technical specifications of the microwave radiometer system

项目	性能指标
系统噪声温度	<500 K(所有天线)
辐射分辨率	0.5 K
接收机和天线热稳定性	<0.05 K
天线旁瓣水平	<-30 dB
辐射测量范围	0~350 K
工作环境温度	-30~45 $^{\circ}C$
天线观察方位角范围	$0^{\circ}\sim 360^{\circ}$
天线观察俯仰角范围	$-90^{\circ}\sim +90^{\circ}$
天线最大上升高度	8.20 m
系统峰值功率	<3 kW
供电系统功率	5 kW

辐射计 4 套天线并排置于云台顶端的支架上, 云台底端固定于液压升降平台顶部, 升降平台底座固定在卡车车厢底部. 平台升降和天线旋转、俯仰以及数据采集由遥控和计算机控制. 该系统具有很强的机动性.

2.2.2 微波辐射计的定标

仪器的性能指标完全能够满足对地辐射测量的要求, 但测量前和测量其间的定标是确保数据精度的关键. 定标误差是微波辐射测量不确定性的主要影响因素, 辐射计的定标分为实验前的绝对定标和测量过程中的相对定标.

实验前需要对辐射计进行绝对校准, RPG-8CH-DP Radiometer 采用了 4 点定标方法, 能够准确地校准系统噪声、增益起伏和系统的非线性可能造成的误差. 根据校准用的标准源, 绝对校准可以分为两种: 液氮校准(Liquid Nitrogen Calibration)和扫空校准(Sky Tipping Calibration). 每个通道

内有 1 个高温黑体( $T_d$ )和一个稳定的噪声源( $T_n$ ), 再加上外界的一个低温校准源( $T_c$ )则可以获得 4 个校准点:  $T_d$ ,  $T_d + T_n$ ,  $T_c$ ,  $T_c + T_n$ . 通过 4 个校准点可以建立 4 个校准方程, 从而获取系统噪声、二极管噪声、系统增益和系统的非线性因子的校准值.

采用液氮冷却下的黑体作为低温定标源时, 校准方法称为液氮校准. 校准黑体的发射率可以认为是 1, 温度为液氮的沸点温度. 液氮的沸点温度随气压的变化可以通过仪器自带的气压计和内部程序进行调整, 保证了在不同海拔实验时绝对校准的准确性. 采用宇宙背景辐射(2.7 K)作为低温校准源时, 校准方法称为扫空校准. 在天气晴朗无云的情况下, 大气的光学厚度( $\tau(\theta)$ )与大气质量( $1/\sin(\theta)$ )是线性关系. 通过测量几个角度, 获取这个线性关系, 并外推到大气质量为 0(无大气的情况), 这时辐射计的测量值是接收机系统噪声和宇宙背景辐射的贡献. 再加上仪器内置的黑体和稳定噪声源, 实现 4 点绝对校准.

绝对校准后, 噪声二极管的噪声温度和系统的非线性因子是不随时间变化的, 而系统增益和系统噪声在测量过程中是有波动的. 在测量过程中, 仪器每隔约 5 s 自动进行相对校准, 消除系统增益和系统噪声波动带来的误差. 相对校准是利用仪器内置的黑体和绝对校准确定的噪声二极管的等效温度进行的两点校准. 通过校准, 辐射计的绝对精度可以达到 1K.

### 2.3 微波辐射试验

本次辐射测量试验的目的是获取土壤冻融过程的微波辐射特征, 为卫星遥感冻融过程监测提供算法开发和改进的依据. 试验分别在扁都口和阿柔乡两个样区开展. 由于 6.925 GHz 和 10.65 GHz 天线返回公司维护, 未及时发送至试验场, 因此本次试验只采用了 18.7 GHz 和 36.5 GHz 两个天线, 对冻融地表进行了辐射测量.

#### 2.3.1 测量地点和视场的选择

如果只考虑半功率波束宽度内地表对亮温的贡献, 辐射计在地表的视场范围为椭圆形(图 2). 而实际上位于半功率波束宽度以外的地表对亮温也有贡献. 为了保证辐射计在不同角度的观测具有可比性, 在选择观测区域时遵循的原则是: 1) 观测区域接近水平, 便于辐射计测量; 2) 视场足够大且均匀. 扁都口的土地均为面积广阔的农田, 辐射观测时的视场均能满足以上条件.



图 2 辐射计的视场示意图

Fig. 2 The footprint of the radiometer

#### 2.3.2 扁都口

扁都口大部分土地隶属山丹军马场, 当地以种植大麦和油菜为主, 地势平坦开阔. 3 月中旬地表处于冻融交替期, 夜冻昼融. 根据当地典型地表类型, 同时考虑机载和星载数据的协同, 在拟定的飞行区内, 共选择了 2 个测量点进行连续观测, 包括油菜茬地和大麦茬地.

2008 年 3 月 14 日 11:00~24:00 时对大麦茬地和进行了连续观测, 主要目的是获取土壤在冻融过程中微波辐射亮温的变化. 观测时入射角范围是  $20^\circ \sim 70^\circ$ , 步长  $5^\circ$ , 辐射计的积分时间为 1 s. 辐射计在某个角度观测 3 个左右亮温值, 然后自动调整至下一个观测角进行测量, 直至最后 1 个观测角. 进行完 1 遍扫描测量后会进入下一个扫描测量过程, 这样对同一视场在同一时间就获得了其不同观测角度的冻融过程的微波辐射亮温数据. 2008 年 3 月 16 日 10:00~21:30 对油菜茬地进行了连续观测, 观测方法与大麦地的观测相同. 油菜茬地上均匀分布有约 20 cm 长垂直于地面的干油菜杆.

同时, 测量了 0~1 cm、1~3 cm 和 3~5 cm 的温度和土壤含水量, 温度采用针式铂电阻测量, 其精度为  $0.1^\circ\text{C}$ . 地表温度的日变化见图 3, 可以根据地表的温度判断地表的冻结状况. 土壤含水量采取烘干法测量土壤的重量含水量, 进而由容重计算得到体积含水量. 大麦茬地和油菜茬地的共同点是表层均为含水量很低的干土, 其体积含水量约为 4%, 下层土壤的含水量很高, 约 23%. 大麦茬地表层干土厚度约为 0.5 cm, 油菜茬地表层干土厚度约为 1 cm, 土壤含水量随时间变化不大, 可以认为不变. 地表粗糙度由 1 m 长的粗糙度板测量,

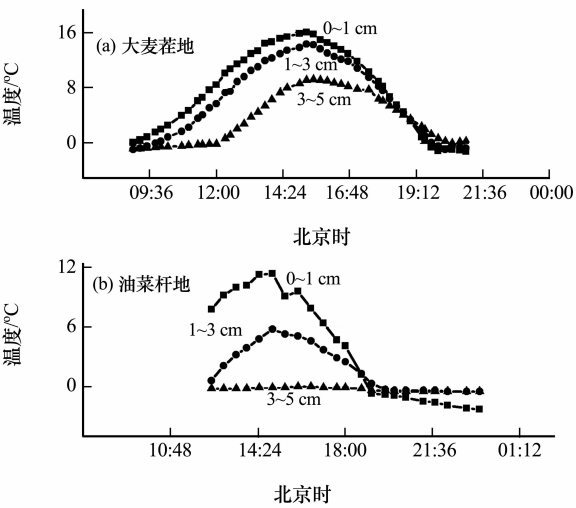


图 3 土壤剖面温度的日变化

Fig. 3 The daily change of temperatures of soils at different depths at (a) barley stubble ground and (b) rape stubble ground

取样间隔为 1 cm.

2.3.3 阿柔乡

2008 年 3 月 10 日 16:40 至 11 日 11:13, 辐射计对阿柔乡高山草甸进行了连续观测. 实验时大部分地表被积雪覆盖, 地表上覆盖有一层枯草, 约 0.5~1 cm. 土壤中含有较多的草根, 土壤有机质含量大. 为了测量无积雪覆盖的土壤, 在观测前, 清理了略大于视场面积的一片区域, 但是土壤上层仍然有部分融雪再冻结形成的冰不能去除, 这些冰在第 2 天上午已经完全融化.

土壤温度采用热敏电阻进行测量, 并由数据采集仪采集其电阻值(采样间隔为 1 min), 然后由热

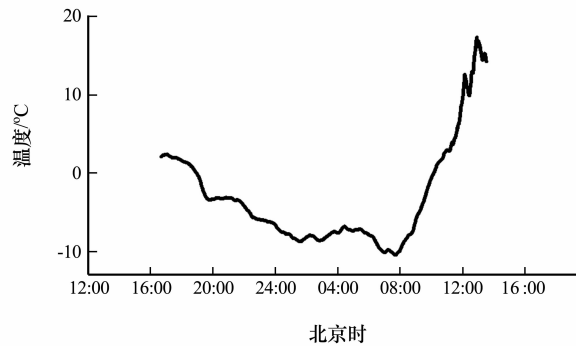


图 4 微波辐射计在阿柔观测期间土壤表层的物理温度 (3 月 10 日 16:40 至 3 月 11 日 11:13)

Fig. 4 The physical temperature of ground surface observed in Arou (from 08-03-10 16:40 to 08-03-11 11:13)

敏电阻的定标方程计算温度. 地表温度的日变化见图 4. 同时测量了表层 0~2 cm 的土壤含水量, 实验过程中, 观测区域的土壤含水量在 25% 左右, 随时间变化不大.

3 地物辐射特征分析

土壤的冻融会对其微波波段的发射率有直接的影响. 一般土壤冻结后土壤中大部分水分冻结, 导致发射率增大. 土壤初始含水量越高, 冻结后发射率的变化就越大, 而土壤冻结伴随着土壤物理温度的下降. 亮温由发射率和物理温度决定, 所以, 直接反应土壤冻融的是发射率. 发射率由  $\epsilon = T_E / T$  得到, 式中:  $T_B$  为亮温;  $T$  为土壤表层的物理温度. 这里我们对扁都口和阿柔的亮温和发射率的时序变化特征进行分析. 亮温梯度是目前应用于冻土识别的重要参数之一, 一般认为土壤冻结后由于体散射效应明显, 亮温梯度会降低为负值. 对扁都口和阿柔土壤冻融过程中 18.7 GHz 和 36.5 GHz 的亮温梯度的时序特征进行分析. 亮温梯度的计算方法为:

$$SG = \frac{T_{B, 36.5} - T_{B, 12.7}}{36.5 - 18.7}$$

3.1 扁都口

扁都口采用了不同入射角观测, 现选取入射角为 55° 和 35° 时的观测数据进行分析. 计算土壤的发射率时, 对土壤温度测量值在时间上进行了插值, 以得到辐射亮温测量时刻的土壤温度.

3.1.1 大麦茬地

大麦茬地的亮温、发射率和亮温梯度随时间的变化如图 5.

根据大麦茬地插值后的土壤温度发现, 辐射测量开始土壤表层是融化的, 下层土壤仍然是冻结的. 从图 6 和图 7 中分析大麦茬的的辐射亮温的日变化, 可以看到白天各个通道的辐射亮温变化规律相似, 先升高, 在 14:48 达到最高; 然后降低, 在傍晚土壤开始冻结后辐射亮温略有上升, 然后逐渐趋于平稳. 而地表的发射率则随时间先降低, 在 15:20 发射率降到最低, 并开始上升, 随着土壤冻结程度不断加深发射率不断上升, 然后逐渐趋于平稳.

亮温梯度随时间基本是匀速降低的, 在土壤开始冻结和冻结过程中并没有出现突然的下降, 这说明土壤亮温梯度并不是只在土壤冻结和融化时发生变化, 而是随温度也有变化. 在测量时间内, 亮温

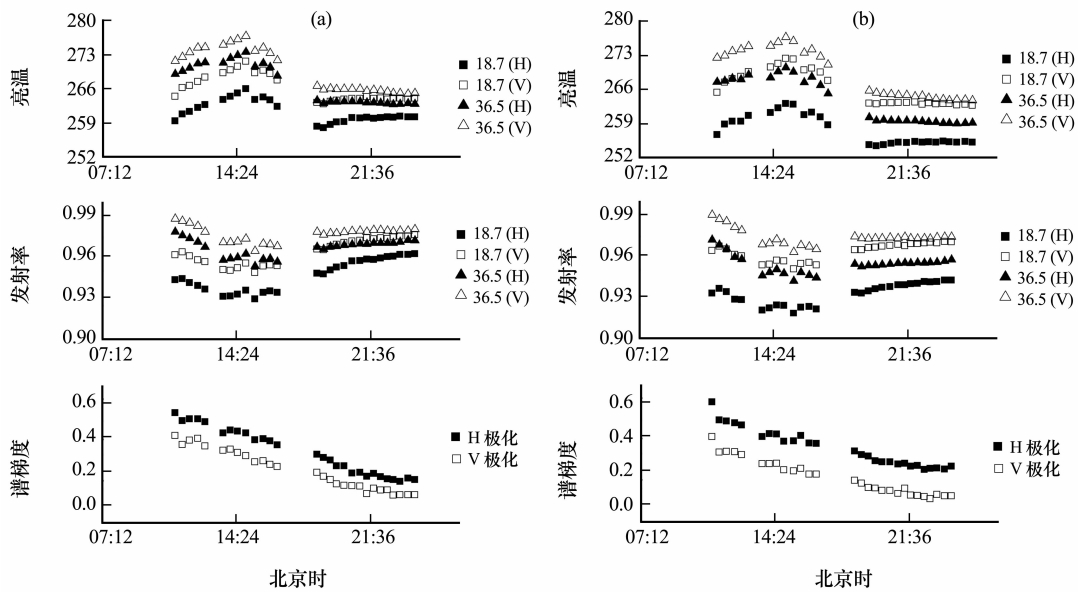


图 5 大麦茬地亮温、发射率和亮温梯度的时序特征

a. 入射角=35°; b. 入射角=55°

Fig. 5 Time series of brightness temperature, emissivity and spectral gradient of barley stubble ground, when (a) incident angle=35°, (b) incident angle=55°

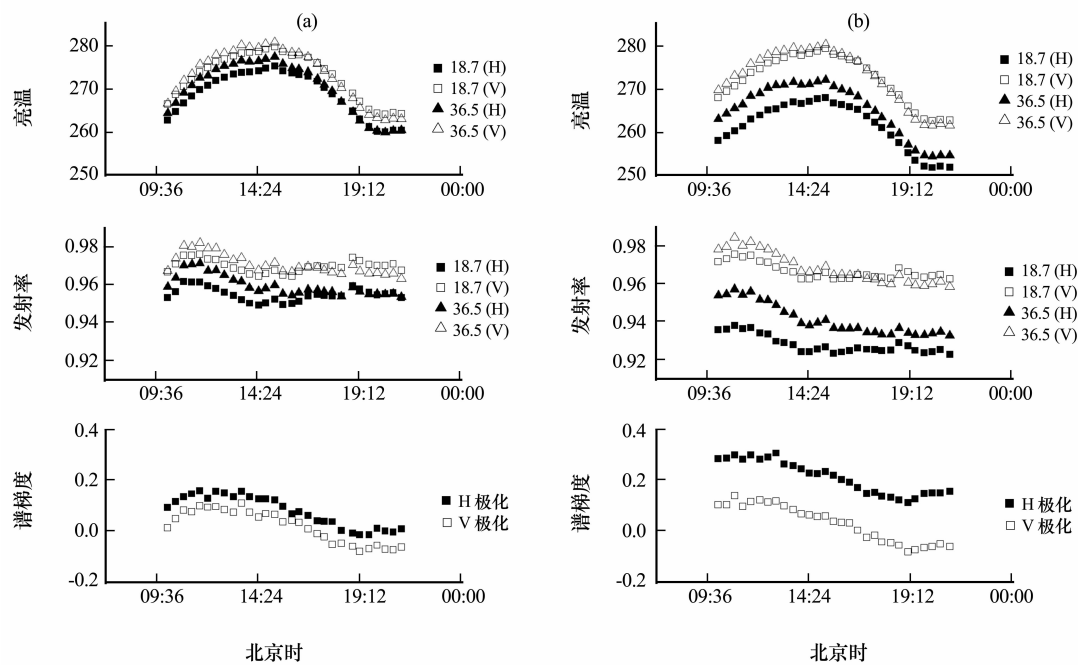


图 6 油菜茬地亮温、发射率和亮温梯度的时序特征

a. 入射角=35°; b. 入射角=55°

Fig. 6 Time series of brightness temperature, emissivity and spectral gradient of rape stubble ground, when (a) incident angle=35°, (b) incident angle=55°

梯度始终是大于 0 的，并没有出现之前认为冻土所特有的负的亮温梯度。H 极化的亮温梯度始终大于 V 极化的亮温梯度。

3.1.2 油菜茬地

油菜茬地的亮温、发射率和亮温梯度随时间的变化如图 6。



根据土壤物理温度的测量数据,测量开始时,土壤表层是融化的,土壤下层仍有部分冻结,土壤在 19:45 左右开始冻结.油菜茬地亮温的日变化特征与大麦地相似,亮温在 15:15 达到最大值,土壤冻结开始后,亮温和发射率有微小上升,但不明显.另外,测量开始后,土壤的发射率有一定程度的上升,这可能是由于测量是视场内存在卡车造成的阴影,导致实际的地表物理温度低于测量值,使计算的发射率偏低.

亮温梯度在开始测量时有一段时间的上升,然后随时间一直下降,在 19:10 左右,亮温梯度有微小的上升,V 极化的亮温梯度在土壤冻结后下降为负值.亮温梯度在测量开始后也有一定程度的上升,然而亮温梯度的计算与地表物理温度无关.因此,这段时间的上升可能是由于土壤表层土壤含水量小,微波能够穿透较深的土壤,而下层土壤在测量开始时并没有完全融化,这时的亮温梯度反应了地表以下冻结土壤的信息.因此,对冻土微波辐射的模拟要考虑到土壤剖面的分层结构.

3.2 阿柔乡

阿柔乡高山草地的亮温、发射率和亮温梯度随时间的变化如图 7.

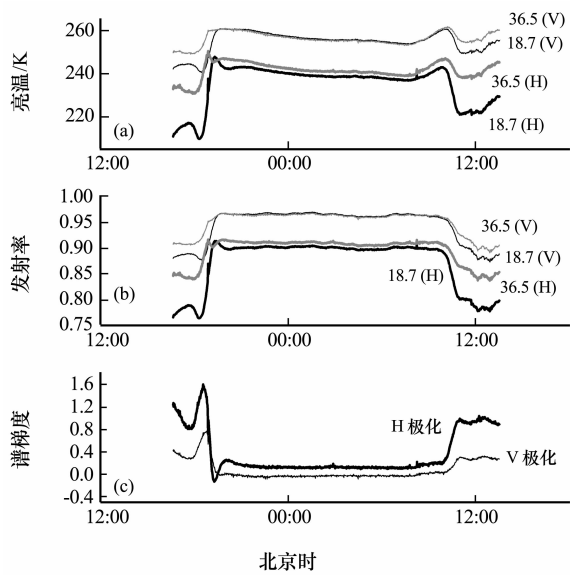


图 7 入射角=40°时,阿柔土壤亮温(a)、发射率(b)和亮温梯度(c)的时序特征

Fig. 7 Time series of brightness temperature(a), emissivity(b) and spectral gradient(c) of rape stubble ground, when incident angle=40°

由于测量时间从 10 日下午到 11 日中午,抓住了 10 日土壤的冻结过程和 11 日上午土壤的融化过

程.阿柔观测区域表层土壤含水量较高,约 30%,所以,土壤的冻融引起了发射率的明显的变化.10 日下午 18:00 左右土壤开始冻结.土壤冻结后,发射率明显上升,低频发射率的变化大于高频的变化,H 极化发射率的变化大于 V 极化的变化.随着土壤冻结厚度的增大,发射率和亮温逐渐平稳下来.从图中可以看到,10 日下午土壤冻结时,36.5 GHz 的发射率先于 18.7 GHz 的发射率达到最大值.发射率达到最大值说明,发射率不再随土壤冻结厚度的增加而增加,也就是冻结厚度达到的该频率的穿透深度.上面的现象说明 18.7 GHz 的穿透深度大于 36.5 GHz 的穿透深度.在土壤冻结时,两个频率的发射率有不同程度的波动,这可能是由于土壤冻结,造成的土壤表层冻土和融土明显分层,从而导致不同层土壤微波辐射的相干,从而引起亮温和发射率的波动.

晚上亮温随着土壤物理温度的下降而缓慢下降,发射率基本没有变化.11 日上午 7:50 左右,由于地表物理温度上升辐射亮温开始上升,但地表仍然是冻结状态,发射率没有变化.上午 10:00 左右,地表开始融化,随着融化深度的增加各个通道的亮温迅速下降,至中午 11:10 左右,亮温不再下降,开始随地表物理温度上升而上升.

亮温梯度在土壤开始冻结时先上升,然后才开始随冻结深度的增大而下降,其原因是开始冻结后,18.7 GHz 的亮温有一段是下降的,其原因可能是上面提到的表层冻土与下层未冻土微波辐射的相干.V 极化的亮温梯度在土壤冻结后降低为负值,而 H 极化的亮温梯度在土壤冻结后虽然有明显下降,但仍然为正值.

4 结论与讨论

主要介绍了 2008 年 3 月在黑河流域上游扁都口和阿柔地区观测到的典型地表类型的冻融过程中的微波辐射特征,并对土壤冻融过程中亮温、发射率和亮温梯度的变化特征进行了定性的分析.从这些定性的分析中,可以初步得出以下结论:

- (1) 土壤冻结后发射率会发生变化.一般发射率会升高,含水量越大,发射率增加得越多.
- (2) 一般野外的土壤尤其是农田,表层会有一层干土,虽然很薄,但对土壤的发射率影响较大.即使干土下湿土含水量较大,土壤冻结后总体的发射率和亮温也不会有很大变化.也就是说,表层的干土使微波辐射对土壤的冻结变得不敏感.表层干

土以下土壤的微波辐射能够穿透上层干土被辐射计接收, 因此, 对土壤微波辐射的模拟应该考虑到土壤剖面在水分和温度上的不均匀。

(3) 土壤冻结后, 其微波辐射亮温梯度会降低。含水量越大, 降低得越明显, 但是冻土的亮温梯度大多数情况下不为负值。H 极化的亮温梯度总是大于 V 极化的亮温梯度。如何利用卫星数据的亮温梯度进行冻土的判别有待进一步研究。

同时, 数据中有一些目前还不能很好解释的现象, 比如: 土壤冻结开始时发射率的波动还没有有利的证据表明是否为微波辐射的相干效应。另外, 土壤冻结后亮温梯度的变化, 虽然经常解释为冻土的体散射, 但对其机理的研究还很缺乏, 也没有很好的模型可以对观测进行模拟。因此, 在今后的工作中需要对土壤的冻融过程进行更精密的实验研究, 以增进对冻土的微波辐射特征机理的理解, 并建立冻土的微波辐射模型。

致谢: 本实验得到中国科学院寒区旱区环境与工程研究所的大力支持; 北京师范大学(常胜、张志玉、郑越、彭丹青、潘金梅、赵天杰、张勇攀、梁星涛等)、中国科学院遥感应用研究所(殷小军、刘晨州等)的同学参加了野外试验; 中国科学院东北地理与农业生态研究所赵凯老师对仪器校准的建议和帮助, 在此一并表示感谢。

## 参考文献 (References):

- [1] England A W. The effect upon microwave emissivity of volume scattering in snow, in ice, and in frozen soil[C]// URSI Conference on Emission and Scattering from the Earth, Berne, Switzerland, 1974: 273—287.
- [2] Zuerndorfer B W, England A W, Dobson C M, *et al.* Mapping freeze/thaw boundaries with SMMR data [J] Journal of Agriculture and Forest Meteorology, 1990, **52**(1—2): 199—225.
- [3] Zuerndorfer B W, England A W. Radiobrightnesses decision criteria for freeze/thaw boundaries [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, **30**(1): 89—102.
- [4] Judge J, Galantowicz J F, England A W, *et al.* Freeze/Thaw classification for prairie soils using SSM/I radiobrightnesses [J]. IEEE Transactionson Geoscience and Remote Sensing, 1997, **35**(4): 827—832.
- [5] Jin Rui, Li Xin. A review on the algorithms of frozen/thaw boundary detection by using passive microwave remote sensing [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2002, **17**(6): 370—375. [晋锐、李新. 被动微波遥感监测土壤冻融界限的研究综述[J]. 遥感技术与应用, 2002, **17**(6): 370—375.]
- [6] Cao Meisheng, Chang A T C. Monitoring terrain soil freeze/thaw condition on Qinghai Plateau in spring and Autumn using microwave remote sensing [J]. Journal of Remote Sensing, 1997, **1**(2): 139—144. [曹梅盛, 张铁钧. 青海高原春秋季节地表土冻融的微波遥感监测[J]. 遥感学报, 1997, **1**(2): 139—144.]
- [7] Zhang T, Armstrong R L. Soil freeze/thaw cycles over snow-free land detected by passive microwave remote sensing [J]. Geophysical Research Letters, 2001, **28**(5): 763—766.
- [8] England A W, Galantowicz J F, Zuerndorfer B W. A volume scattering explanation for the negative spectral gradient of frozen soil [C]// Proceedings of IGARSS'91, Espoo, Finland, 1991, **3**: 1175—1177.
- [9] Wegmuller U. The effect of freezing and thawing on the microwave signatures of bare soil [J]. Remote Sensing of Environment, 1991, **33**(2): 123—135.
- [10] Zhang L X, Shi J C, Zhang Z J, *et al.* The estimation of dielectric constant of frozen soil-water mixture at microwave bands [C]//Proceedings of IGRASS'03, Toulouse, France, 2003, **4**: 2903—2905.
- [11] Hallikainen M T, Ulaby F T, Dobson M C. Microwave dielectric behavior of wet soil-Part I: Empirical models and experimental observations [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, **GE-23**(1): 25—34.
- [12] 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, **GE-23**(1): 35—46.
- [13] Zhang L X, Zhao K G, Zhu Y, *et al.* Simulated radiation characteristics of frozen soil surface at typical microwave bands [C]// Proceedings of IGARSS'04, Anchorage, America, 2004, **6**: 4310—4313.
- [14] Bobrov P P, Krivaltsevich S V, Mironov V L, *et al.* The effect of frozen soil layer thickness on thermal emission at the wavelengths 3.6—11cm [J]. Russian Physics Journal, 2006, **49**(9): 907—912.
- [15] Rose Th, Czekala H. RPG-8CH-DP 4 Frequency, Dual Polarized Radiometer: Operating Manual [R]. Radiometer Physics GmbH, 2006.



## The Time Series of Microwave Radiation from Representative Land Surfaces in the Upper Reaches of Heihe River during Alternation of Freezing and Thawing

ZHANG Li-xin<sup>1, 2</sup>, ZHAO Shao-jie<sup>1, 2</sup>, JIANG Ling-mei<sup>1, 2</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University and Institute of Remote Sensing Application of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100875, China; 2. School of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Passive microwave remote sensing is a useful tool for monitoring the freezing/thawing status of soil. However, the characteristics and principle of soil microwave radiation during freezing/thawing process have not been fully understood owing to lack of experimental data of ground observation. A ground-based microwave radiometer (RPG-8CH-DP Radiometer) with the frequency of 18.7 GHz and 36.5 GHz was set up to observe the microwave radiation of representative land surface in the upper reaches of Heihe River in March, 2008. The diurnal microwave brightness temperatures of three kinds of land surface were obtained

during the experiment. The time series of emissivity and spectral gradient of these land surfaces were calculated and analyzed. It is found that the freezing/thawing will change the emissivity of soil, the difference of emissivity before and after freezing/thawing depends on the moisture of a very thin soil layer on the ground surface, because there is a small penetration depth for the relatively high microwave frequency. Besides, though the brightness temperature gradient will decrease after soil re-freezing, negative brightness temperature gradient has not been observed on frozen earth in the majority situations.

**Key words:** passive microwave remote sensing; frozen soil; brightness temperature gradient; microwave radiometer; Heihe watershed