

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0040

SHAO Wanwan, ZHANG Tingjun. Comparison and analysis of the near-surface soil freeze/thaw status datasets obtained by passive microwave remote sensing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1):285–295. [邵婉婉, 张廷军. 被动微波遥感近地表土壤冻融状态数据产品对比及分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1):285–295.]

# 被动微波遥感近地表土壤冻融状态 数据产品对比及分析

邵婉婉, 张廷军

(兰州大学 资源环境学院 西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 近地表土壤冻融循环过程是陆面过程的“开关”, 对地表能量过程、水文过程、植被动态、温室气体交换和生态系统功能等都具有重要影响。除了依靠传统观测手段判别地表冻融, 被动微波卫星遥感技术已被成熟运用于全球尺度地表冻融研究中。利用被动微波卫星遥感亮温监测地表冻融大致经历了理论基础和算法的研制、算法参数的验证和应用以及建立数据集三个主要过程, 并基于不同的算法针对不同目的分别发布了不同地区、不同时间序列的近地表土壤冻融数据集。以中国气象局 435 个气象台站观测的 0 cm 土壤温度为标准, 对比分析了基于目前较为通用的双指标算法、单指标算法、决策树算法和判别式算法建立的近地表土壤冻融数据集的分类结果。结果表明: 单指标算法数据集冻结指标的平均值与观测资料最接近, 其偏差和均方根误差最小, 而决策树算法由于全局采用单一的 37 GHz 垂直极化亮温阈值, 低估了地表冻结, 导致偏差和均方根误差最大。近地表土壤冻融数据集和观测资料均表明随着全球变暖, 近地表土壤呈冻结首日推迟、冻结终日提前和冻结天数减少的趋势。通过对不同冻融数据集的比较研究, 为未来被动微波卫星遥感算法改进、近地表土壤冻融数据的合理使用提供了可靠的科学依据。

**关键词:** 近地表土壤冻融; 双指标算法; 决策树算法; 土壤冻融数据集

**中图分类号:** P642.14; P407 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)01-0285-11

## 0 引言

近地表土壤冻融循环过程是陆面过程的“开关”, 全球近 60% 近地表土壤经历冻融循环这一过程<sup>[1]</sup>。土壤的冻结起始日期、持续时间和范围对地表能量过程<sup>[2]</sup>、水文过程<sup>[3–4]</sup>、植被动态<sup>[5]</sup>、二氧化碳交换<sup>[6]</sup>和生态系统功能<sup>[7]</sup>等都具有重要影响。研究近地表土壤冻融循环变化对探究当前气候背景下陆–气间相互作用具有重要意义<sup>[8]</sup>。监测季节冻土和多年冻土冻土的方法有: (1) 传统方法, 主要包括判读解译各种地质图、航空像片及钻孔数据等<sup>[9]</sup>, 并根据与冻土有关的区域特征进行外推<sup>[10]</sup>; (2) 地球物理方法, 主要是根据冻土在物理性质上表现出的

高电阻率和高波速等特征, 对冻土进行试验性研究, 如探地雷达等<sup>[11–12]</sup>; (3) 数值模拟方法<sup>[7, 13]</sup>, 即利用物理模型计算土壤温度, 通过温度直接判定地表土壤冻融状态; (4) 遥感手段<sup>[14–16]</sup>, 例如利用卫星遥感技术进行多年冻土分布制图。传统方法和地球物理方法虽然能够在点尺度上较为准确地描述近地表土壤冻融循环过程, 并为其他方法的验证提供真实的地表信息, 但是并不能适用于大尺度规模研究和长时间序列趋势研究, 尤其在交通不便的山区和偏远地区, 观测点稀疏或几乎没有。数值模拟方法则由于可靠的驱动资料(如雪的分布和土壤条件)相对有限, 其应用仍然面临着挑战。遥感技术探测范围大, 获取资料的速度快、周期短, 并且受大

收稿日期: 2020-08-21; 修订日期: 2020-11-12

基金项目: 中国科学院 A 类先导科技专项(XDA20100103; XDA20100313)资助

作者简介: 邵婉婉, 博士研究生, 主要从事冻土研究. E-mail: shaoww09@lzu.edu.cn

通信作者: 张廷军, 教授, 主要从事冰冻圈与气候变化研究. E-mail: tjzhang@lzu.edu.cn

气影响和地面条件限制少,已经被成功地应用于区域尺度和全球尺度的近地表土壤冻融循环研究中。卫星遥感技术的发展,尤其是全天候全天时监测能力的微波遥感技术的发展,为同步监测大范围环境的近地表土壤的冻融状态提供了高技术、高精度的有效手段<sup>[17]</sup>。

土壤冻融过程实际就是土壤水的相变过程,而水和冰介电特性差异较大,导致冻土和融土的辐射亮温也存在显著差异<sup>[18]</sup>。监测近地表土壤冻融状态的亮温数据主要来自于美国的 SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer, 1978—1987 年)、SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) 及 SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder, 1987 年至今) 等传感器,形成了一套不同分辨率多源时空连续(1978 年至今)的被动微波亮温产品,为气候变化背景下冻土的时间变化规律和空间分布特征提供了连续的观测数据<sup>[18]</sup>。利用被动微波卫星遥感亮温监测近地表土壤冻融状态大致经历了理论基础和算法的研制、算法的验证和应用以及建立数据集三个主要过程<sup>[19]</sup>,为近地表土壤冻融研究奠定了良好的开始和基础。

常用的算法主要有双指标算法<sup>[20-22]</sup>及其演变而来的单指标算法<sup>[15]</sup>、时间序列变化检测算法<sup>[23]</sup>、决策树算法<sup>[24-25]</sup>和判别式算法<sup>[26-27]</sup>,并由此发布了一系列基于不同目的及训练样本数据的近地表土壤冻融数据集。根据 Jin 等<sup>[28]</sup>的研究,结合覆盖不同地表类型的 273 个中国气象台站资料验证后,双指标算法的冻结分类精度、融化分类精度和总分类精度均超过 80%,总分类精度最高可以达到 89.9%。决策树算法基于 3 个指标:散射指数 (Scatter Index, SI)、37 GHz 垂直极化亮温,以及 19 GHz 水平极化和垂直极化 (Polarization Difference, PD) 的亮温差实现对地表土壤冻融状态的判别,并利用国际协同加强观测期 (CEOP) 在青藏高原地区的土壤温度和湿度观测系统获取的 4 cm 地温数据代表浅层土壤真实冻融状态验证分类结果,其分类精度达 87%<sup>[24-25]</sup>。Kim 等<sup>[15]</sup>简化了双指标算法,只选取了 37 GHz 垂直极化通道亮温作为判别依据,并利用模型模拟的气温数据进行验证,结果表明上午过境和下午过境的年平均分类精度分别为 84.3% 和 90.3%。

然而,这些算法的验证和产品都是针对不同研究区域、不同时间段进行的,用来验证的实地观测

资料也不一致。虽然每个算法都有很高的精度,但验证使用的原始实地资料无法获得进行重复统一验证。到目前为止,还没有针对这些数据集产品的统一验证和对比分析,导致不同算法数据集之间的精度不具备可比性,对近地表冻融数据的直接应用存在一定的限制和很大不确定性。

本研究的主要目的是利用中国大陆气象台站实测地表 0 cm 土壤温度资料,对比基于双指标算法、决策树算法、单指标算法和判别式算法建立的近地表土壤冻融数据集产品,分析利用被动微波卫星遥感亮温监测近地表土壤冻融状态的误差及主要来源。由于基于判别式算法<sup>[26]</sup>建立的全球近地表土壤冻融状态数据集的空间分辨率为 0.25°,且其时间序列相对较短(2002—2014 年),逐年数据完整度通常不到 60%,严重影响各冻融指标的统计结果,因此在产品对比分析中将不再考虑。

## 1 数据与产品精度评价指标

### 1.1 近地表土壤冻融状态数据集

本研究选取了三套近地表土壤冻融状态数据集,分别为来自中国国家青藏高原科学数据中心发布的中国长时间序列地表冻融数据集——双指标算法(1978—2015 年)<sup>[29]</sup>、中国长时间序列地表冻融数据集——决策树算法(1987—2009 年)<sup>[30]</sup>,以及来自美国冰雪数据中心发布的单指标算法逐日地表冻融状态数据集(1979—2017 年,版本 4)<sup>[31]</sup>,各数据集的基本信息见表 1。

双指标算法数据集采用 SMMR (1978—1987 年) 和 SSM/I (1987—2009 年) 逐日亮温数据,由 37 GHz 垂直极化亮温和 37 GHz 和 19 GHz 垂直极化亮温梯度两个指标将地表分类为冻结地表、融化地表、沙漠和水体四种类型<sup>[24-25]</sup>。

基于双指标算法的理论基础,通过样本统计分析以及先验知识,晋锐等<sup>[24-25]</sup>发展了适用于业务化运行的地表冻融状态决策树算法。采用的数据包括 SSM/I 的 19 GHz 垂直极化亮温、22 GHz 的水平和垂直极化亮温、37 GHz 垂直极化亮温以及 85 GHz 垂直极化亮温,并在国家青藏高原科学数据中心发布了 1987—2009 年中国地表冻融状态数据集。由于 85 GHz 亮温的缺失,1989—1991 年没有分类结果。

由于冰的发射率大于水的发射率,土壤发射率会随着土壤冻结逐渐增加,但这种现象在微波频率

表1 各算法地表土壤冻融状态数据集基本信息

Table 1 Essential information of the near-surface soil freeze/thaw status simulated with the single index algorithm, double index algorithm and decision tree algorithm

算法	时间序列	空间范围	分辨率	输入数据	分类结果	参考文献
双指标算法	1978—2015年	中国	25 km	SMMR: Tb18V、Tb36V SSM/I: Tb19V、Tb37V	冻结、融化、沙漠、水体	Jin 等 <sup>[28]</sup> , 2015
决策树算法	1987—2009年	中国	25 km	SSM/I: Tb19V、Tb22H、Tb22V、Tb37V、Tb85V SMMR: Tb37V	冻结、融化、沙漠、水体	Jin 等 <sup>[25]</sup> , 2009
单指标算法	1979—2017年	全球	25 km	SSM/I: Tb37V SSMIS: Tb37V	冻结、融化	Kim 等 <sup>[15]</sup> , 2017

较高时逐渐消失。据此 Kim 等<sup>[15]</sup>提出了单指标算法, 仅采用 37 GHz 垂直极化通道的亮温, 结合再分析资料 ERA-Interim 中的气温, 统计地表土壤冻融边界时 37 GHz 垂直极化亮温的阈值, 最终建立了 1978—2017 年全球逐日地表冻融状态数据集。

## 1.2 中国气象站地表温度资料

该数据来源于国家气象科学数据中心所提供的“中国地面气候资料日值数据集”, 共计 756 个基本、基准地面气象观测站及自动站从 1951 年到现在的逐日数据集, 涵盖了气温、气压、降水量、风速风向等 20 个要素。这些气象站均匀分布在中国大陆, 但在南方部分地区近地表土壤几乎没有冻融过程, 为了减少统计量, 最终剔除了年平均冻结概率小于 10% 的站点。本研究中近地表土壤冻融状态数据集采用的亮温数据均来自午夜或凌晨过境卫星, 避免了湿雪的影响; 并且地表最低温度是标定冻融边界 37 GHz 垂直极化亮温阈值的最优指标<sup>[28]</sup>。经过质量控制及筛选, 本研究最终以 1987—2008 年 435 个气象站逐日地表 0 cm 最低温度作为验证资料, 对比分析近地表土壤冻融产品的判别结果。地表温度是采用水银球(水银球直径大约 3 mm)温度计测量的, 温度计的传感器通常一半掩埋在地下, 另一半暴露在空气中, 但在有积雪覆盖时, 所测温度为积雪表面温度, 而不是地表温度。因此在有积雪覆盖时, 假设近地表土壤为冻结状态。日最低温度是通过最低温度表测量的<sup>[32-33]</sup>。

## 1.3 产品精度评价指标

本研究统计了每个逐年冻结首日、冻结终日和冻结天数, 并以中国气象站同时期的 0 cm 土壤温度作为地表真实冻融状态进行验证。当气象站实测地表土壤温度小于 0℃, 表示地表处于冻结状态; 反之地表处于融化状态。在计算冻结首日和冻结终日时统一采用儒略日, 即每年第 182 天至次年 181 天为一个冻融周期(即每年 7 月 1 日到次年 6 月 30

日, 以每年 365 天为例)。由于各数据集时间序列不同, 但都有共同交集(表 1), 最终选取了 1987—2008 年为研究期, 并以同年份站点资料的判别结果作为统一标准, 方便产品之间的对比分析。最终统计了所有气象台站 1987—2008 年冻结首日、冻结终日和冻结天数的偏差(Bias)和均方根误差(RMSE), 计算方式如下:

$$\text{Bias} = \frac{1}{n} \sum [PM(i, s) - Obs(i, s)] \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \frac{1}{n} \sum [PM(i, s) - Obs(i, s)]^2 \quad (2)$$

式中:  $PM(i, s)$  代表基于近地表土壤冻融状态数据集统计的第  $s$  个站点第  $i$  年的冻结指标(冻结首日、冻结终日或冻结天数);  $Obs(i, s)$  代表基于气象台站观测资料统计的第  $s$  个站点第  $i$  年的冻结指标;  $n$  代表所有站点所有年份的观测次数。

## 2 结果与分析

### 2.1 地表冻融变化趋势

根据气象台站观测资料的统计结果[图 1(a), 1(e), 1(i)], 1987—2008 年平均冻结首日呈推迟趋势, 推迟速率约为  $0.66 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ , 中国大陆冻结首日平均推迟 14.5 天; 平均冻结终日则以  $0.68 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$  的速率提前, 平均提前 15 天, 冻结期(冻结首日和冻结终日之间的时间)缩短了近一个月。同时, 平均冻结天数逐渐减少, 减少速率为  $1.00 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ , 平均减少了 22 天。平均冻结期的缩短时间与平均冻结天数的减少基本上是一致的。

三套被动微波卫星遥感近地表土壤冻融状态数据集的统计结果和地面观测呈相同的变化趋势, 但单指标算法数据集的变化速率整体较小, 而双指标算法数据集冻结首日、冻结终日和冻结天数的变化速率均大于观测结果。决策树算法数据集则由于 1989—1991 年 85 GHz 亮温数据缺失, 其统计结果虽然整体变化趋势与观测结果一致, 但其显著性



检验的结果为 $P < 0.1$ 。综上所述,1987—2008年三套被动微波卫星遥感近地表土壤冻融状态数据集和气象台站资料统计的平均冻结首日、平均冻结终

日和平均冻结天数的变化趋势均呈现近地表土壤冻结首日推迟,冻结终日提前,冻结天数减少等特点(图1)。

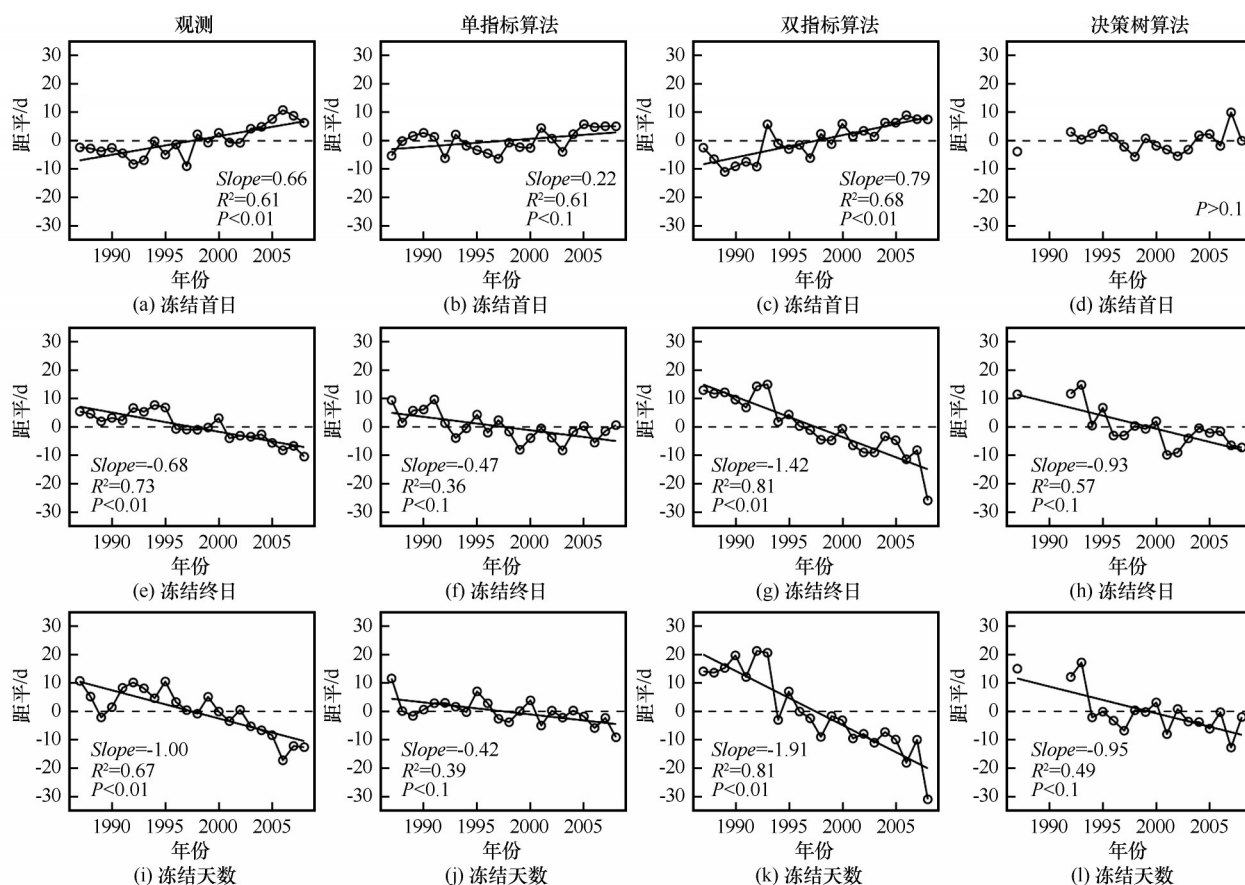


图1 1987—2008年平均冻结首日、平均冻结终日和平均冻结天数平均变化趋势

Fig. 1 Annual variations of the average onset (a, b, c, d) and offset of soil frozen (e, f, g, h) and the number of frozen days (i, j, k, l) for near-surface soil measured (a, e, i), simulated with single index algorithm (b, f, j), simulated with double index algorithm (c, g, k) and simulated with decision tree algorithm (d, h, l) across China, 1987—2008

气象站点观测资料和卫星遥感算法输出都展示了近地表土壤冻结指标1987—2008年在空间上较大的变化率特征(图2)。由于三套被动微波卫星遥感近地表土壤冻融数据集在1987—2008年存在不同程度的数据缺失,因此此处仅统计数据集时间序列超过10年的站点,最终保留了337个气象台站的统计结果。根据气象台站观测资料的统计结果及空间分布,几乎所有气象站的冻结首日、冻结终日和冻结天数的变化趋势基本一致,其中321个气象站冻结首日变化率大于0,即冻结首日推迟,平均速率为 $1.00 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ ;325个气象站冻结终日变化率小于0,即冻结终日提前,提前速率为 $-0.92 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ ;335个气象站冻结天数变化率小于0,即冻结天数减少,变化率为 $-1.67 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ ,并且在这些站点中大约50%站点的变化率通过了显著性

检验( $P < 0.05$ )。

近地表土壤冻融状态数据集产品在各气象站变化率差异较大,站点之间冻融时间变化趋势不一致,例如华中平原东部及青藏高原东部地区,近地表土壤冻结天数反而增加。据统计,单指标算法数据集冻结首日、冻结终日和冻结天数的平均变化率分别为 $0.51 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $-0.02 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $-0.49 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ ;双指标算法数据集冻结首日、冻结终日和冻结天数的平均变化率分别为 $0.84 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $-1.48 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $-2.20 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ ;决策树算法数据集冻结首日、冻结终日和冻结天数的平均变化率分别为 $0.20 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $-1.05 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $-1.10 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

## 2.2 冻结首日、终日和冻结天数精度评价

统计结果表明(表2),气象站点资料展示中国大陆从1987—2008年所有气象台站平均冻结首日

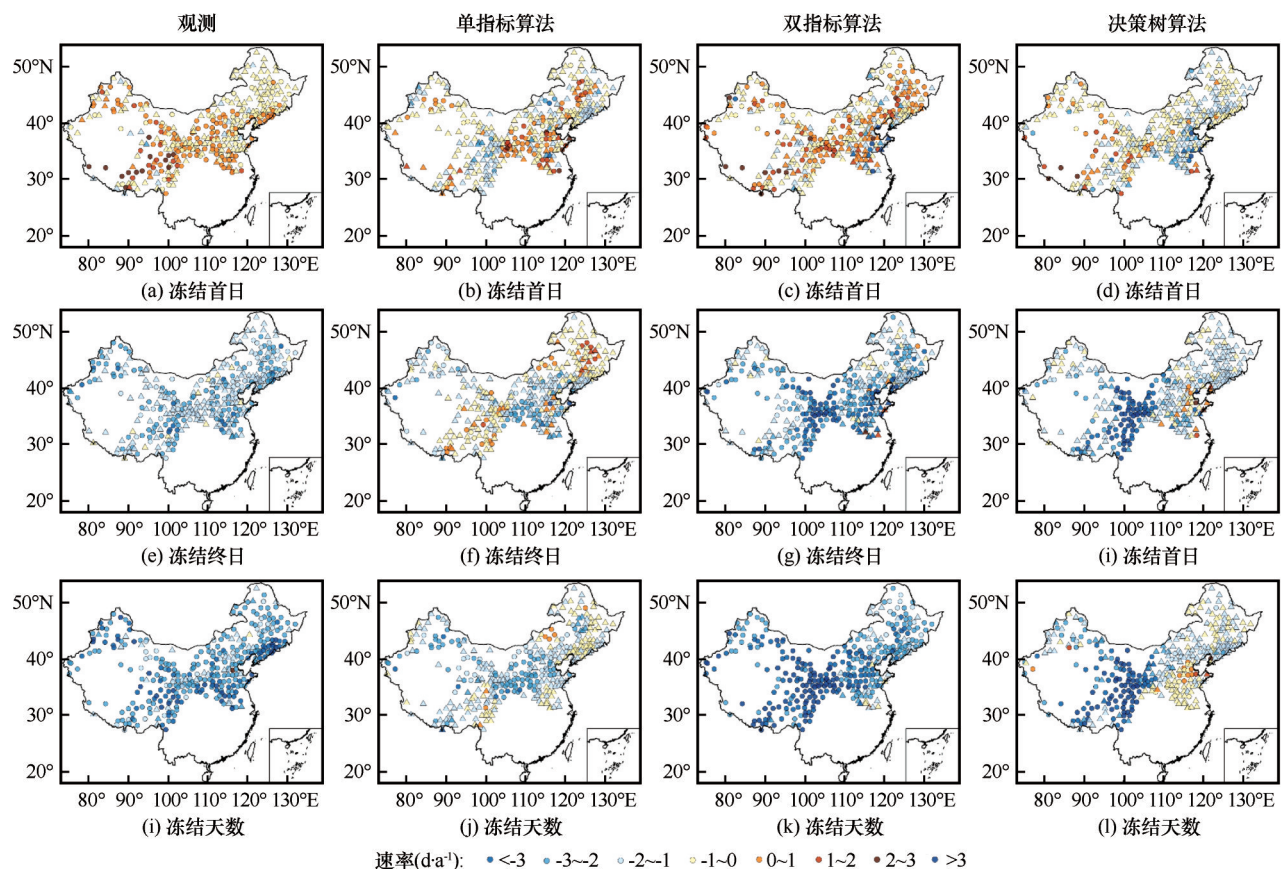


图2 1987—2008年气象台站冻结首日、冻结终日和冻结天数变化率(圆形代表 $P<0.05$ ,三角形代表 $P\geq0.05$ )

Fig. 2 Distributions of annual changing rates of the onset (a, b, c, d) and offset (e, f, g, h) and the number of frozen days (i, j, k, l) for near-surface soil measured (a, e, i), simulated with single index algorithm (b, f, j), simulated with double index algorithm (c, g, k) and simulated with decision tree algorithm (d, h, l) for stations across China, 1987—2008 (circle:  $P<0.05$ ; triangle:  $P\geq0.05$ )

表2 近地表土壤冻融状态数据集冻结首日、冻结终日和冻结天数平均值、偏差及均方根误差

Table 2 Bias and RMSE of the onset and offset of soil frozen and the number of frozen days for near-surface soil measured, simulated with single index algorithm, double index algorithm and decision tree algorithm

产品	冻结首日			冻结终日			冻结天数		
	平均值	Bias	RMSE	平均值	Bias	RMSE	平均值	Bias	RMSE
站点资料	10月19日	—	—	4月17日	—	—	136.1	—	—
单指标算法	10月19日	-1.1	31.4	4月15日	-2.3	29.5	128.8	-9.0	30.8
双指标算法	10月03日	-10.6	39.3	4月25日	1.4	35.1	167.8	18.6	48.9
决策树算法	11月09日	29.1	47.4	3月30日	-26.6	44.7	114.5	-41.1	61.7

注：Bias、RMSE为被动微波遥感算法冻结指标相对于站点资料的统计结果，其中正值代表相对于站点资料，近地表土壤冻结首日（终日）推迟，负值代表冻结首日（终日）提前。

大约在10月19日,平均冻结终日为4月17日,平均冻结天数约为136天;从中国大陆435个常规气象站的观测资料分析,平均冻结期(平均冻结首日与平均冻结终日之间的时间)为181天,即6个月,而平均冻结天数为136天,平均冻结期和平均冻结天数相差45天,这是因为在冻结首日和冻结终日之间,近地表土壤冻结状态不是连续的。由于受天气

冷热的波动,近地表土壤也经历了相应的冻融变化。另外,平均冻结期长达半年,这主要是由于本研究选取的气象站点均为分布在经历冻融循环的偏北的区域,而南方不冻结的地区没有气象台站被选择。因此本文中的冻结期只代表经历冻融循环过程地区的观测站点平均冻结期,不能代表中国大陆的平均冻结期。



利用气象站点资料同卫星遥感算法输出结果比较,差异较大。单指标算法数据集的判别结果与站点资料最接近,平均冻结首日提前大约1天,平均冻结终日提前大约2天,平均冻结天数少了9天;但两者的RMSE则高达30天左右。根据双指标算法数据集的统计结果,整体高估了近地表土壤冻结,主要表现为平均冻结首日提早11天左右,平均冻结终日推迟了1天左右,冻结天数多19天左右,两者的RMSE相差在35~49天。决策树算法数据集的平均冻结首日和冻结终日分别推迟29天和提前27天,平均冻结天数少了大约41天,两者的RMSE相差在45~62天,说明决策树算法严重低估了地表冻结。

根据三套近地表土壤冻融状态数据集和气象台站资料统计的站点结果(图3),单指标算法冻结首日、冻结终日和冻结天数的偏差均相对较小,约有56%的站点冻结首日的偏差为正值,即超过一半的站点近地表土壤冻结首日晚于气象台站的观测结果。整体而言大约26%的站点的偏差在 $\pm 10$ 天以内,但冻结天数的偏差仍较大,大约有25%的站点的冻结天数偏差在 $\pm 30$ 天以上。东部沿海地区,冻结首日和冻结终日偏差最大,因为水体冻结后发射率增幅较大,亮温反而增加,呈现与其他地表覆盖类型相反的变化特征。决策树算法数据集冻结首日、冻结终日和冻结天数的偏差整体上都较大,主

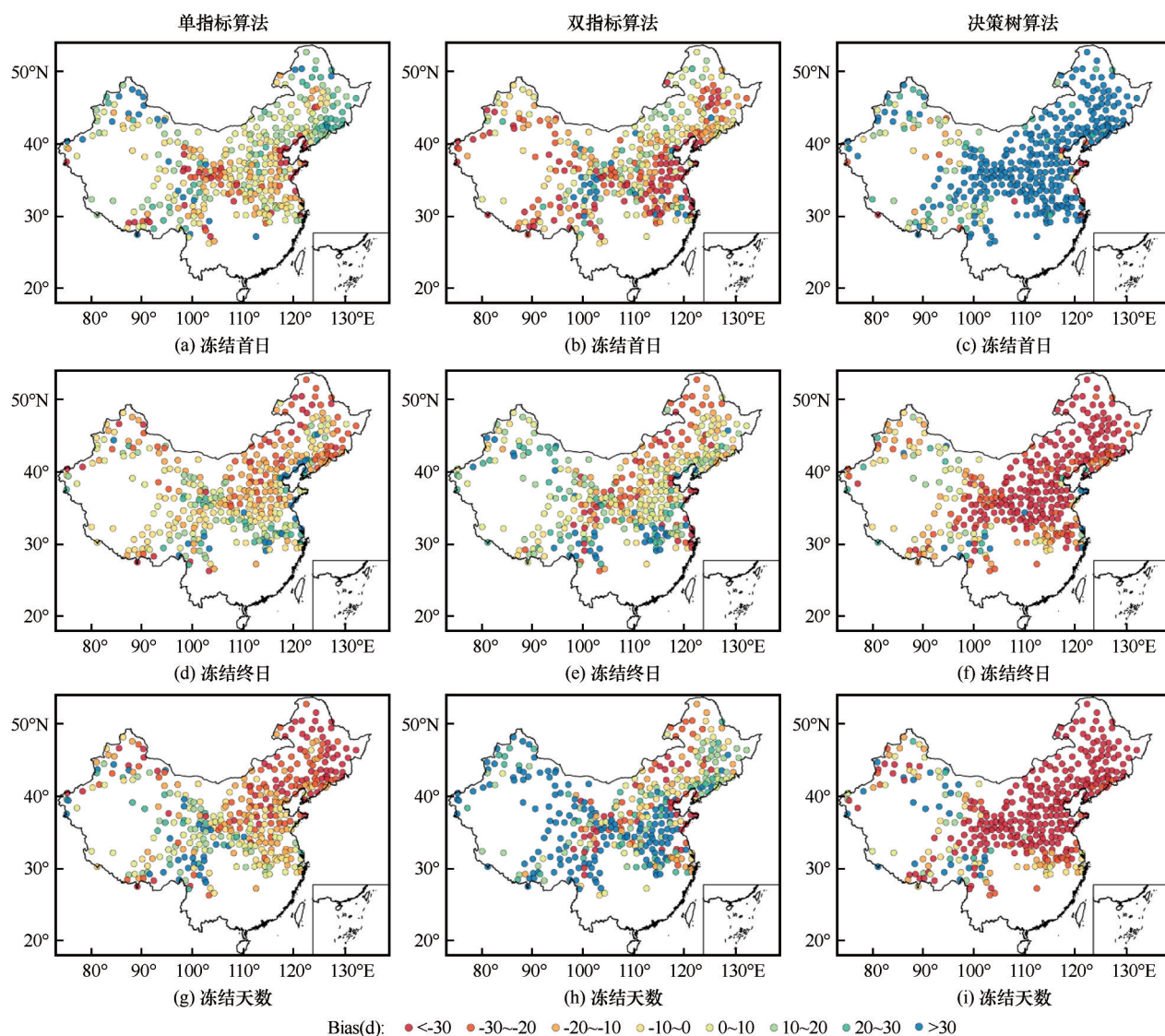


图3 近地表土壤冻融状态数据集与气象台站资料冻结指标偏差(Bias)

Fig. 3 Distributions of the Bias between the measured and the simulated onset (a, b, c), offset (d, e, f) and the number of frozen days (g, h, i) for near-surface soil with single index algorithm (a, d, g), with double index algorithm (b, e, h) and with decision tree algorithm (c, f, i) for stations across China

要表现为相比较于气象台站观测资料的统计结果, 超过 60% 的站点的冻结首日推迟了 30 天以上, 冻结终日提前了 30 天以上, 冻结天数减少了 30 天以上, 但在青藏高原地区, 冻结首日和冻结终日的偏差相比其他地区明显偏低, 主要原因是决策树算法的 37 GHz 亮温阈值节点是通过青藏高原地区的站点 4 cm 土壤温度定标得到的, 而青藏高原地区年均温较低, 导致决策树算法整体上低估了近地表土壤冻结。另外, 三套近地表土壤冻融状态数据集的统计结果均表明, 在东北地区 and 沿海地区, 近地表土壤冻融时间的判别结果相对较差, 整体而言利用被动微波卫星遥感亮温监测近地表土壤冻融状态的算

法普遍低估了土壤的冻结状态。

本研究进一步统计了 1987—2008 年近地表土壤冻融状态数据集与气象台站观测资料的冻结首日、冻结终日 and 冻结天数的 RMSE (图 4), 结果表明单指标算法和双指标算法数据集各气象站的 RMSE 空间分布相似, 冻结首日和冻结终日的 RMSE 基本一致, 但单指标算法冻结终日的 RMSE 整体较小, 大约 17% 的气象站的 RMSE 小于 15 天, 只有不到 3% 的站点的 RMSE 超过 60 天; 而双指标算法则只有 9% 的气象站的 RMSE 小于 15 天, 20% 的气象站的 RMSE 超过了 60 天。而决策树算法数据集的 RMSE 普遍较大, 分别有 13%、10%、45% 的气象站

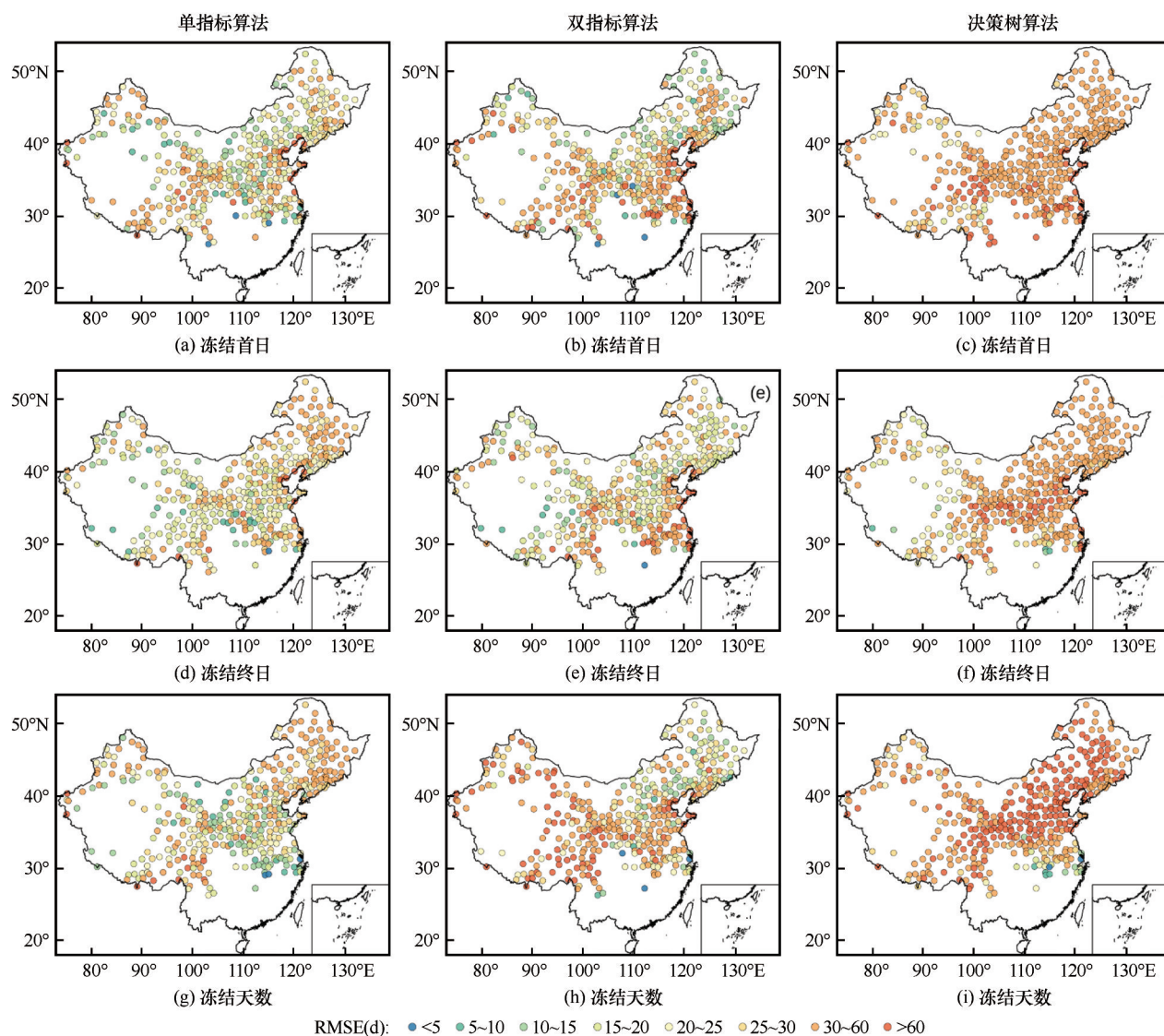


图 4 近地表土壤冻融状态数据集与气象台站资料冻结指标均方根误差

Fig. 4 Distributions of the RMSE between the measured and the simulated onset (a, b, c), offset (d, e, f) and the number of frozen days (g, h, i) for near-surface soil with single index algorithm (a, d, g), with double index algorithm (b, e, h) and with decision tree algorithm (c, f, i) for stations across China



的冻结首日、冻结终日和冻结天数的 RMSE 超过 60 天。单指标算法数据集冻结指标的 RMSE 超过 30 天的站点一般分布在中国东北和青藏高原东部地区,该地区年均温较低,近地表土壤冻结状态持续时间一般较长,另外东部沿海地区有较少的站点的 RMSE 超过 60 天;双指标算法 RMSE 超过 30 天的站点主要分布在低纬度地区。低纬度地区年均温较高,冻结持续时间一般较短,但 RMSE 反而最大,说明双指标算法较暖地区分类结果较差。

### 3 讨论

#### 3.1 地表冻融分类误差

虽然利用被动微波卫星遥感亮温结合冻融算法能够监测近地表土壤的冻融状态,并且其分类精度达到了 80% 以上<sup>[15,21,24-25]</sup>,但在长时间序列近地表土壤冻融状态研究中,该方法无法准确获取冻融过渡期近地表土壤的冻融状态。在冻融过渡期较长、气候变化缓慢、土壤含水量较多的地区,土壤中水分相变过程相对缓慢,浅层土壤中的水(冰)无法快速完全冻结(融化),长时间保持在 0℃ 左右,土壤处于由融化(冻结)向冻结(融化)过渡的阶段,无法仅用冻结或融化描述该状态。另外,在气温日变化较大地区,浅层土壤可能在一天内出现反复冻融的现象,而被动微波卫星遥感亮温仅能反映卫星过境时刻地表的辐射特征,容易导致误分。

#### 3.2 不同近地表土壤冻融状态数据集精度差异

近年来关于利用被动微波卫星遥感监测地表冻融主要集中于算法的研制和参数调整,并且在参数调整和算法验证过程中所采用的资料各不相同,虽然其整体验证精度很高,但由于研究目的、研究时期和研究区域不同,近地表土壤冻融状态数据集之间差异较大。判别式算法数据集由于空间分辨率较粗(0.25°),且时间序列较短,极大地限制了其实际应用。本研究基于相同的气象台站观测资料,对比了三种近地表土壤冻融状态数据集在 1987—2008 年对近地表土壤冻融时间的判别能力。结果表明单指标算法数据集与气象台站观测资料的统计结果更加接近,而决策树算法数据集的偏差和均方根误差最大。主要原因是单指标算法是以再分析资料 ERA-Interim 中的气温为基础数据,标定各地表像元逐年冻结边界阈值,避免了在长时间序列研究中使用单一阈值。决策树算法则是以青藏高原多年冻土区、季节冻土区和河流融区的 3 个站点

的 4 cm 土壤温度为基础数据确定 37 GHz 垂直极化亮温的阈值 252 K。曹梅盛等<sup>[34]</sup>利用青海高原地区 1983 年 SMMR 亮温资料结合 5 cm 土壤温度,最终确定了 37 GHz 水平极化亮温阈值为 222.5 K; Zhang 等<sup>[21]</sup>在识别美国无雪地表土壤冻融时,则选取了 258.2 K 作为 37 GHz 垂直极化亮温冻结边界的阈值; Han 等<sup>[35]</sup>关于中国北部和蒙古国地表冻融的研究中,分别以 258.2 K 和 260.1 K 作为上午过境和下午过境时 37 GHz 垂直极化亮温冻结边界阈值。由此可见在不同区域、不同时间利用 37 GHz 亮温冻结边界的阈值作为判别地表冻融状态的指标时,需要根据地表状况进行重新标定,避免使用单一阈值。

虽然决策树算法数据集的统计结果误差较大,但其各项冻结指标的变化趋势与气象台站观测资料的结果基本一致,并且已经有研究表明了决策树算法中 37 GHz 阈值对地表土壤冻融分类精度的影响显著<sup>[36]</sup>。因此在使用决策树算法判别地表土壤冻融时,尽量选取不同土地类型的观测资料,调整各节点阈值,将大大提高分类精度。

#### 3.3 本研究潜在误差

本研究在进行近地表土壤冻融数据集之间的对比分析时,由于观测资料匮乏,最终选取了地表 0 cm 逐日最低温度作为标准状态。但实际上微波对浅层土壤具有一定穿透力,因此亮温和地温并不来自同一深度,这也是本研究中近地表土壤冻融状态数据集低估土壤冻结的原因之一。为了优化近地表土壤冻融算法参数,提高被动微波遥感识别土壤冻融状态的分类精度,亟需大规模的同步地面观测资料。

### 4 结论

本研究选取目前常用被动微波遥感近地表土壤冻融算法数据集产品,以气象台站实测资料为参考,系统对比了各产品对近地表土壤冻融状态的判别能力,为近地表土壤冻融状态数据集的直接应用提供了可靠的数据基础。主要结论如下:

(1) 利用被动微波遥感亮温数据,结合近地表土壤温度或气温数据,建立和验证近地表土壤冻融算法能较好的探测近地表土壤冻融状态,特别是其数据的连续性(1978 年至今)及空间范围(全球覆盖),同时全天候工作等特点,使得利用被动微波卫星遥感探测近地表土壤冻融状态研究有了长足的进



展。然而,目前的近地表土壤冻融被动微波遥感算法还是经验性的或半经验性的,其输出验证也有很大的局限性和不确定性。本研究表明,利用基于被动微波卫星遥感数据建立的近地表土壤冻融状态数据产品来研究区域或全球尺度的近地表土壤冻融长时间序列变化,需要引起特别关注。利用已有的冻融数据集可能会产生完全不同的,甚至错误的结论,因为被动微波卫星遥感近地表土壤冻融产品与实际观测数据的偏差或均方根误差可达30天以上,大于变化趋势的标准离差,使其可靠性大幅度下降。

(2)选取37 GHz亮温阈值对判别地表土壤冻融状态的影响至关重要。以往的研究在不同区域、不同时间选取的阈值差别很大,变化在222.5~260.1 K之间,这显示其验证的可靠性及有效性存在较大误差。

(3)站点观测资料和地表土壤冻融状态数据集产品的统计结果都表明地表土壤冻结呈现出冻结首日推迟,冻结终日提前,冻结天数减少的趋势。但是,现有被动微波冻融算法获取的变化趋势误差较大,难以反映真实情况。

(4)为了适应科研和应用需求,被动微波卫星遥感近地表土壤冻融算法需要进一步改进和验证。在现有的被动微波卫星遥感亮温的基础上,努力提高算法输出精度,探测近地表土壤冻融及其时空变化特征。

## 参考文献(References):

- [1] 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: 949-960.
- [2] Zhao T, Shi J, Hu T, et al. Estimation of high-resolution near-surface freeze/thaw state by the integration of microwave and thermal infrared remote sensing data on the Tibetan Plateau [J]. Earth and Space Science, 2017, 4: 472-484.
- [3] Guo D, Yang M, Wang H. Characteristics of land surface heat and water exchange under different soil freeze/thaw conditions over the central Tibetan Plateau [J]. Hydrological Processes, 2011, 25(16): 2531-2541.
- [4] Jiang Jinghai, Wang Chenghai. Study on the relationship between seasonal freezing-thawing areas and summer precipitation in the Northern Hemisphere [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 53-61. [蒋靖海, 王澄海. 北半球季节性冻融区与北半球夏季降水关系的研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 53-61.]
- [5] Michelsen A, Larsen K S, Jonasson S. Repeated freeze/thaw cycles and their effects on biological processes in two arctic ecosystem types [J]. Applied Soil Ecology, 2002, 21(3): 187-195.
- [6] Schimel J P, Clein J S. Microbial response to freeze-thaw cycles in tundra and taiga soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(8): 1061-1066.
- [7] Freppaz M, Williams B L, Edwards A C, et al. Simulating soil freeze/thaw cycles typical of winter alpine conditions: implications for N and P availability [J]. Applied Soil Ecology, 2007, 35(1): 247-255.
- [8] Yang Shuhua, Li Ren, Wu Tonghua, et al. The variation characteristics of different freeze-thaw status in the near surface and the relationship with temperature over the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(6): 1377-1387. [杨淑华, 李韧, 吴通华, 等. 青藏高原近地表土壤不同冻融状态的变化特征及其与气候的关系[J]. 冰川冻土, 2019, 41(6): 1377-1387.]
- [9] Peng X, Frauenfeld O W, Cao B, et al. Response of changes in seasonal soil freeze/thaw state to climate change from 1950 to 2010 across China [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2016, 121: 1984-2000.
- [10] Boeckli L, Brenning A, Gruber S, et al. A statistical approach to modelling permafrost distribution in the European Alps or similar mountain ranges [J]. The Cryosphere, 2012, 6(1): 125-140.
- [11] Cao B, Gruber S, Zhang T, et al. Spatial variability of active layer thickness detected by ground-penetrating radar in the Qilian Mountains, Western China [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2017, 122: 574-591.
- [12] Ma Y, Zhang Y, Zubrzycki S, et al. Hillslope-scale variability in seasonal frost depth and soil water content investigated by GPR on the southern margin of the sporadic permafrost zone on the Tibetan Plateau [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2015, 26(4): 321-334.
- [13] Guo D, Yang M, Wang H. Characteristics of land surface heat and water exchange under different soil freeze/thaw conditions over the central Tibetan Plateau [J]. Hydrological processes, 2011, 15(16): 2531-2541.
- [14] Bartsch A, Kidd R A, Wagner W, et al. Temporal and spatial variability of the beginning and end of daily spring freeze/thaw cycles derived from scatter meter data [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 106(3): 360-374.
- [15] Kim Y, Kimball J S, Glassy J, Du J. An extended global Earth system data record on daily landscape freeze-thaw status determined from satellite passive microwave remote sensing [J]. Earth System Science Data, 2017, 9(1): 133-147.
- [16] Leverington D W, Duguay C R. Evaluation of three supervised classifiers in mapping depth to late-summer frozen ground, Central Yukon Territory [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 1996, 22(2): 163-174.
- [17] Zhang T, Barry R G, Armstrong R L. Application of satellite remote sensing techniques to frozen ground studies [J]. Polar Geography, 2004, 28(3): 163-196.
- [18] Zhang Tingjun, Jin Rui, Gao Feng. Overview of the satellite remote sensing of frozen ground: visible-thermal infrared and Radar sensor [J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(9): 963-972. [张廷军, 晋锐, 高峰. 冻土遥感研究进展——可见光、红外及主动微波卫星遥感方法[J]. 地球科学进展, 2009, 24(9): 963-972.]
- [19] Zhang Tingjun, Jin Rui, Gao Feng. Overview of the satellite remote sensing of frozen ground: passive microwave sensors [J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(10): 1073-1083. [张廷军, 晋锐, 高峰. 冻土遥感研究进展——被动微波遥感[J]. 地球科学进展, 2009, 24(10): 1073-1083.]
- [20] 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 & Remote Sensing, 1997, 35(4): 827-832.
- [21] 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.
- [22] 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): 2003JD003530.
- [23] 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 D: Atmospheres, 2004, 109(D12): D12101.
- [24] Jin Rui, Li Xin, Che Tao. A decision tree algorithm for surface freeze/thaw classification using SSM/I [J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(6): 1017-1027. [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, 2008, 12(6): 1017-1027.]
- [25] 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(12): 2651-2660.
- [26] 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(11): 1704-1716.
- [27] Zhao Tianjie, Zhang Lixin, Jiang Lingmei, et al. Microwave radiation of frozen and thawed soils under complicated surface condition: simulation and discrimination analysis [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(2): 220-226. [赵天杰, 张立新, 蒋玲梅, 等. 复杂地表条件下冻融土的微波辐射特性模拟及判别分析 [J]. 冰川冻土, 2009, 31(2): 220-226.]
- [28] Jin R, Zhang T, Li X, et al. Mapping surface soil freeze-thaw cycles in China based on SMMR and SSM/I brightness temperatures from 1978 to 2008 [J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2015, 47(2): 213-229.
- [29] Jin Rui, Li Xin. Long-term surface soil freeze-thaw states dataset of China using the dual-index algorithm (1978-2015) [DS]. Beijing: National Tibetan Plateau Data Center, 2011. DOI:10.11888/Geocry. tpdc. 270029. CSTR: 18046. 11. Geocry. tpdc. 270029. [晋锐, 李新. 中国长序列地表冻融数据集——双指标算法 (1978—2015) [DS]. 北京: 国家青藏高原科学数据中心, 2011. DOI: 10.11888/Geocry. tpdc. 270029. CSTR: 18046. 11. Geocry. tpdc. 270029.]
- [30] Jin Rui, Li Xin. China long-sequence surface freeze-thaw dataset——decision tree algorithm (1987-2009) [DS]. Beijing: National Tibetan Plateau Data Center, 2012. DOI:10.11888/Geocry. tpdc. 270622. CSTR: 18046. 11. Geocry. tpdc. 270622. [李新, 晋锐. 中国长序列地表冻融数据集——决策树算法 (1987—2009) [DS]. 北京: 国家青藏高原科学数据中心, 2012. DOI: 10.11888/Geocry. tpdc. 270622. CSTR: 18046. 11. Geocry. tpdc. 270622.]
- [31] Kim Y, Kimball J, Glassy J, et al. MEaSUREs global record of daily landscape freeze/thaw status, Version4 [M]. Colorado: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2017.
- [32] Zhang T. Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: an overview [J]. Reviews of Geophysics, 2005, 43(4): RG4002.
- [33] Wang K, Zhang T, Zhong X. Changes in the timing and duration of the near-surface soil freeze/thaw status from 1956 to 2006 across China [J]. The Cryosphere, 2015, 9(3): 1321-1331.
- [34] Cao Meisheng, Zhang Tiejun. 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.]
- [35] 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 & Geoinformation, 2010, 12(5): 375-384.
- [36] Shao W, Zhang T. Assessment of four near-surface soil freeze/thaw detection algorithms based on calibrated passive microwave remote sensing data over China [J]. Earth and Space Science, 2020, 7(7): 1-19.

## Comparison and analysis of the near-surface soil freeze/thaw status datasets obtained by passive microwave remote sensing

SHAO Wanwan, ZHANG Tingjun

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The near-surface soil freeze/thaw (F/T) cycle is characterized as a toggle switch for land surface process because of its strong influence on surface energy balance, hydrological processes, vegetation dynamics, greenhouse gas exchange, and ecosystem function. In addition to the traditional observation methods, passive microwave satellite remote sensing technology has been applied to the research of the near surface soil freeze/thaw status on a global scale. The development of detecting near-surface soil F/T status algorithm has experienced three stages: algorithm development, parameterization/validation, and F/T dataset establishment. Based on different algorithms, the near-surface soil F/T status datasets were developed in different regions during different periods. This study aims to compare the classification results of 3 near-surface soil F/T status datasets established based on single-index algorithm (SIA), double index algorithm (DIA) and the decision-tree algorithm (DTA). Soil temperatures at 0 cm depth ( $T_g$ ) from 435 meteorological stations across China were used as a reference. Our preliminary results indicate that the SIA's classification results show best agreement with ground observations. DTA underestimated the near-surface soil frozen status because of utilizing the unique 37 GHz threshold of vertically polarized brightness temperature throughout the whole classification process. Datasets and ground-based measurements of the near-surface soil F/T status show that due to the global warming, the onset of soil frozen for near-surface soil delayed, while the offset of soil frozen advanced. The actual number of frozen days had been decreasing in China. This study compared the different datasets of F/T, and provided a scientific basis for the future improvement and utilization of the satellite passive microwave remote sensing data.

**Key words:** near-surface soil freeze/thaw; dual index algorithm; decision tree algorithm; soil freeze/thaw status datasets

(责任编辑: 吴晓东; 编辑: 周成林)