

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0117

JIANG Yuqin, WEN Jun, LÜ Shaoning, et al. Study on evaluating soil freeze/thaw process of grassland underlying surface in source region of the Yellow River by using ground-based microwave remote sensing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(6):1718-1731. [蒋雨芹, 文军, 吕少宁, 等. 地基微波遥感评估黄河源区草原下垫面土壤冻融过程研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(6):1718-1731.]

地基微波遥感评估黄河源区草原下垫面土壤冻融过程研究

蒋雨芹¹, 文军¹, 吕少宁², 王作亮³, 刘闻慧¹, 武月月¹, 邓浩¹

(1. 成都信息工程大学 大气科学学院/高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 复旦大学 大气与海洋科学系/大气科学研究院, 上海 200438; 3. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 土壤冻融过程对气候变化非常敏感, 如何准确监测土壤冻融过程具有重要的科学意义。利用2017年6月至2018年6月中国科学院若尔盖高原湿地生态系统研究站玛曲观测场地基微波辐射计观测数据、浅层土壤温度和近地面气温数据, 通过构建归一化极化比值冻结因子、极化差值冻结因子、组合水平极化差值冻结因子和组合垂直极化差值冻结因子等不同土壤冻结因子, 评估了黄河源区草原下垫面土壤冻融过程。结果表明: L波段微波辐射计监测土壤冻融状态的结果与近地面气温和浅层土壤温度表征的土壤冻融过程基本一致。当入射角为50°时, 归一化极化比值冻结因子和极化差值冻结因子与实测数据的一致性分别达到83.6%和82.8%。每种冻结因子具有明显的季节性变化, 四种冻结因子在春季时的准确度低于夏、秋、冬三个季节。归一化后的相对冻结因子的标准差在秋季最大, 可达0.3; 在冬季和夏季最小, 值小于0.2。在土壤发生冻结和融化转换时, 垂直极化和水平极化下的亮温同时下降, 其差值较完全冻结或者完全融化时的亮温差大。研究结果可为微波遥感监测土壤冻融过程提供技术参考。

关键词: 黄河源区; 微波辐射计; 土壤冻融过程; 极化比

中图分类号: S152; TP722.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)06-1718-14

0 引言

土壤冻融过程影响的地区占地球陆地总面积的一半以上, 包括多年冻土和季节冻土, 其中季节性土壤冻融转换发生在大约51.0%的陆地上, 而多年冻土区约占北半球裸露土地面积的23.9%^[1]。在北半球, 每年大约有 $5.0 \times 10^7 \text{ km}^2$ 的范围会经历冻融转换过程^[2]。由于青藏高原的特殊地理位置, 高原上广泛分布着多年冻土和季节冻土, 土壤冻融过程(freeze/thaw process, F/T)可以通过改变土壤表层及其覆盖层与大气间能量与水分交换, 进而影响近地面能量平衡, 在区域气候变化中起着非常重要的作用。此外, 冰和液态水在冻土中的共存又极大地

改变了土壤的水力和热力性质, 从而影响了土壤介质中的水热分布, 对水文过程产生了深远的影响^[3]。因此, 开展青藏高原水文和气候研究就必须掌握较为准确的土壤冻融过程信息。

在过去的研究中, 季节性土壤冻融过程主要为分析研究地面单个站点的实测数据^[4], 或进行有限区域尺度的数值模式模拟^[5]。由于冻土的分布范围在大尺度上主要受到纬度地带性和垂直地带性的双重控制, 但是在中小尺度上又会受到许多局地因素的影响(如坡向、坡度、积雪、植被覆盖、土壤含水量和地质构造等), 导致其空间异质性较强^[6]。相对于传统的地面站点观测研究, 卫星微波遥感技术优

收稿日期: 2020-09-15; 修订日期: 2021-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971308; 42075150); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0105); 成都信息工程大学自主研发项目(KYTZ201821)资助

作者简介: 蒋雨芹, 硕士研究生, 主要从事陆面过程研究. E-mail: j.yuqin@qq.com

通信作者: 文军, 教授, 主要从事陆面过程与气候变化研究. E-mail: jwen@cuit.edu.cn

势显著,星载微波辐射计可以提供长时间序列、覆盖全球的绝大部分地区、1~2日重访周期和多通道的双极化亮温观测等监测优势。L波段微波可以穿透覆盖度较小的植被和较薄的积雪,获取植被或积雪覆盖下的土壤物理信息^[7]。不仅如此,由于液态水和冰的相对介电常数差异在L波段较为显著,最大可达80,因此L波段微波辐射可以监测地表冻融过程^[8]。L波段地基微波辐射计ELBARA-III仪器的中心波长约为21 cm,具有较强的穿透能力,可以提供一定深度的土壤信息^[9]。在微波辐射传输过程中,地表植被的体散射效应很弱,影响较小^[10]。由于有上述优势,L波段主动和被动微波遥感可以监测积雪融化和土壤冻融过程^[11-12]。近年来也出现大量的研究使用水瓶座卫星(Aquarius)与土壤湿度和海洋盐分卫星(Soil Moisture and Ocean Salinity mission, SMOS)来监测土壤冻融过程^[13-15],并利用Mo等^[16]提出的辐射 τ - ω 零阶辐射传输模型,可以将观测的亮温动态与土壤冻融转换联系起来。这也证明了L波段被动微波测量在监测土壤冻融状态中的可行性和优越性^[14]。

如上所述,由于土壤冻融过程的空间差异较大,并且目前星载微波辐射计的空间分辨率较低(通常为数十千米),远远不能满足土壤冻融状态监测的需要,而地表温度对主动微波的后向散射系数影响较小。因此,可以将主动微波遥感和被动微波遥感相结合来监测地表冻融,开展地基微波遥感监测土壤冻融过程研究较为重要。同时,土壤冻融过程微波辐射地面观测试验也可以为从空间探测土壤的冻融状态提供理论和依据。土壤冻结后,微波辐射计观测的亮温梯度会降低,并且含水量越大,降低得越明显,水平极化的亮温梯度总是大于垂直极化的亮温梯度,并发现不同极化方式的亮温与冻土中液态土壤水的相变过程密切相关^[17]。Schwank等^[18]也通过对L波段微波辐射法监测土壤F/T状态的试验研究和理论分析,发现土壤的冻融过渡对土壤的L波段特征有明显的影 响,当土壤表层发生冻结时,L波段的亮温升高。

青藏高原是全球土壤冻融过程的主要发生区域之一。然而,目前对青藏高原土壤冻融过程的主要研究还停留在地面观测数据和数值模拟结果的分析上,现有卫星遥感土壤冻融数据产品的精度也有待提高,鲜有对地基微波辐射观测试验的研究。为了更好地检验卫星遥感土壤冻融过程数据产品,

发展卫星遥感土壤冻融过程算法模型,非常有必要开展地基微波遥感土壤冻融过程的研究。本文正是基于以上需求,利用在甘肃省甘南藏族自治州玛曲县境内的中国科学院若尔盖高寒生态站陆面与遥感试验平台^[19],通过分析L波段地基微波辐射计观测数据,开展监测土壤冻融过程的研究,分析L波段微波对土壤季节性冻融周期的敏感性,为完善卫星遥感土壤冻融过程提供理论基础。

1 数据与方法

本研究区域位于青藏高原东北部的黄河源区,甘肃省甘南藏族自治州玛曲县内的中国科学院若尔盖高寒生态站陆面与遥感试验平台观测场(33°55'N、102°09'E,以下简称玛曲观测场)。玛曲观测场的下垫面类型以高寒草原、高寒草甸为主,整个生长季植被的高度介于5~15 cm,每年6—7月,观测场内的植被高度通过人工控制,土壤以砂质壤土为主,粉砂壤土比例较大。玛曲观测场海拔为3 432 m,其所属地区气候属于典型的高原大陆性高寒湿润型,受青藏高原和东亚季风性大陆气候的影响,冬季寒冷干燥,夏季多雨,多年平均气温仅2℃,多年平均地表气压在640 hPa左右,多年平均降水为505 mm^[20]。

本研究所使用的地基微波辐射计(ELBARA-III)由瑞士GAMMA遥感公司设计,双极化($p=H$ 时水平极化, $p=V$ 时垂直极化)仰角扫描L波段(1.4 GHz)Dicke类型天线长度为2.7 m,直径1.4 m波束宽度为12°,信号强度为-3 dB的辐射计^[21]。微波辐射计(ELBARA III)被安装在陆面与遥感实验平台观测场处一个5 m高的塔式观测台上,旋转天线(大致在天线波束的相同位置)距离地面6.5 m。观测场地理位置和仪器设备见图1。

在标准观测模式下,ELBARA-III以30 min的时间间隔和5°角度步长开展从40°~70°观测角的地面扫描观察。仪器每日测量数据包括:仰角扫描序列观测数据、固定仰角观测数据、天顶(天空)观测数据。每天23:55进行天空测量,开展一次天空背景辐射观测,观测角度为155°,用以标定仪器自身的冷源。仪器设备主要属性列于表1。为观测信号不被其他辐射源干扰和减少观测误差,ELBARA-III使用了两个同步信道(1.400~1.418 GHz, 1.409~1.427 GHz)来增强频带内的噪声信号识别,减轻和检测潜在的无线频率干扰RFI(radio frequency inter-

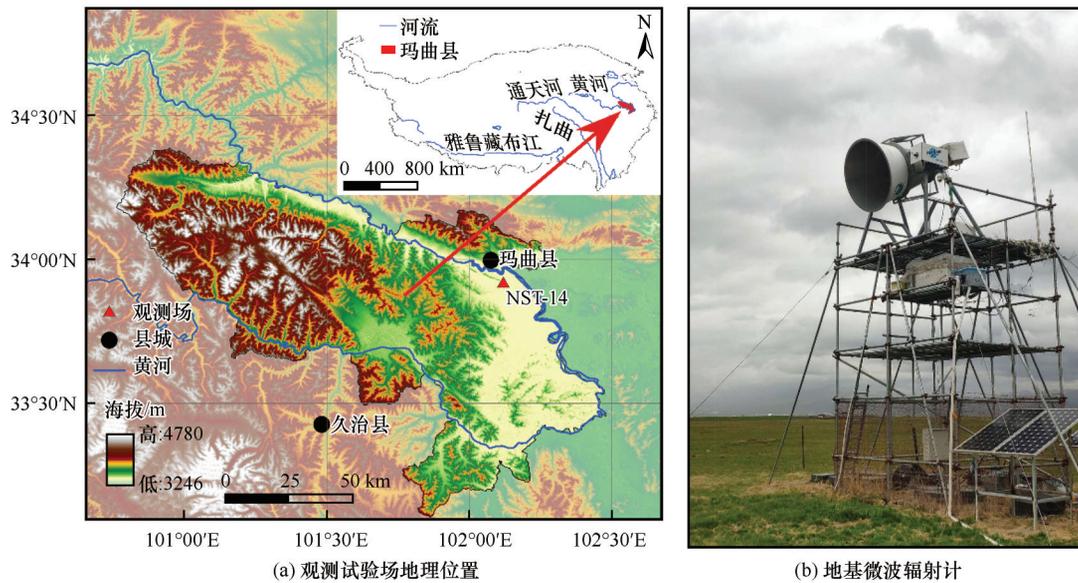


图1 微波遥感土壤冻融过程观测试验场地理位置(a)和ELBARA-III辐射计(b)

Fig. 1 Geographical location of the experiment site for the observation of the soil freeze/thaw process by microwave remote sensing (a) and the ELBARA-III radiometer (b)

表1 本研究所用微波辐射计(ELBARA-III)的主要属性

Table 1 Main attributes of the microwave radiometer (ELBARA-III) used in the study

参数	对应值
极化类型	垂直极化、水平极化
通道中心频率	1.4075 GHz, 1.4195 GHz
带宽	22.0 MHz(2×11.0 MHz)
入射角范围	$40^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$
绝对精确度	± 0.5 K

ference, FRI)。ELBARA-III的亮温观测的绝对精度优于1 K,可记录敏感响应大于0.1 K的微波亮温变化^[22]。

本文还用到其他地面观测数据,来源于中国科学院西北生态环境资源研究院玛曲土壤温湿度观测网和中国科学院若尔盖高寒生态站陆面与遥感试验平台观测场。土壤温湿度观测网总共有20个站点,分布于平缓山坡和平坦地表,每个站点埋设由美国Decagon设备公司生产的ECH20/EC-TM土壤湿度感应探头和ECH-EM50数据自动记录盒^[23]。本文选取观测网中NST-14点的观测数据,包括2.5 cm和5.0 cm深度的土壤温度/土壤湿度,采样频率为15分钟,由于设备故障,2018年7月部分数据缺失。近地面气温采样频率为30分钟。为减少误差,对于数据缺失值,本文选用平均日变化法处理,即某一时刻的缺失数据用相邻数日同一时刻没有缺失的数据的平均值代替^[24]。

2 土壤冻融过程的监测方法

2.1 地面观测数据监测冻融过程

在一个土壤冻融过程循环年内,土壤冻融过程分为四个阶段:完全融化阶段(thawed period, TP)、开始冻结至完全冻结阶段(freezing-to-frozen period, FFP),完全冻结阶段(frozen period, FP)和开始融化至完全融化阶段(thawing-to-thawed period, TTP)^[25]。根据土壤的日最高温度、日最低温度和日平均温度分别定义冻融过程的四个阶段,当土壤日最高温度低于0℃时,土壤处于完全冻结阶段;当土壤日最低温度高于0℃时,土壤处于完全融化阶段;当土壤日平均温度高于0℃,并且日最低温度低于0℃时,土壤处于开始冻结至完全冻结阶段;当土壤日平均温度低于0℃,并且日最高温度高于0℃时,土壤处于开始融化至完全融化阶段^[26-27]。

根据以上定义,可用2017年7月至2018年6月的玛曲观测场的浅层土壤温度(图2)划分得到土壤冻融的各阶段的起止时间和持续日数。由表2可知,在本研究时段内,玛曲观测场浅层土壤完全融化阶段从4月初开始,持续至11月下旬开始进入下一阶段。而完全冻结阶段则是从12月中旬开始,结束时间约为第二年的2月中旬。这两个阶段持续时间共300天左右,故玛曲观测场浅层土壤一年内大部分时间处于完全冻结或者完全融化状态。从完全土壤全冻结到完全融化的过渡阶段时间约为40天,

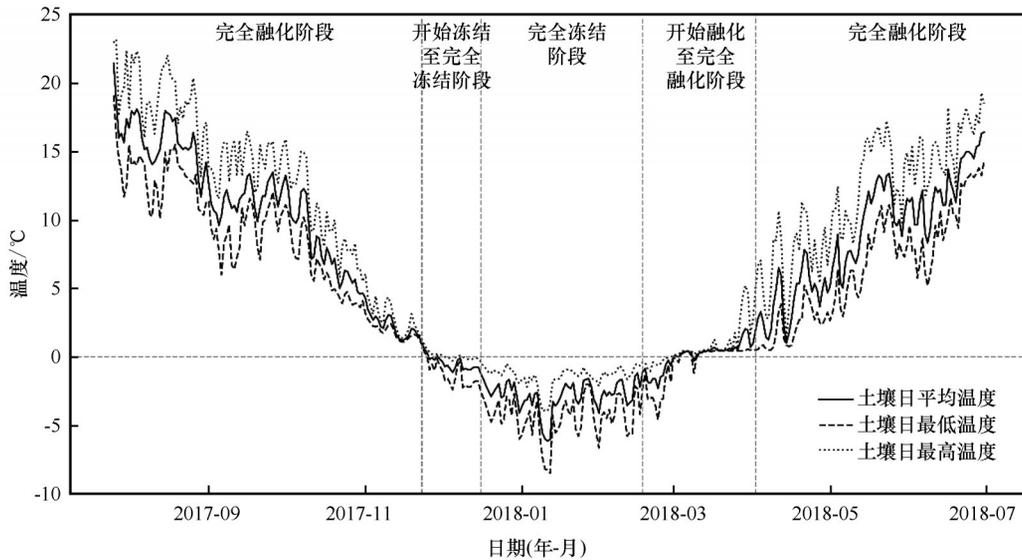


图2 玛曲观测场2017—2018年浅层土壤温度时序图

Fig. 2 Time series of the shallow soil temperature from 2017 to 2018 at Maqu Observatory

表2 玛曲观测场2017—2018年土壤各冻融过程阶段的起止日期和持续日数

Table 2 Start and end time and number of days of each freeze/thaw process stage of the soil at the Maqu Observatory during 2017—2018

土壤冻融过程阶段	起止日期(年-月-日)		持续日数/d
	开始日期	结束日期	
完全融化	—	2017-11-23	—
开始冻结至完全冻结	2017-11-24	2017-12-16	23
完全冻结	2017-12-17	2018-02-16	68
开始融化至完全融化	2018-02-17	2018-04-01	44
完全融化	2018-04-02	—	—

从土壤完全融化到完全冻结的过渡阶段时间平均为20天左右。

由于不同地区的土壤冻融过渡期不同,本文根据研究区域一个完整冻融年的四个冻融阶段的具体时间,划分为春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)、冬季(12月至次年2月)。由图3可知,春季和秋季期间(土壤多处于开始冻结至完全冻结阶段和开始融化至完全融化阶段)此期间 40° 、 50° 、 60° 入射角下,垂直极化和水平极化的亮温均值较夏季和冬季期间(土壤多处于完全冻结阶段和完全融化阶段)低。其中春季和夏季期间差距最大,不同入射角下,水平极化亮温平均相差60.4 K,垂直极化亮温平均相差32.0 K。春季和秋季期间亮温标准差比夏季和冬季大,表明亮温在发生土壤冻融转换时有明显响应。冬季期间,土壤多处于完全冻结阶段,垂直极化亮温波动较小, 60° 入射角下,标准差

最低仅为2.5 K。垂直极化和水平极化亮温的平均值在春季和秋季期间较低,夏季和冬季期间较高,分别为150.4 K和216.3 K,180.3 K和226.2 K;标准差在春季和秋季期间较大,夏季和冬季期间较小,分别为25.0 K和14.1 K,32.4 K和13.0 K。

2.2 微波辐射计遥感监测冻融过程

本文重点研究基于地基L波段微波辐射表面冻融算法的评估。利用ELBARA III得到的亮温数据作为输入数据,采用Schwank等^[18]提出冻结因子(frost factor, FF)表征土壤冻融状态与过程,再用地面观测数据评估L波段微波辐射计估算土壤冻融状态与过程关键参量及其季节变化。根据已有研究,本研究评估了四种不同的冻结因子。四种冻结因子主要与辐射极化比(比值或者差值)有关,分别为

$$FF_{NPR} = \frac{TB^V - TB^H}{TB^V + TB^H} \quad (1)$$

$$FF_{PD} = TB^V - TB^H \quad (2)$$

$$FF_{CHPD} = (TB^V - TB^H) \times (270 - TB^H) \quad (3)$$

$$FF_{CVPD} = (TB^V - TB^H) \times (300 - TB^V) \quad (4)$$

式中: FF_{NPR} 为归一化极化比值冻结因子(frost factor of normalized polarization ratio); FF_{PD} 为极化差值冻结因子(frost factor of polarization difference); FF_{CHPD} 和 FF_{CVPD} 分别为组合水平极化差值冻结因子(frost factor of combined horizontal polarization difference)和组合垂直极化差值冻结因子(frost factor of combined vertical polarization difference)。实际计算中采用Schwank等^[18]提出的相对冻结因子(relative frost factor, RFF)判别土壤的冻融过程与状态。

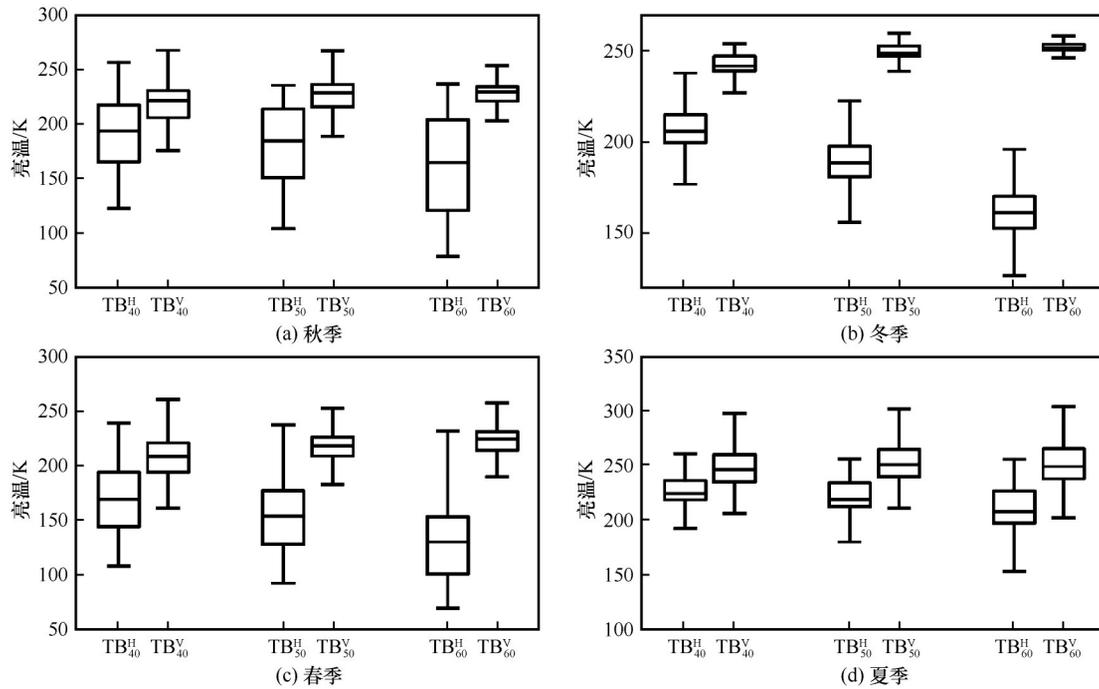


图3 入射角分别为40°、50°和60°下,ELBARA-III辐射计观测垂直和水平极化亮温在不同季节中的平均值和标准偏差
 Fig. 3 Average and standard deviation of the vertical and horizontal polarization brightness temperature observed by ELBARA-III radiometer in different seasons under the incident angles of 40°, 50° and 60°

RFF表达式为

$$RFF = \frac{FF_x(t) - FF_x(fr)}{FF_x(th) - FF_x(fr)} \quad (5)$$

式中: X 为相对冻结因子类型; $FF_x(t)$ 为由地基L波段微波辐射计每日观测地表亮温获得的冻结因子; $FF_x(fr)$ 和 $FF_x(th)$ 分别为土壤冻结和融化状态下冻结因子的数值。在此之上,提出一种判定阈值方法来区分冻结和融化状态^[28]。判定阈值方法为

$$\begin{cases} RFF < \Delta_1 \rightarrow \text{冻结} \\ RFF > \Delta_1 \rightarrow \text{融化} \end{cases} \quad (6)$$

再通过阈值(Δ_2)判定当天相对冻结因子的标准差的大小,进一步区分开始冻结至完全冻结阶段(FFP)和开始融化至完全融化阶段(TTP)。判定阈值方法为

$$\begin{cases} \text{冻结} \begin{cases} RFF_{std} < \Delta_2 \rightarrow FP \\ RFF_{std} > \Delta_2 \rightarrow FFP \end{cases} \\ \text{融化} \begin{cases} RFF_{std} < \Delta_2 \rightarrow TP \\ RFF_{std} > \Delta_2 \rightarrow TTP \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

RFF由不同冻结因子归一化处理后得到,故其对应阈值(Δ_1)应在0~1之间变化,可通过迭代算法找出不同冻结因子与参考数据集匹配准确度最优的阈值 Δ_1 ,阈值 Δ_2 范围与计算所得的相对冻结因子的标准差范围相同,处于0~1之间。

本研究将评估利用亮温观测值获取 $FF_x(fr)$ 和 $FF_x(th)$ 方法。第一种方法是“30-Average”法,即

$FF_x(fr)$ 和 $FF_x(th)$ 是分别为从2017年7月到2018年6月中30个 $FF_x(t)$ 的最大值和最小值的平均值(表3)。第二种方法是“5-Max/Min”法,即 $FF_x(fr)$ 和 $FF_x(th)$ 是分别从2017年7月至2018年6月的所有可用 TB^p 数据中选取5个最大值的平均值作为 $FF_x(fr)$,从2017年7月至2018年6月的所有可用 TB^p 数据中选取最小的5个值的平均值作为 $FF_x(th)$ 。

由于微波辐射计有多个观测入射角度,由此可以产生出多种冻结因子组合类型(4个 $FF_x \times 2$ 个参考状态(fr和th) $\times 3$ 个观测入射角度)。为了比较实测浅层土壤温度和近地面气温与相对冻结因子在反馈土壤冻融状态的一致性,将温度数据转换为土壤冻融信息:当天日平均温度大于0℃,则土壤视为融化状态;当天日平均温度小于0℃,则土壤视为冻结状态。然后,将相对冻结因子与参考数据集($T_{soil}^{2.5cm}$ 、 $T_{soil}^{5.0cm}$ 和 T_{air})获得的土壤冻融状态信息进行对比,用相匹配的冻结和融化天数除以总时间(剔除数据缺失天数),便可得出微波辐射计估算土壤冻融过程准确度。具体表达式为

$$Accuracy = \frac{Day_{correct}}{Day_{all}} \times 100\% \quad (8)$$

式中:Accuracy为算法估算土壤冻融状态与过程的准确度; $Day_{correct}$ 为参考数据集和相对因子正确匹配天数; Day_{all} 为总天数。研究表明,入射角为50°时,

表3 “30-Average”和“5-Max/Min”方法在不同入射角下的冻融参考值

Table 3 Freeze-thaw reference values of “30-Average” and “5-Max/Min” methods under different incident angles

相对冻结因子	冻融参考值	“30-Average”法			“5-Max/Min”法		
		40°	50°	60°	40°	50°	60°
FF _{NPR}	FF(th)	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4
	FF(fr)	0	0	0	0	0	0
FF _{PD}	FF(th)	51.3	83.8	124.4	53.8	86.3	127.8
	FF(fr)	10.3	17.1	21.7	6.1	10.7	12.5
FF _{CHPD}	FF(th)	6 593.2	12 064.5	21 044.2	7 353.0	13 338.8	22 882.1
	FF(fr)	460.3	783.2	1 111.0	288.7	464.0	592.8
FF _{CVPD}	FF(th)	5 594.1	7 857.4	9 939.3	6 157.2	8 558.0	10 550.3
	FF(fr)	649.9	914.7	1 141.5	433.8	639.9	768.4

TB^p对土壤冻融过程比其他入射角度更敏感^[29],而SMAP(Soil Moisture and Active Passive)卫星的观测入射角为40°,为了增加可靠性,再选取入射角为60°的观测数据作为对照参考。本研究选取入射角为40°、50°和60°的数据进行分析。所以,本研究总共有24种不同类型的冻结因子组合类型表征土壤的冻融过程。

3 结果与分析

3.1 F/T算法评估

由图4可知,在对选用“30-Average”法和“5-Max/Min”法分别得到的FF_x(fr)和FF_x(th)的评估中,不同入射角度下的微波辐射计(ELBARA-III)数

据,与T_{soil}^{2.5cm}、T_{soil}^{5.0cm}和T_{air}三种F/T参考数据相比,使用第二种方法(“5-Max/Min”)获得的FF_x(fr)和FF_x(th)参考值效果较好,这是因为选用“5-Max/Min”方法所获得的冻融参考值的10天仅1天不处于完全冻结或者完全融化阶段,而选用“30-Average”方法所获得的冻融参考值的60天中,有13天不处于完全融化或者完全冻结阶段。当选用浅层土壤温度(T_{soil}^{2.5cm}、T_{soil}^{5.0cm})作为参考数据集时。第一种方法(“30-Average”)与第二种方法(“5-Max/Min”)最佳准确度的最大相差约为5.0%,平均相差3.9%。这是因为得到第二种方法使用的参考值多处于完全冻结或者完全融化阶段,而得到第一种方法的参考值有21.3%的天数出现短期融化或冻结现象,土壤融化

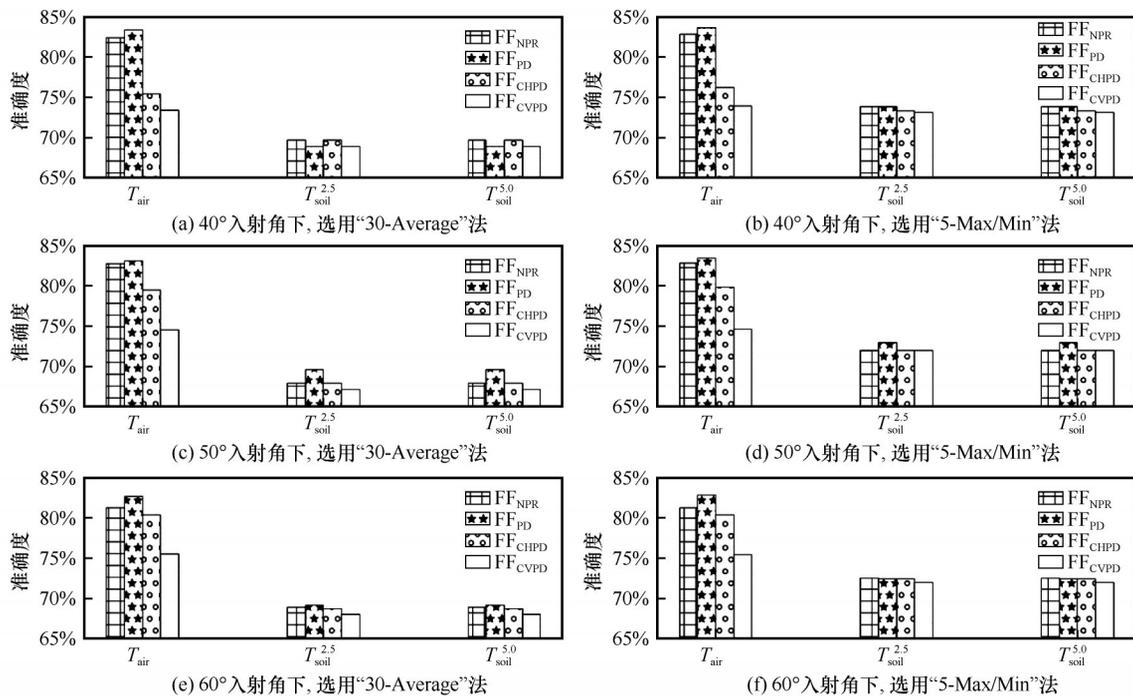


图4 不同入射角下,四个相对冻结因子与两类参考数据集匹配的准确度

Fig. 4 Accuracy of matching the four relative frost factors with the two types of reference data sets under different incident angles

后土壤水分下渗和土壤水分值降低导致出现相对偏低的冻结因子,从而使准确度较低。当选用浅层土壤温度作为参考数据集时, $T_{soil}^{2.5cm}$ 和 $T_{soil}^{5.0cm}$ 经过处理后的结果几乎完全一致,均可以很好地代表浅层土壤冻融状况。选用“30-Average”法相较选用“5-Max/Min”法获得的全年准确度较低,可能是异常值或者噪声干扰值的影响,例如无线电射频干扰未被过滤或者仪器测量异常等。因此,本文后续研究均采用第二种方法(“5-Max/Min”)所获得的 $FF_x(fr)$ 和 $FF_x(th)$ 参考值。

在评估四种冻结因子算法中,从图4可以看出,当选用 T_{air} 作为参考数据集时, FF_{PD} 和 FF_{NPR} 最佳准确度较高,在观测入射角为 40° 和 50° 时, FF_{NPR} 准确度均最高,可达83.6%。相比之下,选用 FF_{CHPD} 和 FF_{CVPD} 时得到的最佳准确度较低,在观测入射角为 40° 时, FF_{CVPD} 准确度最低,仅为73.8%,与最高的最佳 FF_{NPR} 准确度相差接近9.8%。并且 FF_{CHPD} 和 FF_{CVPD} 得到的最佳准确度随着入射角度的增加也增大,其中 FF_{CHPD} 增大幅度较明显。而 FF_{PD} 和 FF_{NPR} 得到的最佳准确度基本相近。当选用 $T_{soil}^{2.5cm}$ 或者 $T_{soil}^{5.0cm}$ 参考数据集时,四种冻结因子在不同的入射角度下获得的最佳准确度均有所下降,与选用 T_{air} 作为参考数据集时,平均相差约为7.2%,此时能得到的最佳准确度最高仅为73.8%。不过此时不同角度下四种冻结因子得到的最佳准确度数值相近,这表明选用浅层土壤温度作为参考数据集时,总体效果相近与入射角度和冻结因子的选择无关。因此,四种冻结因子中, FF_{PD} 和 FF_{NPR} 对土壤冻融状态的转换相对比较

敏感。

3.2 相对冻结因子的最佳阈值分析

图5~7展示了不同入射角下,使用“5-Max/Min”法估算 $FF_x(fr)$ 和 $FF_x(th)$ 参考值的四种冻结因子与三类参考数据估算土壤冻融状态与过程的匹配准确度。结果表明,当选择 T_{air} 作为参考数据集时,可靠阈值范围较广(0.1~0.8),此间准确度存在一个极大值,曲线成“倒U”形,最大限度地提高了F/T的准确检测。其中,选择 FF_{PD} 时,最佳阈值为0.54,较为接近固定阈值($\Delta=0.5$);而选择另三种冻结因子时,最佳阈值通常较小,介于0.2~0.4之间,此时与固定阈值($\Delta=0.5$)相比,优化阈值后准确度提高10%~15%。随着入射角度增大,四类冻结因子获得较高准确度的可靠阈值范围均增大,即准确度大于70%的阈值增多。其中对冻融信号敏感的 FF_{PD} 变化显著,可靠阈值范围从0.4~0.6扩宽到0.35~0.65;对冻融状态转换相对不敏感的 FF_{CHPD} 和 FF_{CVPD} 可靠阈值也提前出现,分别在0.15和0.15达到可靠阈值的要求。通过比较三种入射角度下四种相对冻结因子得最佳阈值可知,选用气温作为参考数据集时, FF_{PD} 的最佳阈值最接近固定阈值为0.5; FF_{NPR} 的最佳阈值为0.4; FF_{CHPD} 和 FF_{CVPD} 的在入射角较低(40° 、 50°)最佳阈值为0.2,在入射角较高(60°)时最佳阈值为0.3。

当选用土壤温度作参考数据集时,在三种不同观测入射角度下,四种冻结因子获得的准确度均与阈值大体成负相关关系。但是四种冻结因子均存在一个拐点阈值,拐点阈值后,准确度回升。对冻

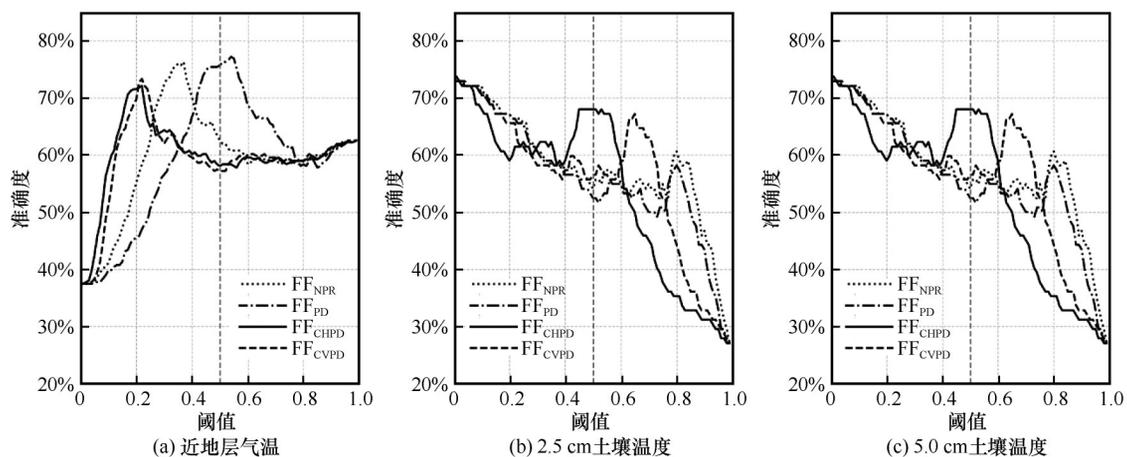


图5 在 40° 入射角下,使用“5-Max/Min”法 $FF_x(fr)$ 和 $FF_x(th)$ 参考值时四种冻结因子不同阈值下与参考数据集 T_{air} (a), $T_{soil}^{2.5cm}$ (b)和 $T_{soil}^{5.0cm}$ (c)匹配的准确度(虚线为固定阈值)

Fig. 5 Under the incident angle of 40° , using the “5-Max/Min” method $FF_x(fr)$ and $FF_x(th)$ reference values, the four frost factors are compared with the reference data set T_{air} (a), $T_{soil}^{2.5cm}$ (b) and $T_{soil}^{5.0cm}$ (c) under different thresholds (The dotted line is a fixed threshold)

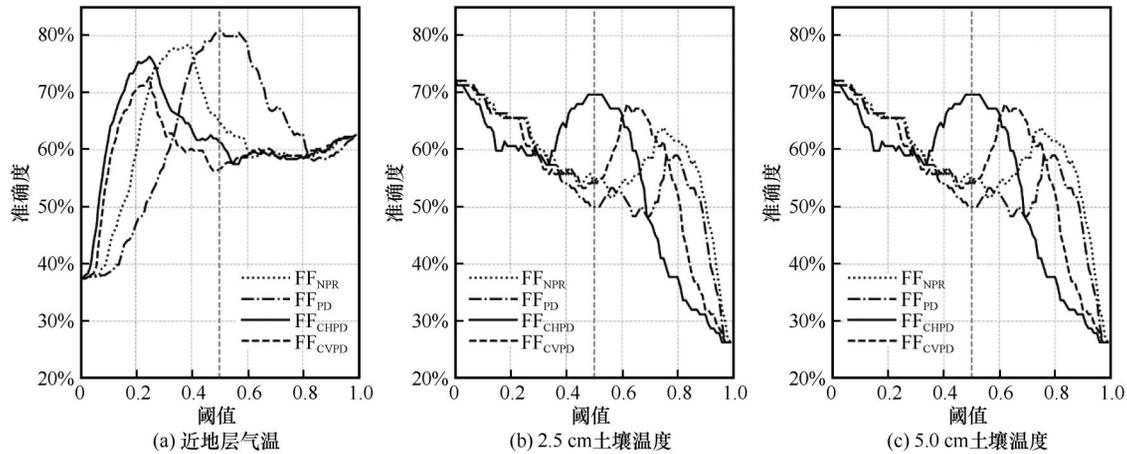


图6 在50°入射角下,使用“5-Max/Min”法 $FF_x(fr)$ 和 $FF_x(th)$ 参考值时四种冻结因子不同阈值下与参考数据集 T_{air} (a), $T_{soil}^{2.5cm}$ (b)和 $T_{soil}^{5.0cm}$ (c)匹配的准确度(虚线为固定阈值)

Fig. 6 Under the incident angle of 50°, using the “5-Max/Min” method $FF_x(fr)$ and $FF_x(th)$ reference values, the four frost factors are compared with the reference data set T_{air} (a), $T_{soil}^{2.5cm}$ (b) and $T_{soil}^{5.0cm}$ (c) under different thresholds (The dotted line is a fixed threshold)

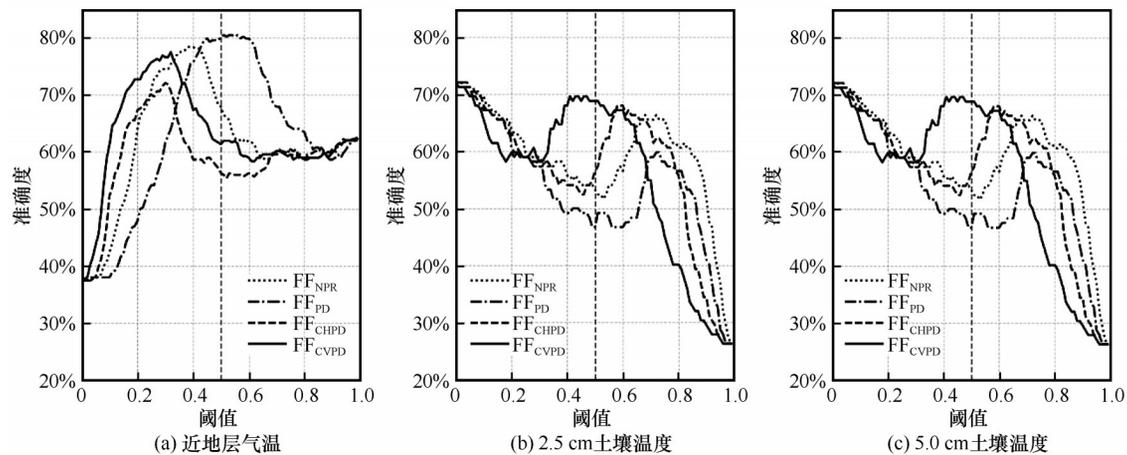


图7 在60°入射角下,使用“5-Max/Min”法 $FF_x(fr)$ 和 $FF_x(th)$ 参考值时四种冻结因子不同阈值下与参考数据集 T_{air} (a), $T_{soil}^{2.5cm}$ (b)和 $T_{soil}^{5.0cm}$ (c)匹配的准确度(虚线为固定阈值)

Fig. 7 Under the incident angle of 60°, using the “5-Max/Min” method $FF_x(fr)$ and $FF_x(th)$ reference values, the four frost factors are compared with the reference data set T_{air} (a), $T_{soil}^{2.5cm}$ (b) and $T_{soil}^{5.0cm}$ (c) under different thresholds (The dotted line is a fixed threshold)

融信号较为敏感的 FF_{PD} 和 FF_{NPR} 的拐点阈值相对靠近固定阈值,分别为0.4和0.6。随着观测入射角度增大,拐点阈值也前移。选用土壤温度作为参考数据集时,最佳阈值通常出现在拐点阈值后,随着入射角度增大,最佳阈值离拐点阈值越远。与选用气温作为参考数据集时相比,选用土壤温度作为参考数据集时,各相对冻结因子的阈值均增大。

3.3 基于微波辐射计观测数据估算F/T准确度的季节特征

在一个冻融年周期内,地基微波辐射计估计的总准确度(如图4所示)可以很好地表征F/T信号的整体强度,准确度越高说明冻融信号越明显,但不

能确定重要冻/融转换过渡季节的准确性。为了更好地评估不同季节下的土壤冻融状态,选用各个冻结因子下的最佳阈值和使用“5-Max/Min”方法后获得的 $FF_x(fr)$ 和 $FF_x(th)$ 参考值来最大程度减少干扰。选用气温和土壤温度作为参考数据集在准确度匹配方面给出了非常相似的结果。通过图8可知,当选用地温作为参考数据集时,四个冻结指数表现基本一致。在春季的F/T过渡期间,四个冻结指数准确度均较低,仅 FF_{CHPD} 指标在50°入射角时,准确度相对较高达到78.3%。夏季期间, FF_{NPR} 和 FF_{PD} 指标准确度远高于 FF_{CHPD} 和 FF_{CVPD} 指标,准确度均超过95%。秋季和冬季,四个冻结指数准确度均较高,仅

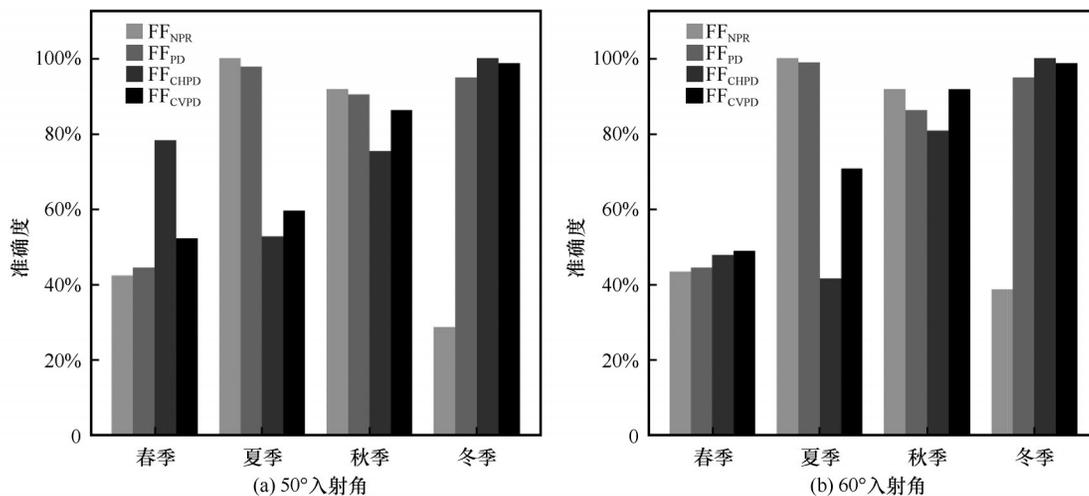


图 8 在 50°(a)和 60°(b)入射角下,选用 T_{air} 作为参考数据集的各个冻结因子在最佳阈值时的季节准确度
 Fig. 8 Seasonal accuracy of each frost factor selected as the reference data set T_{air} at the optimal threshold under the incidence angles of 50° (a) and 60° (b)

FF_{NPR} 指标在冬季期间(土壤完全冻结期)准确度较低,仅为 28.8%。通过图 9 可知,选用土壤温度作为参考数据集时,与选用气温作为参考数据集时相

似,两个 F/T 过渡期(春季和秋季),四个冻结指标的准确度均较低,春季期间仅 FF_{CHPD} 指标准准确度相对较高,达到 74.8%。

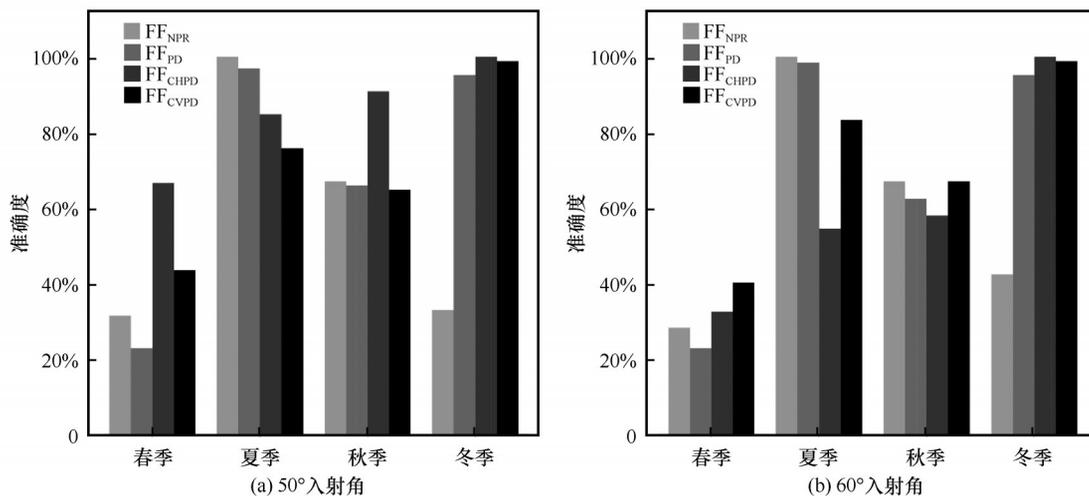


图 9 在 50°(a)和 60°(b)入射角下,选用 $T_{soil}^{5.0cm}$ 作为参考数据集的各个冻结指数在最佳阈值时的季节准确度
 Fig. 9 Seasonal accuracy of each frost factor selected as the reference data set $T_{soil}^{5.0cm}$ at the optimal threshold under the incidence angles of 50° (a) and 60° (b)

3.4 微波辐射计观测亮温与土壤冻融状态变化特征

由图 10 可知,随着观测入射角的增加,土壤冻融状态发生转换时,亮温差值振幅较大。当土壤处于由冻结(融化)向融化(冻结)转换阶段时,其亮温的差值介于 15~50 K 之间。当土壤处于完全冻结或者完全融化阶段时,亮温差值振幅较小。进入冬季土壤完全冻结后,观测到的 TB^p 增加到一定的饱和极限;达到极限后, TB^p 通常保持稳定,直到土壤开

始融化。期间,水平极化亮温的变化比垂直极化的变化更大,冬季的水平极化亮温的标准差和垂直极化的标准差分别为 10~13 K 和 2~7 K [图 3(b)]。这是由于水平极化对积雪变化的敏感性增加,特别是在垂直分层的积雪中。尽管大部分情况下干雪对 L 波段辐射是比较透明的,但是出现诸如融化-再冻结形成冰晶层之类的强烈特征会影响雪内部的局部折射,从而改变微波辐射计探测到的辐射信号^[18]。积雪在可见光波段和微波波段对辐射的影

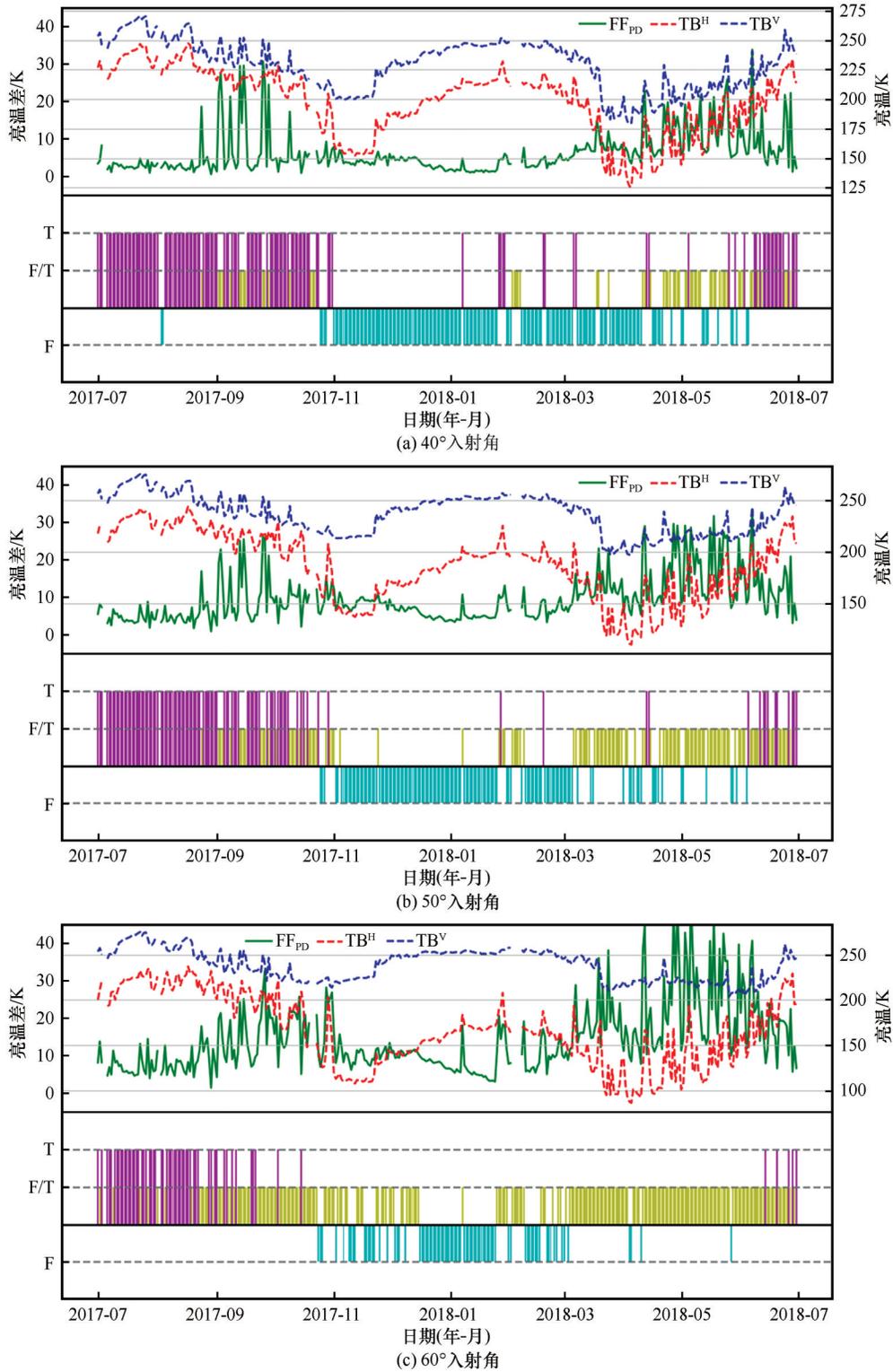


图 10 在 40°(a)、50°(b)和 60°(c)入射角下,土壤冻融状态及与微波辐射亮温的时间序列(紫:TP,黄:FFP 或者 TTP,蓝:FP)
 Fig. 10 Time series of the soil freeze-thaw state and the brightness temperature of microwave radiation under the incident angles of 40° (a), 50° (b) and 60° (c) (purple: TP, yellow: FFP or TTP, blue: FP)

响不同。在可见光波段,由于积雪冰晶或雪粒的反射率大,导致积雪的反照率大^[30],由此导致积雪表面获得的太阳辐射减小,导致地面冷却。在微波波段,由于积雪液态含水量较少,从而导致微波发射

率较小,再加上雪层温度的降低,使得微波辐射亮温降低。故当地面有积雪覆盖时,垂直极化和水平极化亮温均下降。在土壤从融化转向冻结的过程中,由于土壤中液态水含量急剧减小,导致土壤的

微波发射率增大,这使得垂直极化亮温和水平极化亮温也迅速上升,极化亮温差也进一步加大。而在融化状态下,土壤液态水含量高,土壤温度也高,变化幅度大,这使得极化亮温较大,变幅也大,极化亮温差减小。在微波辐射计的典型观测角度(40° , 50° , 60°)下,土壤冻融转换中的信号响应可以概述为:土壤发生冻融转换时,垂直极化和水平极化上亮温信号均增加,垂直极化和水平极化差值减小;土壤处于完全冻结或者完全融化阶段时,亮温信号趋于稳定,波动较开始融化或开始冻结阶段小。

在微波辐射计监测土壤冻融准确度最佳的 50°

入射角观测下(图 11),四个冻结因子的变化趋势相似,自 7 月起波动变化较小,进入 10 月下旬,土壤发生冻融转换,相对冻结因子数值增大,随后保持稳定。直到土壤开始解冻,相对冻结因子先波动上升,在春季中期达到最大,随后波动下降直至趋于稳定,全年变化趋势呈“双峰型”。由图 12 可知,将四个相对冻结因子归一化后,春季期间四个相对冻结因子的标准差平均约为 0.23,秋季期间四个相对冻结因子的标准差平均约为 0.3。土壤处于完全融化或者完全冻结状态时,相对冻结因子的标准差均小于 0.2。

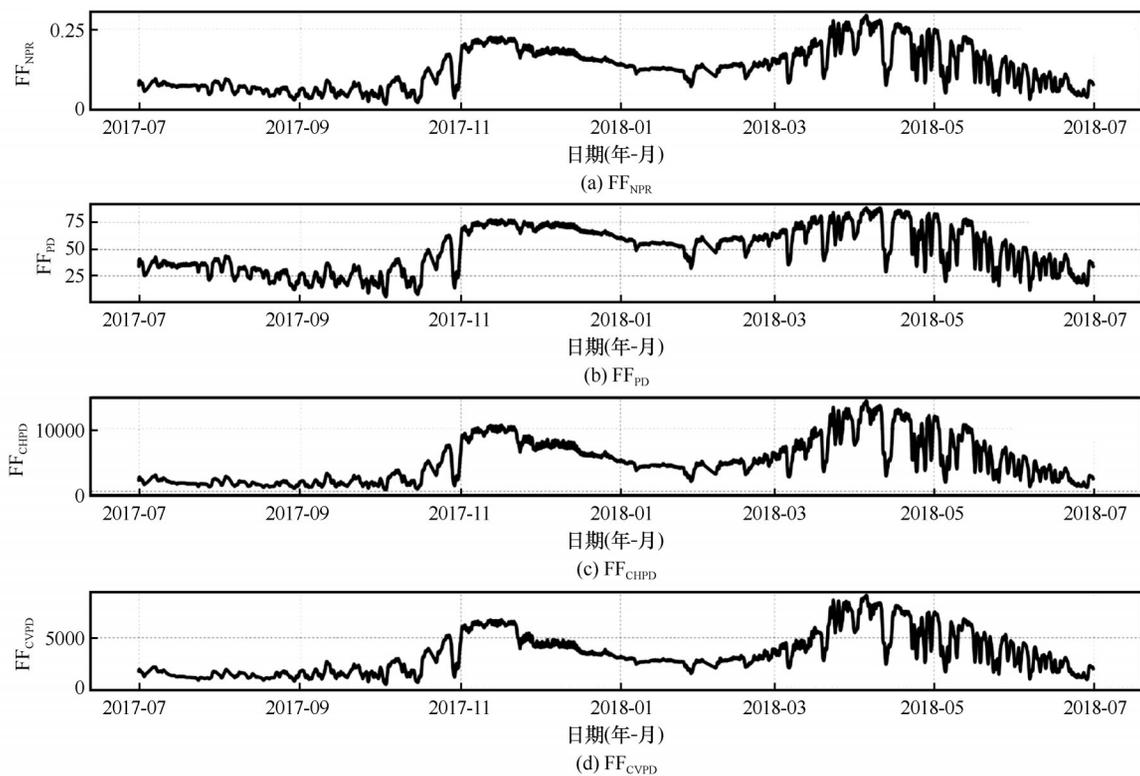


图 11 在 50° 入射角下,各个相对冻结因子的时间序列

Fig. 11 Time series of the relative frost factors under the incident angle of 50°

4 结论

本文通过对比分析中国科学院若尔盖高寒湿地生态系统站玛曲观测场地基微波辐射计(ELBARA-III)观测数据,评估了微波辐射计观测在土壤 F/T 监测中的准确性,得出以下结论:

(1)地基微波辐射计(ELBARA-III)监测土壤冻融过程时,对 F/T 监测结果与($T_{soil}^{2.5cm}$ 、 $T_{soil}^{5.0cm}$ 和 T_{air})参考数据集估算的结果基本一致。与 T_{air} 估算的 F/T 结果高于 $T_{soil}^{2.5cm}$ 或 $T_{soil}^{5.0cm}$,平均相差 7.2% 以上。

(2)不同冻结因子算法的准确度与观测入射角

有一定关联。当观测入射角为 50° 时, FF_{PD} 和 FF_{NPR} 算法准确度相较 40° 或 60° 观测入射角时高,最高可以达到 83.6%。 FF_{PD} 和 FF_{NPR} 算法对土壤的冻融转换过程更加敏感。

(3)在土壤冻融过程中, FF_{CHPD} 指标准确度相对较高,春季期间最高可以达到 84.8%,秋季期间最高可达 91.0%。在完全冻结期中, FF_{NPR} 指标准确度较另三个指标低,最低仅为 28.8%。

(4)土壤处于从冻结(融化)向融化(冻结)转换时期时,亮温差值介于 15~40 K 之间。当土壤处于

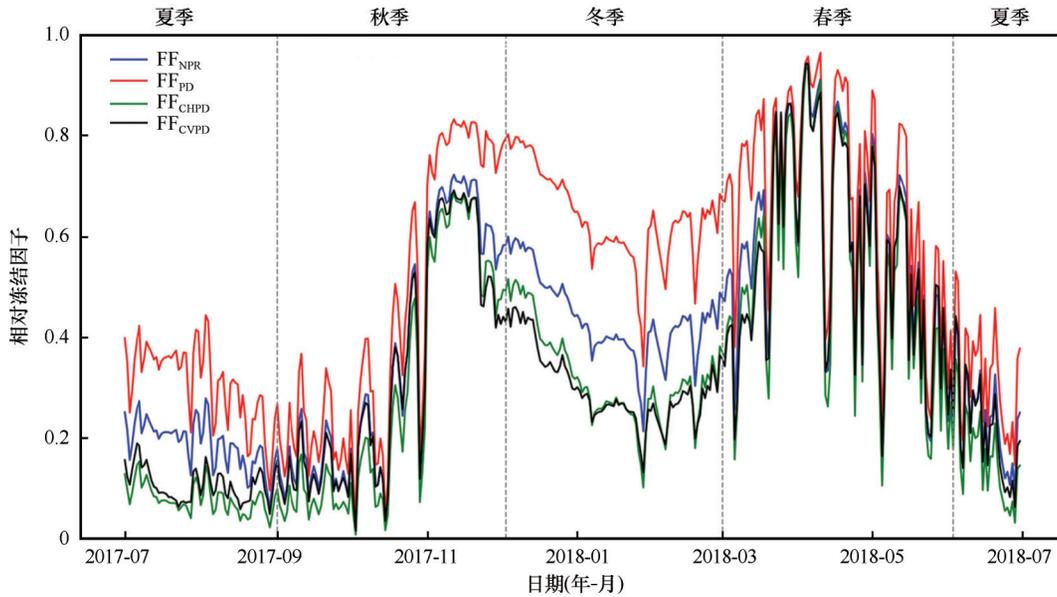


图 12 在 50° 入射角下, 归一化后各个相对冻结因子的时间序列

Fig. 12 Time series of the normalized relative frost factors under the incident angle of 50°

完全冻结或者完全融化阶段时, 亮温极化差值小于 15 K。在春季和秋季期间, 相对冻结因子波动较大, 标准差分别为 0.23 和 0.3。夏季和冬季期间, 相对冻结因子较为稳定, 标准差小于 0.2。

本文利用 L 波段地基微波辐射计观测数据评估了土壤冻融过程, 考虑到青藏高原地区下垫面的非均匀性, 若要得到更确定的结论需要仪器监测更多类型的下垫面, 进而对比分析。另外, 本文选取的研究站点的观测数据时间长度较短, 这还有待今后建立长时间序列资料。本次研究仅选用近地面气温和浅层土壤温度作为参考数据集, 下一步准备使用与土壤冻融过程联系更紧密的土壤含水量作为参考数据, 并利用数值模式探讨土壤冻融过程的影响机制。

参考文献 (References):

[1] Zhang T, Barry R G, Knowles K, et al. Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere[J]. *Polar Geography*, 2008, 31(1/2): 47-68.

[2] Kimball J S, McDonald K C, Keyser A R, et al. Application of the NASA Scatterometer (NSCAT) for determining the daily frozen and nonfrozen landscape of Alaska[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 75(1): 113-126.

[3] Lawrence D M, Slater A G. Incorporating organic soil into a global climate model[J]. *Climate Dynamics*, 2008, 30(2/3): 145-160.

[4] Wang Xuejia, Yang Meixue, Wan Guoning. Processes of soil thawing-freezing and features of ground temperature and moisture at D105 on the northern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(1): 56-63. [王学佳, 杨梅学, 万国宁. 藏北高原 D105 点土壤冻融状况与温湿特征分

析[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(1): 56-63.]

[5] Yang Meixue, Yao Tandong, Nozomu H, et al. Diurnal freeze-thaw cycles of topsoil in the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(16): 1975-1976. [杨梅学, 姚檀栋, Nozomu H, 等. 青藏高原表层土壤的日冻融循环[J]. *科学通报*, 2006, 51(16): 1974-1976.]

[6] Jin Rui, Li Xin, Che Tao. A decision tree algorithm for surface freeze/thaw classification using SSM/I[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(1): 152-161. [晋锐, 李新, 车涛. SSM/I 监测地表冻融状态的决策树算法[J]. *遥感学报*, 2009, 13(1): 152-161.]

[7] Che Tao. Impacts on passive microwave remote sensing of snow from heterogeneities of snow properties[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 38(1): 27-33. [车涛. 积雪属性非均匀性对被动微波遥感积雪的影响[J]. *遥感技术与应用*, 2013, 38(1): 27-33.]

[8] Zhao Tianjie, Zhang Lixin, Jiang Lingmei, et al. Joint inversion of soil moisture using active and passive microwave data[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7): 769-775. [赵天杰, 张立新, 蒋玲梅, 等. 利用主被动微波数据联合反演土壤水分[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(7): 769-775.]

[9] Zheng Donghai, Li Xin, Wang Xin, et al. Sampling depth of L-band radiometer measurements of soil moisture and freeze-thaw dynamics on the Tibetan Plateau[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 226: 16-25.

[10] Jackson T J, Schmugge T J. Passive microwave remote sensing system for soil moisture: some supporting research[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, 27(2): 225-235.

[11] Wang L, Wolken G J, Sharp M J, et al. Integrated pan-Arctic melt onset detection from satellite active and passive microwave measurements, 2000-2009[J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D22) [2011-01-25]. <https://doi.org/10.1029/2011JD016256>.

[12] Kim Y, Kimball J S, Zhang K, et al. Satellite detection of increasing Northern Hemisphere non-frozen seasons from 1979 to 2008: implications for regional vegetation growth[J]. *Remote*

- Sensing of Environment, 2012, 121: 472-487.
- [13] Kerr Y H, Waldteufel P, Wigneron J P, et al. Soil moisture retrieval from space: the soil moisture and ocean salinity (SMOS) mission [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(8): 1729-1735.
- [14] Roy A, Royer A, Derksen C, et al. Evaluation of spaceborne L-band radiometer measurements for terrestrial freeze/thaw retrievals in Canada [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(9): 4442-4459.
- [15] Panciera R, Walker J P, Kalma J D, et al. Evaluation of the SMOS L-MEB passive microwave soil moisture retrieval algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(2): 435-444.
- [16] Mo T, Choudhury B J, Schmugge T J, et al. A model for microwave emission from vegetation-covered fields [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1982, 87(C13): 11229-11237.
- [17] Zhang Lixin, Zhao Shaojie, Jiang Lingmei. The time series of microwave radiation from representative land surface in upper reach of the Heihe River during the 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.]
- [18] Schwank M, Wiesmann A, Werner C, et al. ELBARA II, an L-band radiometer system for soil moisture research [J]. *Sensors*, 2010, 10(1): 584-612.
- [19] Rautiainen K. L-band radiometer observations of soil processes in boreal and subarctic environments [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(5): 1483-1497.
- [20] Chen Jinlei, Wen Jun, Liu Rong, et al. Variation characteristics of soil temperature & moisture and air parameters in the source region of the Yellow River [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2017, 28(1): 98-108. [陈金雷, 文军, 刘蓉, 等. 黄河源区土壤温湿和大气参量变化特征 [J]. *应用气象学报*, 2017, 28(1): 98-108.]
- [21] European Space Agency. SMOS gets help from Tibet [EB/OL]. [2020-04-22]. http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/SMOS/SMOS_gets_help_from_Tibet.
- [22] Wang Zuoliang, Wen Jun, Liu Rong, et al. Evaluation of the applicability of different dielectric models for soil moisture retrieval based on the ground-based radiometer measurements [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(1): 97-110. [王作亮, 文军, 刘蓉, 等. 基于地基微波辐射计数据评估不同土壤介电模型反演土壤湿度的适用性 [J]. *遥感技术与应用*, 2020, 35(1): 97-110.]
- [23] Chen Jinlei, Wen Jun, Tian Hui, et al. A study of soil thermal and hydraulic properties and parameterizations for CLM in the SRYP [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(16): 8487-8499.
- [24] Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107: 43-69.
- [25] Ge Jun, Yu Ye, Li Zhenchao, et al. Impacts of freeze/thaw processes on land surface energy fluxes in the permafrost region of Tibet Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(3): 608-620. [葛俊, 余晔, 李振朝, 等. 青藏高原多年冻土区土壤冻融过程对地表能量通量的影响研究 [J]. *高原气象*, 2016, 35(3): 608-620.]
- [26] Ran Hongwu, Fan Jihui, Huang Jing. Characteristics of water and heat change during the freezing-thawing process of soil profiles in the alpine cold steppe, northern Tibetan Plateau [J]. *Pratacultural Science*, 2019, 36(4): 980-990. [冉洪伍, 范继辉, 黄菁. 藏北高寒草地土壤冻融过程水热变化特征 [J]. *草业科学*, 2019, 36(4): 980-990.]
- [27] Miao Chunyan, Chen Junfeng, Zheng Xiuqing. Relationship between air temperatures and soil freezing-thawing process [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2018, 49(3): 412-417. [苗春燕, 陈军锋, 郑秀清. 冻融期气温与土壤冻融过程的关系研究 [J]. *太原理工大学学报*, 2018, 49(3): 412-417.]
- [28] Rautiainen K, Lemmetyinen J, Schwank M, et al. Detection of soil freezing from L-band passive microwave observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 147(9): 206-218.
- [29] Rautiainen K, Parkkinen T, Lemmetyinen J, et al. SMOS prototype algorithm for detecting autumn soil freezing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 180: 346-360.
- [30] Li Danhua, Wen Lijuan, Long Xiao, et al. Energy balance during three snow cover processes at Maqu in the headwaters of the Yellow River [J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(6): 1327-1335. [李丹华, 文莉娟, 隆霄, 等. 黄河源区玛曲3次积雪过程能量平衡特征 [J]. *干旱区研究*, 2018, 35(6): 1327-1335.]

Study on evaluating soil freeze/thaw process of grassland underlying surface in source region of the Yellow River by using ground-based microwave remote sensing

JIANG Yuqin¹, WEN Jun¹, LÜ Shaoning², WANG Zuoliang³,
LIU Wenhui¹, WU Yueyue¹, DENG Hao¹

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology / Sichuan Key Laboratory of Plateau Atmosphere and Environment, Chengdu 610225, China; 2. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences / Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438, China; 3. Key Laboratory for Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Soil freeze/thaw process (F/T) is sensitive to climate change, accurately monitoring the soil F/T has important scientific significance. The brightness temperature data observed by ELBARA-III, as well as soil temperature and near-surface air temperature at the Maqu site of the Zoige Plateau Wetland Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, from June 2017 to June 2018 are deployed in this study. Four soil frost factors (FF) of which are normalized polarization ratio, polarization difference, combined horizontal polarization difference, and combined vertical polarization difference were constructed with the ELBARA-III data. The characteristics of the freeze-thaw process in source region of the Yellow River were evaluated by these four frost factors. The results show: There are agreements between FFs and the F/T estimated from two reference data sets (in situ measurements of soil temperature and air temperature). Frost factor of the normalized polarization ratio and frost factor of polarization difference get the highest accuracy of 83.6% and 82.8% under the incident angle of 50°, respectively. All frost factors have seasonal changes, the four frost factors were higher in spring than in summer, autumn and winter. The standard deviation of the normalized relative frost factor is the largest in autumn, and the maximum can reach 0.3; it is the smallest in winter and summer, and the minimum is less than 0.2. The brightness temperature difference between H-polarization and V-polarization decreases in freeze/thaw transitions, and the difference in the polarization difference during the freeze/thaw transition period is more significant than that during complete frozen or complete thawed period. The results are potential to provide technical supports for monitoring soil F/T by using microwave remote sensing.

Key words: source region of the Yellow River; microwave radiometer; soil freeze/thaw process; polarization ratio

(责任编辑: 车涛; 编辑: 武俊杰)