

文章编号: 1000-0240(2009)02-0220-07

复杂地表条件下冻融土的微波辐射特性 模拟及判别分析

赵天杰^{1,2}, 张立新^{1,2}, 蒋玲梅^{1,2}, 赵少杰^{1,2}

(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: 针对 AMSR-E 数据的新特点, 在 HUT 积雪辐射模型的基础上, 增加冻土介电模型计算冻融土的介电常数, 并使用 AIEM 模型描述地表的散射特性, 建立寒区地表微波辐射模型, 对寒区 6 种典型环境的微波辐射进行了模拟. 结果表明: 使用 36.5 V 的亮温以及 6.925 H、10.65 H、18.7 H 与 36.5 V 的亮温比分别衡量地表温度和发射率的变化, 最能体现地表土壤的冻融变化特征. 通过 Fisher 判别分析, 建立了复杂地表条件下的冻融土判别算法, 并使用微波辐射计观测数据进行修正. AMSR-E 星载数据的验证结果表明, 该判别算法能够有效区分较长时间序列和大范围的地表冻融状态, 是一种可靠的判别模式.

关键词: 冻融土; 判别分析; 辐射计; AIEM; HUT; AMSR-E

中图分类号: TP75:P642.14 **文献标识码:** A

0 引言

地表土的冻融变化, 强烈影响着地表的热力学和人文特征, 影响区域地气系统的水热交换、相应的天气气候及地表径流过程, 并对地表的能量平衡和水分平衡具有很大影响, 是环境研究、资源开发以及工程建设设计中必须考虑的重要因素之一. 研究地表土壤冻融变化的传统方法主要是根据站点实测数据, 费时费力且可靠程度较低. 卫星遥感技术的发展, 特别是具有全天时全天候监测能力微波遥感技术的发展, 为同步监测大范围土壤冻融状态和变化提供了高效手段.

国内外研究者对利用被动微波数据监测地表冻融状态的方法进行了许多实验研究和理论计算, 早期的研究主要使用 Nimbus-7 卫星携带的扫描式多通道微波辐射计 SMMR 提供的微波亮温数据. Zuerndorfer^[1]发现, SMMR 的 18 GHz 和 37 GHz 的负亮温谱梯度对土壤的冻结有良好的指示作用, 并

将对土壤水分不甚敏感的 37 GHz 的亮温作为附加指标对地表冻融进行判别; SSM/I 成为业务化的被动微波资料来源后, Judge 等^[2]对原有的算法加以调整, 使用 SSM/I 的 37 GHz 以及 19 和 37 GHz 垂直极化的亮温谱梯度来进行冻融分类, 并分析了大气和云对亮温的影响. 这些方法在判别冻融状态时, 阈值的确定需要一定经验, 且阈值的选取对判别结果影响很大, 这主要是受到复杂多变的地表环境要素的影响. 因此, 复杂地表条件下地表冻融状态判别算法的发展就显得尤为重要.

随着 EOS 下午星 Aqua 的升空, 其搭载的高级微波扫描辐射计增强型 AMSR-E 在波段的选择上继承了以往微波辐射计的优势波段, 波段明显增多, 而且数据的空间分辨率有较大的提高. 本文针对 AMSR-E 数据的这些新特点, 结合冻土介电常数模型、面散射模型 AIEM 以及积雪辐射模型 HUT, 建立寒区地表微波辐射模型对复杂地表条件下的冻融土微波辐射特性进行模拟. 在此基础

收稿日期: 2009-01-16; 修订日期: 2009-03-21

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); 公益性行业(气象)科研专项“地表冻融过程及相变水量遥感监测算法研究”(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: 赵天杰(1985—), 男, 河南周口人, 2007 年毕业于北京师范大学, 现为北京师范大学地理学与遥感科学学院硕士研究生, 主要从事微波遥感应用研究. E-mail: zhaotianjie@gmail.com

上,利用 Fisher 判别分析方法建立判别方程进行冻融土识别,旨在发展出更为准确可信的冻融监测算法,以满足各种研究对长序列冻土数据集的需求,提高被动微波遥感对地表土冻融变化的监测能力。

1 模型描述

本文在积雪辐射模型 HUT^[3]的基础上,增加了 Zhang 等^[4]提出的冻土介电模型,用以计算冻融土的介电常数.使用适用范围更广的 AIEM 面散射模型^[5]替代 HUT 中原有的经验模型,使之能够对各种寒区环境下的地表微波辐射进行模拟,以满足发展复杂地表条件下冻融判别算法的需要。

1.1 冻土介电模型

在微波频率下,一定粗糙度地表发射的电磁波信号主要由土壤表面的介电常数决定,介电常数是土壤水分、地表温度和频率等参数的函数,特别是土壤水分的变化会决定性地影响地表的介电性质.研究土壤介电常数的变化规律,在微波遥感中尤为重要。

Dobson 等^[6]在前人的研究基础上,发展的土壤介电常数计算模型在微波遥感领域被广泛使用.该模型没有考虑水的相态变化,而事实上土壤中的水分在冻结以后,其介电常数从 80 降到了 3.15,这会显著影响土壤的介电特性.但并不是所有的水分在 0℃ 以下都会产生相变,未冻水的含量随着温度、盐度和土壤质地变化.为了准确计算冻土的介电常数,Zhang 等^[4]在微波网络分析仪的实验结果基础上,对 Dobson 介电模型进行了扩展,增加了冰的成分,形式如下:

$$\epsilon_{\text{mf}}^{\alpha} = 1 + (\rho_b / \rho_s)(\epsilon_s^{\alpha} - 1) + m_{\text{vu}}^{\beta} \epsilon_{\text{fw}}^{\alpha} - m_{\text{vu}} + m_{\text{vi}} \epsilon_i^{\alpha} \quad (1)$$

式中: α 、 β 为形状因子,其数值取决于土壤质地; m_{vu} 为未冻水含量; m_{vi} 为冰的含量。

1.2 AIEM

描述地表散射特性的传统理论模型有物理光学模型、几何光学模型和小波扰模型等,这些模型都有各自的适用范围. Fung 等^[7]提出了积分方程模型 IEM,该模型是基于电磁波辐射传输方程的地表散射模型,已被广泛应用于微波地表散射、辐射的模拟和分析中。

Chen 等^[5]对 IEM 模型进行了改进,发展了高级积分方程模型 AIEM,能描述从较光滑表面到粗糙表面的散射特征. AIEM 模型的适用范围已经过

蒙特卡罗模拟验证和地面实验数据验证^[8],能计算和模拟包括更宽范围的介电常数、粗糙度和频率等参数的地表辐射信号.因此,本文利用 AIEM 模型处理土壤表面的微波辐射。

1.3 HUT

HUT 积雪辐射模型是一个半经验的辐射传输模型(零阶模型),该模型把积雪层描述成为单一的均匀介质层,并采用经验公式来计算积雪的消光特性,同时考虑了地表粗糙度、植被覆盖和大气的影 响,均选用经验或半经验模型进行处理,主要用于计算植被覆盖地区积雪的微波辐射。

积雪覆盖地表的微波辐射包括下覆地表的微波辐射和均质积雪层的微波辐射,用公式表示为:

$$T_{\text{B, snow}}(\theta) = T_{\text{B, g}} + T_{\text{B, s}} = T_{\text{B}}(\theta) e^{-(k_e - qk_s) \sec \theta d} + (k_s T_s / k_e - qk_s)(1 - e^{-(k_e - qk_s) \sec \theta d}) \quad (2)$$

式中: k_a 为吸收系数; k_s 为散射系数; k_e 为衰减系数。

地面场景可以被分为有植被区和无植被区,植被区的微波辐射可以表示为:

$$T_{\text{B, for}} = [1 - (1/L_{\text{can}}^2)(1 - e_{\text{snow}})]T_{\text{phys}} \quad (3)$$

式中: L_{can} 为植被冠层衰减因子。

1.4 寒区地表微波辐射模型

结合冻土介电模型、AIEM 面散射模型和 HUT 积雪微波辐射模型,建立针对寒区地表环境的微波辐射模型.该混合模型的主要计算过程为:首先使用冻土介电模型计算冻土或融土的介电常数,将计算结果作为 AIEM 模型的输入,计算裸露地表的发射率;接着利用 HUT 模型中的经验或半经验公式计算积雪覆盖地表的发射率,然后计算植被覆盖地表的发射率,再计算积雪植被覆盖地表的发射率.在以上 4 种纯净像元的亮温及发射率计算完毕之后,最后根据 4 种地表类型在像元中所占的百分比,将 4 种纯净地表的亮温加权平均作为整个像元的微波辐射亮温。

寒区地表微波辐射模型能够对 6 种典型的寒区地表环境微波辐射进行模拟,包括裸露融土、裸露冻土、植被覆盖融土、植被覆盖冻土、积雪覆盖冻土、积雪植被覆盖冻土,为建立复杂地表条件下冻融状态的判别算法奠定了模型基础。

2 模拟分析

在 0℃ 或 0℃ 以下冻结,并含有冰的岩土称为

冻土. 因此冻土的判定需要两个条件: 1) 温度在 0℃或 0℃以下, 但并不是所有 0℃以下的岩土都会发生冻结; 2) 岩土中含有冰. 在微波频率下, 37 GHz 垂直极化的亮度温度与地表温度和气温有更好的相关性, 而且这一波段的发射率不像低频波段的发射率那样对土壤湿度敏感. McFarland^[9] 对被动微波数据反演地表温度做了许多研究, 认为 37 GHz 垂直极化的亮温最适宜用来反演地表温度, 以 37 V 为主要通道建立的反演算法在试验区精度达到 1℃以下. 岩土中水到冰的相变会引起发射率的较大提升, 这在低频波段的水平极化上体现得更明显^[10]. 低频的水平极化亮温比上 37 GHz 的垂直极化亮温可以作为地表发射率变化的衡量指标.

根据 AMSR-E 的通道设置, 选择 36.5 GHz 垂直极化亮温指示地表温度的变化, 使用低频 (6.925、10.65、18.7 GHz) 水平极化亮温/36.5 GHz 垂直极化亮温衡量地表发射率的变化, 以此作为地表冻融状态的判据. 为了建立更为合理的冻融判别算法, 需要对各种地表环境下的冻融土微波辐射信号进行分析, 这是普通实验数据无法满足的. 因此, 这里使用上文建立的寒区地表微波辐射模型, 对 6 种典型寒区地表环境的微波辐射进行模拟. 设定 10 种关键的地表参数在相应合理的变化范围内随机取值, 如表 1 所示. 每种地表环境模拟得到 100 组亮温数据, 图 1 按照 $T_{B36.5V}$ 和 $T_{B6.925H}/T_{B36.5V}$ 两个判据, 每种地表环境下显示 60 个数据点.

表 1 地表关键参数变化范围

Table 1 Ranges of the key surface parameters

参数	数值	参数	数值
砂粒/%	10~50	粘粒/%	10~50
干容重 /(g·cm ⁻³)	0.5~1.5	土壤水分	0.05~0.6
温度 /℃	1~20-20~-1	相关长度 /cm	10~50
均方根高度 /cm	0.1~3	积雪密度 /(g·cm ⁻³)	0.1~0.4
颗粒直径 /mm	0.2~2	积雪深度 /m	0.05~0.8

从图中的模拟结果可以看出, $T_{B36.5V}$ 和 $T_{B6.925H}/T_{B36.5V}$ 两个判据能够有效地区分冻土和融土. 由于受到土壤水分含量的影响, 裸露融土的数据

点分布比较分散, 土壤水分含量较高的点具有较低的发射率和亮温, 分布在左下方, 水分含量较少的则相反. 土壤发生冻结以后, 土壤水分含量都很小, 分布也就比较集中, 发射率升高, 且温度低于融土, 因此分布在融土的左上方. 植被的存在使得地表的微波辐射得到不同程度的提高, 数据点相对于裸土向右上方偏移. 积雪对地表的微波辐射影响很大, 特别是在积雪深度和颗粒粒径较大的情况下, 积雪层的体散射作用显著降低了高频的微波辐射, 使得低频与高频的比值大大增加, 同时也影响到 $T_{B36.5V}$ 对温度的指示作用. 总体来看, 寒区地表微波辐射模型合理地描述了各种典型寒区地表环境下的冻融土微波辐射特性, 通过温度和发射率的对比, 产生了重要的可分离性.

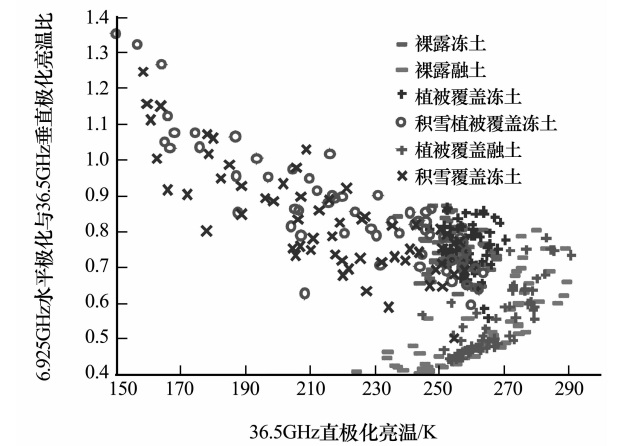


图 1 复杂地表条件下冻融土的微波辐射模拟
Fig. 1 Simulations of microwave radiation from F/T soil under complicated surface condition

3 冻融判别

3.1 Fisher 判别分析

判别分析是一种根据观测变量判断研究样本如何分类的多变量统计方法, 它对于需要根据对样本中每个个案的观测来建立一个分组预测模式的情况是非常适用的. 分析过程基于对预测变量的线性组合产生一系列判别函数, 但是这些预测变量应该能够充分地体现各个类别之间的差异. Fisher 判别分析用一种最简单的线性组合形式把预测变量 x_1 与 x_2 组合起来, 构成一个新的变量 y , 表示为:

$$y = c_1x_1 + c_2x_2$$

(4)

式中: y 为判别函数; c_1 和 c_2 称为判别系数. 该式即为判别方程.

选择最能体现冻融变化特征的温度和发射率作为预测变量，依次使用 $T_{B_{6.925H}}$ 、 $T_{B_{10.65H}}$ 、 $T_{B_{18.7H}}$ 与 $T_{B_{36.5V}}$ 的比值以及 $T_{B_{36.5V}}$ 建立判别方程，结果见表 2。

Fisher 线性分类函数是针对每个类别分别建立起来的，将实际观测值即自变量分别代入 F、T 两个类别方程，判定数据点属于函数值大的一类。判别结果显示，随着频率的增大，分类精度是下降的，这体现了低频数据对地表土壤水分的变化更加敏感，更有利于冻融状态的判别。

表 2 Fisher 判别分析结果

Table 2 Results of Fisher discrimination

		常数	$T_{B_{36.5V}}$	比率	判对率
6.925H	F	-98.785	0.570	77.178	0.867
	T	-93.947	0.566	71.428	
10.65H	F	-100.97	0.57	79.60	0.840
	T	-96.69	0.57	74.14	
18.7H	F	-106.27	0.56	95.22	0.797
	T	-102.16	0.56	89.20	

3.2 实测数据校正

以上的判别方程完全是依据模拟数据建立的，模拟数据能够涵盖各种不同的地表环境和状况，可用于建立大尺度的冻融监测算法。但是模拟数据往往不够准确，在应用的过程中容易出现偏差；实测数据比较准确，但无法对所有不同地表状况进行测量，造成数据量不足且代表性差，由此建立的算法适用性较低。因此，为了更为准确有效地判别地表冻融，本文结合实测数据对基于模拟数据建立的判别方程进行校正。

“黑河综合遥感联合试验”寒区试验从 2008 年 3 月初开始，历时 1 个月，在扁都口、阿柔、冰沟等黑河上游地区开展了一系列飞行、卫星同步试验以及地表观测试验，获取了大量的地面实测数据，包括土壤水分、地表温度、冻融状态和深度以及相关的积雪参数。其中，德国 RPG 公司生产的多通道微波辐射计系统^[11]被装载在卡车上，在该地区的一些典型区域进行了 18.7 和 36.5 GHz 的水平和垂直极化 4 个通道的测量。

3 月 10 日车载微波辐射计在阿柔地区对薄雪覆盖的地表进行了连续观测，地表比较平整，入射角以 10°为间隔从 20°~70°变化，时间从下午 16:44 开始至夜间 24:00。14 日在扁都口地区对麦茬覆盖

地表进行连续观测，入射角以 5°为间隔从 20°~70°变化，时间从中午 12:00 开始至夜间 24:00，其中 17:00 的数据丢失。16 日在油菜杆地进行连续观测，入射角以 5°为间隔从 20°到 70°变化，时间从中午 12:00 开始至夜间 21:30。地表残留的麦茬和油菜杆非常干燥，在微波频率上，可以近似作裸土，3 次观测均历经冻融日变化的过程。辐射计观测的同时对地表冻融状态、土壤温度、粗糙度等参数进行测量，结合冻融观测记录和土壤温度采集数据判断地表的冻融，选取 10 日 50°和 14 和 16 日 55°的观测数据，如图 2 所示。

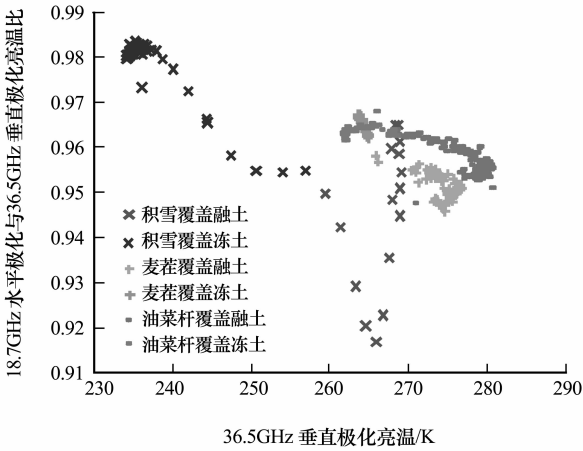


图 2 微波辐射计实际观测结果

Fig. 2 Results observed by microwave radiometer

首先来看积雪覆盖地表的观测，随着时间的推移，气温逐渐下降。从 36.5 V 的亮温可以看出，地表温度一直在降低，而纵轴则反映出地表的发射率先是上升，然后下降，接着又上升到某一数值达到稳定。在 16:44 开始观测的时候，地表已经开始向外释放能量，但此时整个地表包括积雪和土壤都是湿润的，暴露在空气中的积雪开始逐渐冻结，这引起了发射率升高。随着冻结的程度不断加大，微波开始穿透积雪探测到湿润的土壤表面。因此，发射率又开始下降，随着热量的继续释放，土壤也开始冻结，此时发射率又不断地升高，地表温度也持续降低，最后趋于稳定，整个地表处于冻结状态。在油菜杆地和麦茬地的观测中，随着地表的冻结，发射率升高，温度不断降低。图中的两个判据简单清晰地描绘了这种变化规律。辐射计的观测结果表示，无论是近似裸露的地表还是薄雪覆盖的地表，土壤在发生冻结以后，温度降低且发射率升高。依

靠这两个条件能够清晰地判断土壤的冻融状态。

由于冻融观测记录的主观性和不确定性,选择 12:00~16:00 的观测数据作为融土, 20:00~24:00 作为冻土, 以确保数据的真实有效. 将筛选的观测数据同模拟数据一起建立 Fisher 判别方程, 得到 18.7H 下的校正后模型, 总判对率达 82.8%, 结果如下.

$$F = 0.508T_{B36.5V} + 44.181 \frac{T_{B18.7H}}{T_{B36.5V}} - 81.739$$

(5)

$$T = 0.564T_{B36.5V} + 39.637 \frac{T_{B18.7H}}{T_{B36.5V}} - 92.285$$

(6)

4 验证

AMSR-E 是改进的多频率、双极化被动微波辐射计, 于 2002 年发射成功, 具有在 6.925 至 89GHz 范围内的 6 个频率, 双极化方式 12 个通道. 其最大的特点是在下午 1:30 左右穿过赤道, 因此卫星升轨的时候获取白天的数据, 而降轨获取夜间数据, 有利于冻融日循环过程的监测.

扁都口区域开展了较多的试验, 一般情况下, 3 月该地区地表夜间冻结, 白天随着气温升高, 地表土壤开始融化, 是典型的冻融日循环区域, 规律性非常明显. 因此, 选择整个 3 月 AMSR-E 的 L3 日产品数据, 每日提取扁都口区域升降轨共 8 个数据点, 删除无效数据后, 分别得到 92 个升轨和 100 个降轨数据点, 如图 3 所示. 使用式(5)和(6)进行判别, 降轨数据 100%判定为冻土, 升轨数据 70%判定为融土. 其中, 7 d 左右的升轨数据被判为冻

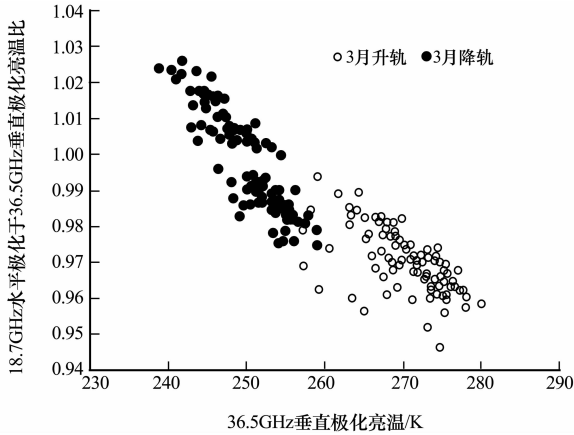


图 3 扁都口 3 月份 AMSR-E 观测结果
Fig. 3 Observed results of the AMSR-E in Biandukou

土, 估计由于气温较低, 地表土壤尚未融化, 或者有积雪覆盖.

为了进一步验证本文建立的冻融判别算法的可靠性, 选择 2008 年 3 月 16 日和 21 日 AMSR-E 的 L3 日产品数据, 据观测 16 日地表日冻融变化明显, 21 日地面有降雪. 按照 37°~42° N、97°~102° E 提取整个黑河流域的各通道亮温, 黑河上游地区多山, 海拔最高达 4 000 多米, 下游地势平坦, 海拔 1 000 m 左右. 假设认为上游夜间的降轨数据观测到的为冻土, 下游的升轨数据作为融土, 结果如图 4 所示.

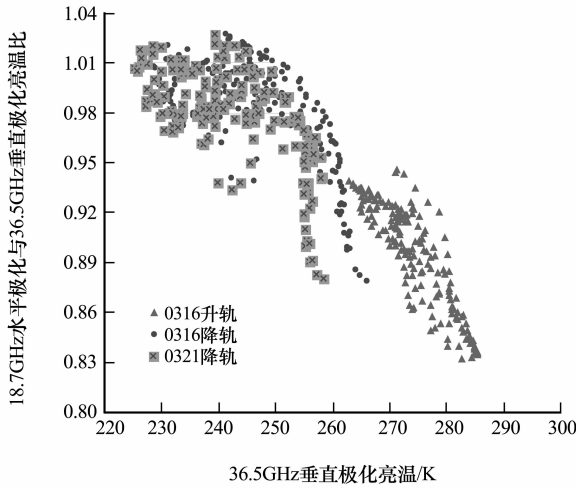


图 4 黑河流域 AMSR-E 观测结果
Fig. 4 Observed results of the AMSR-E in Heihe River basin

通过删除没有观测记录的数据点, 共得到 558 个有效数据点, 使用式(5)和(6)进行冻融判别, 错分 13 个点, 正确判断率高达 97.67%. 扁都口作为相对纯净均一的地表, 在判别过程中效果明显好于复杂地表环境条件下的随机模拟数据.

通过以上较长时间序列和较大空间范围内的 AMSR-E 观测数据的验证, 本文建立的冻融判别算法能够正确区分地表土壤的冻融状态, 是可靠的判别模式.

5 结论与讨论

我国季节冻土分布广泛, 具有独特的水热特性, 同时作为低温环境下形成的土壤状态, 对温度变化敏感, 是气候变化的灵敏指示器. 被动微波遥感具有空间覆盖范围广、时间分辨率高的优势, 在区域尺度的地表冻融状态变化过程研究具有重要作用. AMSR-E 提供了更宽频率范围内的 12 个通

道的双极化方式数据，为地表冻融过程的研究提供了更为方便有效的支持。本文针对 AMSR-E 数据的新特点，对复杂地表条件下的冻融土微波辐射特性进行模拟分析，建立判别算法，并得到有关结论总结如下。

(1) 以 HUT 积雪辐射模型为基础，增加冻土介电模型计算冻融土的介电常数，AIEM 模型描述地表的散射特征，建立的寒区地表微波辐射模型能够描述各种寒区地表环境下的微波辐射特征，为复杂地表条件下的冻融判别提供了理论支持。

(2) 使用 $T_{B36.5V}$ 衡量地表温度的变化，6.925 H、10.65 H、18.7 H 与 36.5 V 的亮温比描述土壤发射率的变化，二者最能体现冻融变化的主要特征，有利于冻融状态的判别。

(3) 基于复杂地表条件下的模拟数据，采用 Fisher 判别分析方法建立判别方程，并使用微波辐射计实际观测数据进行校正。AMSR-E 星载数据的验证结果表明，该判别方法能够有效区分较长时间序列和大范围的地表冻融状态，是一种可靠的判别模式。

下一步我们将在全国甚至全球范围内进行算法的应用和验证。另外，本文在模拟的过程中认为积雪覆盖下的地表均为冻土，但少数情况下也会出现融土，此处如何消除积雪的影响需要更深入的研究。

致谢：感谢来自北京师范大学地理学与遥感科学学院的刘志刚、刘素红老师，张志玉、常胜、郑越、张勇攀以及中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、中国科学院遥感应用研究所的老师和同学在黑河试验中的各项工作；同时感谢美国国家冰雪数据中心提供了 AMSR-E 卫星数据。

参考文献(References)：

[1] Zuerndorfer B W, England A W, Ulaby F T. An optimized approach to mapping freezing terrain with SMMR data [C]//

Proceedings of IGARSS'1989, 1989; 1153—1156.

[2] Judge J, Galantowicz J F, England A W, *et al.* Freeze/thaw classification for prairie soils using SSM/I radiobrightnesses [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, **35**(4):827—832.

[3] Pulliainen J T, Grandell J, Hallikainen M T. HUT snow emission model and its applicability to snow water equivalent retrieval [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1999, **37**: 1378—1390.

[4] 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 IGARSS2003, 2003.

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

[6] Dobson M C, Ulaby F T, Hallikainen M T, *et al.* Microwave dielectric behavior of wet soil, Part II: Dielectric mixing models [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1985, GE-23: 35—46.

[7] Fung A K, Li Zongqian, Chen K S. Backscattering from a randomly rough dielectric surface [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1992, **30**(2): 195—200.

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

[9] Marshall J, McFarland R, Robert L, *et al.* Land surface temperature derived from the SSM / I passive microwave brightness temperature [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1990, **28**: 839—845.

[10] Zhang L X, Zhao K G, Zhu Y, *et al.* Simulated radiation characteristics of frozen soil surface at typical microwave bands [C]// Proceedings of IGARSS2004, 2004.

[11] Zhao Shaojie, Zhang Lixin, Zhang Zhongjun. Design and test of a new truck-mounted microwave radiometer for remote sensing research [C]// Proceedings of IGARSS2008, 2008; 1192—1195.

Microwave Radiation of Frozen and Thawed Soils under Complicated Surface Condition: Simulation and Discrimination Analysis

ZHAO Tian-jie^{1, 2}, ZHANG Li-xin^{1, 2}, JIANG Ling-mei^{1, 2}, ZHAO Shao-jie^{1, 2}

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

Abstract: Frozen soils have strong implications on fresh water hydrology, terrestrial ecology, weather and climatology. In the Watershed Airborne Telemetry Experimental Research (WATER) deployed in March, 2008 in the Heihe River basin, continuous observations of the freezing-thawing cycles on typical ground surfaces were carried out at 18.7 and 36.5 GHz by a trunk-mounted microwave radiometer with dual polarizations. The observations are in consistent with the features of AMSR-E data. On the basis of the HUT snow emission model, the frozen soil dielectric model is added to calculate the dielectric constant of frozen-thawed soils, and the AIEM is used to describe the surface scattering. A microwave radiation model for cold surface areas was established to simulate the microwave radiation of 6 kinds of typical cold regions. Analysis found that the use of brightness temperature of 36.5 V and the brightness tempera-

ture ratio between 6.925 H, 10.65 H, 18.7 H and 36.5 V to measure the changes in surface temperature and emissivity, respectively, can best reveal the differences between frozen and thawed soil surfaces. The measurement from radiometer also showed this pattern. Then, Fisher discrimination was carried out to build up discrimination algorithms through the simulation under complicated surface condition. Three groups of theoretic linear functions were established, and microwave radiometer data were used to correct the observation at 18.7 GHz. Finally, the brightness temperature of AMSR-E products (level 3) in Biandukou, a typical area of freezing-thawing cycle, is extracted for validation. The verification results show that the algorithm can effectively identify the distinction between frozen and thawed ground surfaces under a longer time or a wide area. It is a reliable mode of discrimination.

Key words: frozen and thawed soil; discrimination analysis; microwave radiometer; AIEM; HUT; AMSR-E