

张立新, 蒋玲梅, 柴琳娜, 等. 地表冻融过程被动微波遥感机理研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(10): 1 023-1 029. [Zhang Lixin, Jiang Lingmei, Chai Linna, et al. Research advances in passive microwave remote sensing of freeze-thaw processes over complex landscapes[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(10): 1 023-1 029. ]

## 地表冻融过程被动微波遥感机理研究进展\*

张立新<sup>1,2,3</sup>, 蒋玲梅<sup>1,2,3</sup>, 柴琳娜<sup>1,2,3</sup>, 赵少杰<sup>1</sup>, 赵天杰<sup>1</sup>, 李欣欣<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875;

2. 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;

3. 北京师范大学环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875)

**摘要:**地表冻融过程及参数特征是陆表过程、气候模式、全球变化等研究的重要方面。被动微波遥感由于具有对土壤水分敏感、高时间分辨率等特点, 非常适合用于地表冻融过程的监测和相关参数的反演。在分析地表冻融过程被动微波遥感机理研究发展现状的基础上, 面向全球范围内大尺度陆表冻融过程微波遥感算法发展的需求, 针对由土壤、积雪和植被组合的复杂地表, 从基础研究角度, 总结凝练了存在的科学问题, 为研究工作的深入开展提供了参考思路。

**关键词:**冻融过程; 微波遥感; 复杂地表

中图分类号: P642. 14; TP722. 6

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2011)10-1023-07

### 1 引言

季节冻融是陆地表层极其重要的物理过程和最为奇妙的现象之一。冻融循环随季节变化每年都会重复发生, 覆盖面积巨大, 动态性强, 并与其他陆表过程相关密切, 对环境和气候的影响不容忽视。冻融过程的实质是土体中水冰相变的交替, 由于液态水和固态冰的物理性质存在巨大差异, 因此这种交替过程就像自然界中一个巨大的“开关”。当处于融化状态时, “开关”打开, 水文、生态等陆表过程活跃; 当冻结时“开关”关闭, 过程进入休眠期或缓慢活动期。可见, 冻融循环对陆表过程的作用和影响有一定的突变性, 并因此表现得相当剧烈。此外, 还值得关注的是, 受多种因素影响, 冻结过程的发育, 包括空间格局和持续时间往往呈现异常复杂的状况, 这使与之相耦合的其他陆表过程也变得更为复杂。在这种情况下, 如何有效监测冻融循环的时空

分布及相关的物理参数就显得十分重要。监测冻融过程, 可以归结为对表层冻土发育状况和参数的监测。多年来, 受观测技术的制约, 近地表冻融时空分布特征始终没有令人信服的监测数据。例如, 无法确定北半球的某个冬季哪一天地表冻结达到了最大面积, 冻结面积是多大, 表层有多少水分发生了相变, 一天中冻融交替的区域多大、深度多少等, 这些数据是陆表过程模式、区域气候模式、沙尘暴预报模式、分布式水文模式、冻融侵蚀区土壤侵蚀模式, 以及其他水热模式等非常关注的数据库。由于有效监测数据的缺失或不足, 大部分模式中多采用经验数据或做简单假设, 或者完全忽略, 由此造成的不明误差只能通过调整参数予以回避, 大大淡化了模型的机理属性。遥感技术的发展, 特别是对土壤水分变化敏感的微波遥感的发展, 为实现冻融循环这种面积广、动态性强的陆表过程的高时效监测提供了独特的手段。已有研究结果表明<sup>[1~5]</sup>, 微波遥感用于冻

\* 收稿日期: 2011-01-12; 修回日期: 2011-08-28.

\* 基金项目: 国家自然科学基金重点项目“复杂地表冻融过程被动微波遥感机理研究”(编号: 41030534); 国家自然科学基金面上项目“冻土微波辐射有效穿透深度研究”(编号: 40971195)资助。

作者简介: 张立新(1966-), 男, 河北清苑人, 教授, 主要从事微波遥感研究. E-mail: lxzhang@bnu.edu.cn

融过程监测的潜力巨大。

从冻融过程微波遥感的理论发展和应用现状来看,迫切需要解决的问题,一是提高冻融判别算法的准确性及其在复杂地表的适用性,二是在定性的基础上推进冻土微波遥感向量化发展,从而为流域水文生态研究及气候变化研究提供长时间序列可靠的量化数据产品。这两方面问题的解决要求在复杂地表冻土微波辐射机理以及冻土物理参数反演算法及应用等方面进行深入研究。其中,机理研究有助于提高对复杂地表微波辐射特性的认识,为参数反演算法的开发提供理论依据;冻土的物理参数反演及应用是冻土微波遥感研究的目的和落脚点。本文总结了复杂地表冻融过程的微波遥感机理研究现状和存在的科学问题,可为进一步开展冻融过程的微波遥感观测方法研究提供参考。

## 2 地表冻融过程被动微波遥感研究现状

### 2.1 冻融判别算法研究

近半个世纪以来,随着遥感科学与技术的发展,对地观测能力大幅度提高,遥感成为地球科学研究不可替代的数据来源,其重要性不言而喻。微波遥感由于其全天候工作、受大气影响小、对土壤和植被有穿透能力、对水分变化敏感等独特优势,在以土壤水分为核心的对地观测中受到高度重视,开展了大量研究工作。被动微波遥感是基于地表自然辐射的微波波段电磁波来提取地表信息的遥感手段。地表的微波辐射特征与地表的介电特性紧密相关,而具有相同含水量的冻土和未冻土在介电常数上存在明显的差异,这就为利用微波遥感监测地表冻融过程在机理层面上提供了依据。

被动微波遥感早期主要集中在土壤水分和雪水当量的反演研究方面<sup>[6-9]</sup>,冻融过程微波遥感研究相对比较薄弱。进入 20 世纪 90 年代以后<sup>[1-3,10-12]</sup>,利用被动微波遥感监测地表冻融状态的研究工作逐步加强。早期的研究工作主要集中于 Nimbus-7 卫星携带的扫描式多通道微波辐射计 SMMR 提供的微波辐射亮温数据的应用。通过对卫星数据的分析发现,SMMR 的 18 和 37 GHz 的负亮温谱梯度对土壤的冻结有良好的指示作用<sup>[1,2]</sup>,结合对土壤水分不甚敏感的 37 GHz 的亮温作为附加指标可以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<sup>[3]</sup>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。Zhang 等<sup>[4]</sup>根据美国气象站点的土壤温度数据对 Judge 的算法进行了修正,同时也发现该算法无法区分积雪覆盖地表和冻结地表,因为二者的辐射特性非常类似。为了解决这个问题,Zhang 等<sup>[5]</sup>将积雪覆盖地区微波辐射计的观测数据与一维数值热传输模型结合,模拟得到了积雪下土壤的冻融状态,这种方法为积雪覆盖地表土壤冻融状态的判别提供了一种新的思路。Smith 等<sup>[13]</sup>也根据 37 与 19 或 18 GHz 亮度温度差的时间序列变化特征检测出 45°N 以北范围内地表融化日期提前,冻结日期推后,相应的生长季延长等地表变化特征。Jin 等<sup>[14]</sup>基于中国站点数据的分析,发展了适用于中国区域的分类树算法,算法中考虑了沙漠与降雨的影响。Han 等<sup>[15]</sup>针对中国北方及蒙古地区对 Zuerndorfer 等<sup>[1,2]</sup>提出的冻融判别算法进行了阈值的修订,对于卫星的升轨或降轨观测分别采用不同的判别阈值。Zhao 等<sup>[16]</sup>利用多通道微波辐射计对冻土的时序变化特征进行分析,并在此基础上构建复杂地表条件下的寒区地表辐射模型,研究植被与积雪覆盖对冻融判别的影响,提出了一种基于准发射率变化的判别算法。Kim 等<sup>[17]</sup>发展了一种基于动态阈值的时间序列变化探测的地表冻融判别算法,该算法仅仅采用了 SSM/I 37 GHz 的 V 极化通道亮温数据,达到了较高的判别精度。

Zhang 等<sup>[18]</sup>在判别地表冻融状态的基础上,提出利用 AMSR-E 升轨和降轨亮温数据所计算得到的“准发射率”的差值来计算土壤冻融过程中发生相变的水的量。其中,“准发射率”定义为某通道亮温测量值与 37 GHz 垂直极化亮温测量值的比值。该研究是对地表冻融过程被动微波遥感的量化的一种尝试。该算法在地面尺度上进行了验证。但算法在卫星尺度上的可靠性仍然需要进一步验证。

尽管这些算法基于星载辐射计观测数据得到了一定程度的应用,但对算法的物理机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。其中,判据中将谱梯度出现负值解释为“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”,似乎还缺乏更充分的理论和实验支持。另外,这些方法在判别冻融状态时,阈值的确定都需要针对特定的区域进行校正,且阈值的选取对判别结果影响很大。这一方面体现出地表环境要素的复杂多

变,另一方面也说明目前对复杂地表冻结后的微波辐射特征和机理研究不够深入。主要的机理研究包括冻土介电常数和冻土微波辐射特征研究 2 个方面。

## 2.2 冻土介电常数研究

冻土介电常数是冻土微波辐射研究的基础,然而这方面的实验和建模研究较少。早期的研究见于 Hoekstra 等<sup>[19]</sup>对 4 种不同质地土壤 0.1 ~ 26 GHz 介电常数进行了测量。但其模拟研究是基于理论模型进行的参数调整,模型中某些参数难以确定,模型不具有普适性。Hallikainen 等<sup>[20]</sup>在研究正温下土壤介电常数时对冻土的介电常数进行了一些测量,但没有对数据进行分析和建模。England<sup>[10]</sup>在研究冻土的微波辐射特征时,将冻土的介电常数描述为含有 7% 束缚水的土壤的介电常数、水的介电常数和冰的介电常数的加权和,模拟过程中土的介电常数需要以文献[18]中测量的介电常数为参考,具有很大的局限性。Wegmüller<sup>[11]</sup>在模拟冻土微波辐射时,采用了 Dobson 模型模拟 0 °C 时的介电常数,并且将未冻水含量固定在 5%。Liou 等<sup>[12]</sup>在模拟冻土微波辐射时,考虑了冻土中未冻水含量随温度呈指数规律的变化,并且采用混合介质介电常数模型来模拟冻土介电常数,认为冻土是土壤基质、空气、束缚水、自由水和冰的混合物,束缚水的介电常数取固定值为 35+i15。Zhang 等<sup>[21]</sup>在混合介质介电常数模型的基础上,引入了未冻水含量计算模型。对于束缚水的处理,沿用了 Dobson 模型的方法,模型中的经验参数的计算方法也依然是 Dobson 模型中的参数。该模型没有经过试验数据验证,其可靠性有待研究。Mironov 等<sup>[22]</sup>将其发展的归一化折射指数混合介电模型推广到冻土,并且提出冻土中的束缚水分为土壤颗粒表层束缚水和冰表层束缚水,并将其分开在模型中表达。但该模型中众多的未知参数需要根据某一种土的介电常数测量值进行计算,因此模型的使用受到一定的限制。李丽英等<sup>[23]</sup>利用微波网络分析仪对冻土介电常数进行了测量,但没有对模型中的参数进行优化。因此,冻土的介电常数模型一般是半经验模型,模型的建立需要大量的实验数据支持,而模型的实用性受到土壤物理性质差异的限制。基于中国冻土发育地区不同土壤类型的介电常数实验测量数据库,发展适合于中国地区的冻土介电常数半经验模型将会使中国地区冻土微波遥感研究的定量化研究提高到一个新的高度。

## 2.3 冻土微波辐射特征研究

冻土的微波辐射研究开始于 20 世纪 70 年代,

England<sup>[24]</sup>对冻土微波辐射的体散射特征进行了理论描述,用分层模型和体散射模型对冻土中存在卵石和水泡的情况进行了模拟。研究发现,卵石和水泡等散射体在冻土中的存在并不会影响冻土的发射率,影响冻土发射率最主要的因素是冻土的厚度。此后,关于冻土微波辐射特征的研究基本处于停滞状态。England 等<sup>[25]</sup>在解释 SMMR 的负亮温梯度的特征时利用简化的一阶辐射传输模型模拟对冻土的微波辐射进行了模拟,模拟中考虑了冻土的体散射特征,并推导出了冻土的单次散射反照率与土壤物理温度的关系。该研究没有考虑冻土的介电常数是随温度变化的,且模型并没有通过地面试验进行验证。Liou 等<sup>[26]</sup>将一维水热传输模型与微波辐射模型结合,在该模型中,考虑了冻结地表表层的温度梯度,没有考虑体散射。

冻土的微波辐射特征的实验研究较晚,Wegmüller<sup>[11]</sup>最早利用地基微波辐射计对地表冻融过程中的微波辐射进行了连续观测,测量的频率范围是 3 ~ 11 GHz。研究发现,土壤冻结后没有出现负的亮温梯度。通过相干和非相干辐射模型模拟结果与测量结果对比,发现相干模型在冻结前和完全冻结后与测量结果较一致,但没有发现相干模型所预测的亮温波动。Schwank 等<sup>[27]</sup>利用 L 波段地基微波辐射计对 1 块草地进行了连续 4 个月左右的观测。从观测结果中发现了土壤冻结过程中的亮温波动现象,并解释为相干辐射效应。Mironov 等<sup>[28]</sup>利用 2.7、6.0 和 8.2 GHz 的辐射计观测了 3 种不同质地土壤融化过程中的微波辐射特征,并且将相干模型与粗糙地表辐射经验模型结合对冻土的微波辐射进行模拟。通过拟合辐射模型,提出了冻土冻结的厚度,结果与冻结层厚度的实际测量值较一致。在黑河流域遥感实验中,利用 K 和 K<sub>a</sub>波段的微波辐射计对该流域的典型地表类型的冻融过程进行了观测,观测结果没有发现明显的负亮温梯度,其中在阿柔观测时观测到了土壤冻结和融化过程中亮温的波动<sup>[29]</sup>。Zhao 等<sup>[30]</sup>在华北平原地区利用 6.925、10.65、18.7、36.5 GHz 双极化微波辐射计观测了高含水量地表的冻融过程,发现冻结过程中明显的亮温波动现象,波动的幅度和周期与频率和极化有明显的相关性,认为利用相干模型可以解释这种现象。以上研究证明了冻土微波辐射的相干效应的存在,但这种效应与地表粗糙度、土壤含水量的关系依然不明朗。冻土的微波辐射不能仅仅用面辐射模型来描述,也不能仅仅以分层介质的辐射模型描述。将

二者结合起来,有希望更好地模拟冻土的微波辐射特征。

### 3 主要科学问题

根据研究进展分析,复杂地表冻融过程被动微波遥感理论与方法急需深入研究的科学问题主要包括以下几个方面:

#### 3.1 冻结地表组成要素的介电常数研究

冻土、植被和积雪是冻结地表的主要组成要素,这 3 种介质的介电常数是地表微波辐射模型必需的输入参数之一,同时也是参数反演过程中的重要依据。冻土是土壤和水的混合物,当温度低于冰点时,土壤水发生相变,部分水分转变为冰晶,相变的平衡取决于土壤质地、温度和初始含水量等因素;植被夏季生长旺盛,体液处于活跃期,而冬季植被进入休眠期,体液量和生化成分会发生变化;积雪是冰晶形式的降水,气温较低时,特别是下垫面为冻土时,晶体结构比较稳定,一般称为干雪,而在气温较高时,下垫面为非冻土时,积雪中的冰晶会部分融化成水,成为冰水混合物,一般称为湿雪。由此看来,无论是冻土、植被还是积雪,其内部的液态水存在的形式以及水冰相变平衡状态随着温度的不同而变化,这就导致了这些冻结介质介电常数的变化呈现出更为复杂的特征。作为辐射和反演研究的基础,构成复杂地表的各要素的介电常数及其变化规律研究是重要的基础问题之一。2003 年张立新发展了基于混合介质介电常数模型的冻土介电常数模型<sup>[17]</sup>,尽管该模型在一定范围内运行结果良好,但有 2 个方面限制了模型的可靠性:一是模型中未冻水含量的计算采用了简单指数函数形式的经验公式,其中的 2 个经验参数无法与土壤质地建立普适的定量关系;二是束缚水对介电常数的贡献通过经验公式综合到了总含水量的贡献中,模糊了关键的机理本质,增加了不确定性。深入的研究将通过引入新的基于比表面积的未冻水含量计算模型,同时考虑束缚水介电分量的贡献,进一步改进冻土介电常数模型,应该是一个很好的突破口。

一般情况下,冻结后地表仍然会有植被覆盖,包括有根茬残留的农田、枯萎的草地、落叶的灌木和森林等,甚至在高纬度和高海拔地区仍有大面积的常绿针叶植物存在,因此植被对冻结地表的微波辐射特征的影响不容忽视。冬季植被进入休眠阶段或完全死亡,体内的水分含量和状态与夏季相比会有很大程度的变化,由此导致冬季植被介电常数呈现新

的特征。针对冬季植被介电常数的研究,面临的主要问题是发展更为精确的模型,能够描述植被由活跃期进入冬眠期整个过程的介电常数的变化。此外,植被介电常数的另一个特点是受植被种类影响较大,因此通过实验测量多种植物的介电常数形成介电常数数据库作为遥感研究中的先验知识是有必要,也是可行的。在此基础上,进一步寻找不同植被种类间介电常数的共性,根据植被种类对植被介电常数模型进行参数化,将大大提高植被微波辐射模拟的精度。然而目前尚没有成熟的测量不同植被类型和植被组分,特别是冬季植被介电常数的方法和标准,给进一步研究植被的介电常数造成了阻碍,这也是植被的介电常数模型一直没有深入发展的主要原因之一。因此,开发低成本、易操作的冬季植被介电常数测试方法也是重要的研究课题之一。

积雪介电常数的测量相对比较成熟,这里不再作为主要问题提出。

#### 3.2 冻结地表微波辐射研究

由于冻土的介电常数虚部较小,使微波对冻土的穿透能力明显高于未冻土,在这种情况下,仅用面散射辐射模型不足以描述冻土的微波辐射,冻土微波辐射的某些特征也只能通过考虑冻土剖面的差异性才能得到解释。根据地表冻结发育的特征,研究冻土剖面温度、水分、土壤质地、土壤层状构造等因素对冻土微波辐射的影响,构造考虑分层和体散射的辐射模型是重要的研究课题。此外,在野外冻土微波辐射动态变化观测中,发现伴随土壤冻结过程的发育,辐射亮温会出现明显的波动现象。尽管利用现有的相干模型可以对这种现象进行解释,但是模拟数据和实测数据还存在不一致的地方,而且缺乏在不同含水量和粗糙度情况下的系统的实验研究,因此目前对冻结过程的相干效应理解仍然不深入。通过对不同含水量和粗糙度的地表进行冻结过程的连续微波辐射观测,并将这种效应耦合到辐射模型中,定量地把握相干效应对冻土微波辐射影响,有助于评估相干效应可能对卫星数据的影响,或者作为新的传感器开发的依据,用于监测降雪和冻结过程的发育。以上研究工作需要特别关注的一个参数是冻土微波辐射有效响应深度,即微波在冻土中的穿透深度。这是一个非常重要但又容易被忽略的参数,它关系到模型模拟的深度和验证时取样深度的确定。

裸露冻土的微波辐射研究相对比较简单,但有积雪和植被覆盖的冻结地表微波辐射研究更接近于

实际情况,不过影响辐射的因素变得更加复杂。积雪与冻土的时空分布往往有重叠,积雪覆盖在冻土之上。地表积雪覆盖会显著改变地表微波辐射特征,造成地表冻融判别困难。早期的冻融判别算法,只能用于无积雪覆盖的区域。结合积雪辐射模型与冻土辐射模型研究积雪覆盖地表的微波辐射特征是一个很好的切入点,其中积雪辐射模型可以采用考虑了积雪层的多次散射的积雪辐射参数化模型;而冻土微波辐射模型则需要采用前面提到的裸露地表辐射模型的研究成果。在此基础上研究不同雪深、雪密度、雪类型和雪湿度状况下地表冻融对微波辐射的影响,是实现有积雪覆盖区域地表冻融判别的关键。

对于有植被覆盖的冻结地表的微波辐射特征研究,需要考虑植被的多次散射,进一步发展和完善一阶参数化模型,结合裸露冻结地表微波辐射模型和植被介电常数模型的研究成果,基于冻土分布区域典型植被覆盖类型,发展植被覆盖冻结地表微波辐射模型。同时,考虑引入微波植被指数,研究不同植被覆盖类型和植被覆盖度对冻结地表微波辐射的影响。更为复杂的状况是植被、积雪和冻结地表的复杂组合,其辐射特征的模拟研究也是需要进一步深入开展的工作。需要特别强调的是,基于实验的机理研究以及模型的实验验证工作显得比较薄弱,需要加强。

地形对冻土微波辐射影响的研究也是一个不容忽视的课题。地形对冻结地表微波辐射的影响一方面在于地表的起伏造成卫星观测的几何方向和微波传播的极化方向由全局参考坐标系转换至局地参考坐标系下,产生本地入射角和极化旋转,从而影响地表像元的发射率,地表的几何特征变化给冻结地表不同波段和极化亮温关系带来了不确定性;另一方面在于阴坡阳坡的水热状况、冻融状况差异造成被动微波像元内辐射能量的异质性。这 2 方面因素的共同作用致使在平坦地表上发展的冻融判别算法在复杂地形上应用时的失效。因此研究改进复杂地形微波辐射模型,有助于加深地形对冻结地表微波辐射特征影响的认识,提高地表冻融状态判别算法的可靠性。

### 3.3 地表冻融判别与物理参数反演算法研究

目前,微波遥感在冻结地表研究中的主要应用是对地表冻融状态进行判别,已有的算法更适用于裸露的冻结地表,所依据的机理不够清晰,主要判据区域依赖性较强,因此用于全球复杂地表的冻融状

态监测尚有很大不确定性。按照上面提出的研究课题,在深入研究复杂冻结地表微波辐射特征的基础上,有望进一步改进地表冻融判别算法,使之适用于复杂地表状况,同时还可以开发复杂地表冻融交替过程中冻融相变水量微波遥感反演算法。主要工作包括:利用复杂冻结地表模型研究的成果对各种冻结地表的微波辐射进行模拟,分析地表冻融判别算法和物理参数反演算法对地表积雪覆盖和植被覆盖的敏感性以及定量关系,从而寻找并确定判别地表冻融最优的波段组合以及阈值;通过研究地形对算法的影响,对山区的算法进行修正。对植被覆盖和积雪覆盖地区,建立合适的微波植被指数和积雪覆盖指数,与地表冻融判别算法结合,进而提高算法在复杂地表上的适用性;在冻融判别的基础上,寻找复杂地表下冻融相变水量与微波辐射特征的关系,改进相变水量算法,通过微波辐射计及卫星数据对算法进行多尺度验证;此外,进一步探索基于新型传感器如 SMOS<sup>[31]</sup>、Aquarius<sup>[32]</sup>、SMAP<sup>[33]</sup> 的冻融判别算法,利用更长波段数据的高穿透性以及对积雪覆盖的低敏感性,提高积雪覆盖下土壤冻融判别精度。

## 4 结 语

被动微波遥感用于冻融过程监测与相变水量反演具有较强的理论基础和技术支撑,但由于研究工作起步较晚,冻融判别算法的适用范围和条件还受到很大限制,相变水量反演可靠性有待于进一步提高。冻融状态的时空分布和相变水量的变化对于理解陆表过程机理、分析全球变化和区域响应特征具有非常重要的意义,但要实现全球范围的监测,复杂地表情况下的冻融判别和参数反演是必须要解决的问题。根据上述分析,复杂地表情况下被动微波遥感冻融状态判别和参数反演机理研究所面临的主要问题和需要开展的工作可以概括为:

- (1) 在频率范围 1 ~ 40 GHz 之间,研究典型土壤伴随冻结过程的发育,介电常数变化特征的模拟与测量;典型植被的叶片、枝干在不同生长阶段介电常数的模拟与测量;逐步建立典型土壤、积雪和植被类型的介电常数数据库。主要从介电常数的测量方法以及模型的改进上进行突破,研究如何利用微波网络分析仪测量冻土和冻结状况下植被组分的介电常数,降低被测样的制备以及温度控制的所带来的测量误差;在介电混合模型的基础上,改进现有的冻土和植被的介电常数模型。
- (2) 改进和发展冻土、积雪和冬季植被微波辐

射模型。在冻土、冬季植被以及积雪介电常数模型的研究基础上,针对不同地表覆盖状况,对地表面散射模型、地表体散射模型、积雪、植被覆盖地表的辐射模型进行集成耦合,建立描述复杂地表微波辐射的正向模拟系统,并通过地面辐射观测对耦合后的模型进行验证。从而深化对自然界复杂冻结地表微波辐射机理的认识,为复杂地表土壤冻融判别算法和冻土物理参数定量反演算法打下基础。

(3) 进一步改进复杂地表被动微波遥感冻融判别算法和相变水量反演算法。融入更多的机理研究成果,从模型出发,针对不同的地表覆盖状况,建立普适性更强的冻融判别和相变水量算法。同时,有效利用新型 L 波段星载微波辐射计的大穿透深度以及多角度观测特点,综合利用冻土辐射及散射特征,结合更高分辨率雷达观测,提高冻土遥感产品的空间分辨率。进一步,研究如何通过连续密集的站点观测和陆面过程模型模拟等方法,实现对大尺度被动微波遥感监测技术的可靠性验证。

**致谢:**感谢张涛、李云青、郝振国、王培、刘勇、肖丽娇、吴凤敏等同学为本文编写做出的贡献。

## 参考文献 (References):

- [1] Zuerndorfer B, England A W, Dobson M C, et al. Mapping Freeze/Thaw boundaries with SMMR data[J]. *Journal of Agriculture and Forest Meteorology*, 1990, 52(1/2): 199-225.
- [2] Zuerndorfer B, England A W. Radiobrightness decision criteria for Freeze/Thaw boundaries[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(1): 89-102.
- [3] Judge J, Galantowicz J F, England A W, et al. Freeze/Thaw classification for prairie soils using SSM/I radio brightnesses[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(4): 827-832.
- [4] 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.
- [5] Zhang T, Armstrong R L, Smith J. Investigation of the near-surface soil Freeze-Thaw cycle in the contiguous United States: Algorithm development and validation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D22): 8 860.
- [6] Schmugge T, O'Neill P E, Wang J R. Passive microwave soil moisture research[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1986, GE-24(1): 12-22.
- [7] Jackson T J, Schmugge T J. Passive microwave remote sensing system for soil moisture: Some supporting research[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1989, 27(2): 225-235.
- [8] Foster J L, Hall D K, Chang A T C, et al. An overview of passive microwave snow research and results[J]. *Review of Geophysics and Space Physics*, 1984, 22(2): 195-208.
- [9] Chang A T C, Foster J L, Hall D K. Nimbus-7 SMMR derived global snow cover parameters[J]. *Annals of Glaciology*, 1987, 9: 39-44.
- [10] England A W. Radiobrightness of diurnally heated, freezing soil[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(4): 464-476.
- [11] Wegmüller U. The effect of freezing and thawing on the microwave signatures of bare soil[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 33(2): 123-135.
- [12] Liou Y, England A W. Annual temperature and radiobrightness signatures for bare soils[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(4): 981-990.
- [13] Smith N V, Saatchi S S, Randerson J T. Trends in high northern latitude soil freeze and thaw cycles from 1988 to 2002[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: D12101.
- [14] Jin R, Li X, Che T. A decision tree algorithm for surface soil freeze/thaw classification over China using SSM/I brightness temperature[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: 2 651-2 660.
- [15] Han L, Tsunekawa A, Tsubo M. Monitoring near-surface soil freeze-thaw cycles in northern China and Mongolia from 1998 to 2007[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2010, 12(5): 375-384.
- [16] Zhao T, Zhang L, Jiang L, et al. A new soil freeze/thaw discriminant algorithm using AMSR-E passive microwave imagery[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25: 1 704-1 716.
- [17] Kim Y, Kimball J S, McDonald K C, et al. Developing a global data record of daily landscape freeze/thaw status using satellite passive microwave remote sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(3): 949-960.
- [18] Zhang L X, Zhao T J, Jiang L M, et al. Estimate of phase transition water content in freeze-thaw process using microwave radiometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(12): 4 248-4 255.
- [19] Hoekstra P, Delaney A. Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79(11): 1 699-1 708.
- [20] Hallikainen M T, Ulaby F T, Dobson M C, et al. 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.
- [21] Zhang L, Shi J, Zhang Z, et al. The estimation of dielectric constant of frozen soil-water mixture at microwave bands[C]//Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003, 4: 2 903-2 905.
- [22] Mironov V L, Dobson M C, Kaupp V H, et al. Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(4): 773-785.
- [23] Li Liying, Zhang Lixin, Zhao Shaojie. Laboratory measurement of the dielectric constant of frozen soil[J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2007, 43(3): 241-244. [李丽

- 英, 张立新, 赵少杰. 冻土介电常数的实验研究[J]. 北京师范大学学报:自然科学版, 2007, 43(3): 241-244. ]
- [24] England A W. Relative influence upon microwave emissivity of fine-scale stratigraphy, internal scattering, and dielectric properties[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1976, 114(2): 287-299.
- [25] England A W, Galantowicz J F, Zuerndorfer B W. A volume scattering explanation for the negative spectral gradient of frozen soil[C]//Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1991, 3: 175-177.
- [26] Liou Y, England A W. A land-surface process/radiobrightness model with coupled heat and moisture transport for freezing soils [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(2): 669-677.
- [27] Schwank M, Stahli M, Wydler H, *et al.* Microwave L-band emission of freezing soil [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(6): 1252-1261.
- [28] Mironov V L, Bobrov P P, Zhironov P V, *et al.* Radiobrightness dynamics of freezing/thawing processes for different soils [C]// Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006, 2: 998-3001.
- [29] Zhang Lixin, Zhao Shaojie, Jiang Lingmei. The time series of microwave radiation from representative land surface in the upper reaches of Heihe River during alternation of freezing and thawing [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(2): 198-206. [张立新, 赵少杰, 蒋玲梅. 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[J]. 冰川冻土, 2009, 31(2): 198-206. ]
- [30] Zhao S, Zhang L, Zhang Y, *et al.* The coherent microwave emission of freezing soil: Experimental research and model simulation [C]// Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009, 2: 678-681.
- [31] Kerr Y H, Waldteufel P, Wigneron J P, *et al.* The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 666-687.
- [32] Le Vine D M, Lagerloef G S E, Colomb F R, *et al.* Aquarius: An instrument to monitor sea surface salinity from space [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(7): 2040-2050.
- [33] Entekhabi D, Njoku E G, O'Neill P E, *et al.* The Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 704-716.

## Research Advances in Passive Microwave Remote Sensing of Freeze-Thaw Processes over Complex Landscapes

Zhang Lixin<sup>1,2,3</sup>, Jiang Lingmei<sup>1,2,3</sup>, Chai Linna<sup>1,2,3</sup>,  
Zhao Shaojie<sup>1</sup>, Zhao Tianjie<sup>1</sup>, Li Xinxin<sup>1</sup>

(1. School of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

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

3. Beijing Key Laboratory of Environmental Remote Sensing and Digital City, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Soil Freeze-Thaw processes and parameters play an essential role in land surface processes, climate models, global change and other critical aspects. Since passive microwave is sensitive to soil moisture, and has a high revisit frequency, it is suitable for the monitoring of soil Freeze-Thaw processes. Research achievements in microwave remote sensing of frozen soil are reviewed and discussed in this paper. According to the research demands including frozen soil radiation simulation and globally monitoring of frozen soil, several current scientific issues are proposed and analyzed. The ability of microwave remote sensing of Freeze-Thaw processes over complex landscapes involving soils, snow cover and vegetation cover is well evaluated. A preliminary research proposal is presented for addressing these issues.

**Key words:** Freeze-Thaw processes; Microwave remote sensing; Complex landscapes.