

引用格式: Xie Yanmei, Jin Rui, Yang Xingguo. Algorithm Development of Monitoring Daily Near Surface Freeze/Thaw Cycles Using AMSR-E Brightness Temperatures[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(2): 182-191. [谢燕梅, 晋锐, 杨兴国. AMSR-E 亮温监测中国近地表冻融循环算法研究[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(2): 182-191.]

AMSR-E 亮温监测中国近地表冻融循环算法研究

谢燕梅¹, 晋锐¹, 杨兴国²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 宁夏回族自治区气象局, 宁夏 银川 750002)

摘要:为更加精细地获取日内地表冻融循环信息,联合使用 AMSR-E 升轨(13:30)和降轨(1:30)一天两次过境的逐日亮温数据,采用双指标算法,分别判定升轨和降轨过境时刻的地表冻融状态,综合两次过境信息将地表细分为日内完全冻结、日内完全融化、日内冻融循环和日内逆向冻融循环 4 种类型。经过验证,日内完全冻结地表分类精度达 90%,日内完全融化地表和日内冻融循环地表分类精度约为 70%。在日内地表冻融循环分类基础上,将年冻融循环周期划分为稳定冻结期、稳定融化期、春季冻融过渡期和秋季冻融过渡期。根据 2004 年分类结果得出,1 月份,日内完全冻结地表和日内完全融化地表大体以秦岭淮河为界,随着温度逐渐升高,日内完全冻结地表南界、日内完全融化地表北界和日内冻融循环地表的南北界从东南向西北移动,温度降低,各边界线从西北向东南移动;稳定冻结期主要出现在 1 月和 2 月,稳定融化期出现在 7 月和 8 月,春季冻融过渡期是 3~5 月,秋季冻融过渡期是 9~11 月。

关键词: AMSR-E; 亮温; 日内冻融循环; 地表冻融状态

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2013)02-0182-10

1 引言

近地表冻融循环是全球气候变化的重要指示器^[1]。它与多年冻土和季节冻土的时空分布及其水热动态、陆面/水文过程和生态系统之间关系密切^[2]。在全球变暖大背景下,地表冻结起始时间推迟,融化起始时间提前,导致全球范围冻土面积不同程度退化和萎缩,植被生长季延长。地表的冻结、融化状态对地气能量交换、地表径流、作物生长和碳循环等均具有重要的影响^[3-6],多年冻土、季节冻土和短时冻土范围分别占中国国土面积的 17.42%、56.88% 和 18.25%^[7],研究中国近地表冻融循环更具实际意义。

卫星遥感为连续监测大陆和区域尺度近地表冻融循环提供了有效技术手段。其中,热红外遥感受天

气条件和云层影响严重,而微波遥感对大气中水汽和气溶胶的穿透性较强,因此微波手段被予以更多的关注。在微波频段,液态水与其他自然界物质的复介电常数差别显著,因此微波信号对土壤中液态水的变化极为敏感。随着气温降低,土壤中大部分液态水会转化为固态冰,引起近地表土壤发生冻融循环,土壤介电常数实部和虚部均明显降低。介电常数的变化使得地表亮温和后向散射系数发生变化,得以实现对地表冻融的监测。主动微波遥感(雷达和散射计)和被动微波辐射计被广泛应用于地表冻融监测^[3,5,8-12]、春季近地表融化监测^[13-15]和植被生长季研究^[16-17]。

常用的被动微波遥感判别近地表冻融状态算法主要有 3 类:双指标算法^[3,5,11-12,18]、时间序列变化检测算法^[10]和决策树算法^[8],这些算法本质上均是依

收稿日期:2012-06-15;修订日期:2013-01-09

基金项目:国家自然科学基金项目(41071226),863 计划地球观测与导航技术领域“星地综合定量遥感系统与应用示范(一期)”项目“遥感产品真实性检验关键技术及其实验验证”课题(2012AA12A305),中国科学院青年创新促进会。

作者简介:谢燕梅(1985-),女,山东济宁人,硕士研究生,主要从事冰冻圈遥感和地理信息系统研究。E-mail:xiyanmei001@126.com。

通讯作者:晋锐(1979-),女,山西临汾人,副研究员,主要从事冰冻圈遥感、微波遥感、陆面数据同化和无线传感器网络研究。

E-mail:jnrui@lzb.ac.cn。

据冻土微波辐射特性提出的,即随温度的降低,土壤冻结,土壤介电常数实部降低,导致反射率减小,发射率增大。对于半无限介质,微波亮温近似为发射率与土壤有效温度的乘积。在同样降温条件下,对于含水量较少的干土,冻结时由于发射率增加很微弱,亮温降低;而对于含水量较多的土壤,发射率显著增加,因此在降温冻结的初始阶段亮温有可能增加。20 世纪 90 年代最初提出并被广泛使用的双指标算法采用 37 GHz 垂直极化亮温数据和亮温谱梯度作为主要判定标准。此算法主要使用日平均空气温度^[3,11-12]和地表温度标定双指标。由于气温的间接性及地表温度数据的有限性,两者均不是卫星过境时刻的真实地表温度,因此无法准确地反映卫星过境时刻近地土壤的冻融状态;时间序列变化检测算法最初主要用于主动微波遥感,Smith 等^[9]借鉴该思路,假设冻结地表和融化地表的 37GHz 和 18/19GHz 两个频段亮温差主要由发射率引起,当地表冻结时,由于高频的体散射变暗效应较强,因此 37 GHz 与 18/19 GHz 发射率差值($e_{37V} - e_{18/19V}$)为负;当地表融化时,($e_{37V} - e_{18/19V}$)趋于 0,提出了适用于被动微波遥感的时间序列变化检测算法。然而当地表冻结时,土壤发射率与土壤热力学温度的变化趋势相反,且土壤温度变化缓慢,导致亮温信号极少发生突变,难以检测出($e_{37V} - e_{18/19V}$)的平台;决策树算法使用 SSM/I 5 个通道($T_{B_{19V}}$ 、 $T_{B_{19H}}$ 、 $T_{B_{22V}}$ 、 $T_{B_{37V}}$ 、 $T_{B_{85V}}$)亮温数据、散射指数和 19 GHz 与 37 GHz 极化差作为主要分类指标,重点关注消除其他地表散射体(如沙漠和降水)的影响,进一步提高分类精度^[8]。

现有地表冻融分类研究中,主要是根据逐日微波遥感数据将地表划分为冻结和融化状态两种类型。为尽量避免湿雪干扰,多采用凌晨或午夜“冷”时刻过境观测。但在春秋季节交替时,近地表在一天之内可能发生冻融循环,而日内的冻融循环对气候变化更为敏感^[19],现有研究往往忽略这种现象。为了充分发挥星载辐射计一天两次过境的特征,用于加密观测地表日内冻融循环,并与前期生产的 SMMR 和 SSM/I 地表冻融数据集(中国西部环境与生态科学数据中心: <http://westdc.westgis.ac.cn/>)保持一致性和连续性。本文将针对 AMSR-E 亮温观测重新标定双指标算法,综合升轨和降轨信息,将地表细分为日内完全冻结、日内完全融化、日内冻融循环和日内逆向冻融循环 4 种类型,并将年冻融循环周期划分为稳定冻结期、稳定融化期、春季冻融过渡期和秋季冻融过渡期,同时对一个冻融循

环周期内的日内地表冻融状态的时空变化和年地表冻融循环周期进行分析。

2 研究数据

本研究主要使用 AMSR-E 被动亮温数据识别地表冻融状态,气象台站观测的逐日地表温度数据对双指标算法进行阈值标定,同时采用土地利用图作为辅助数据。

2.1 被动微波亮温数据

AMSR-E 逐日亮温数据由 NSIDC (National Snow and Ice Data Center) 提供,其投影方式为 EASE-Grid (Equal Area Scalable Earth Grid),空间分辨率 25 km,一天两次过境。AMSR-E 包含 6.9、10.7、18.7、23.8、36.5 和 89.0 GHz 6 个频段,每个频段均包含垂直和水平极化的观测。本文主要使用 2002 年 7 月 1 日~2005 年 6 月 30 日连续 3 a 的 AMSR-E 18.7、23.8、36.5 和 89.0 GHz 4 个频段的升轨(北京时间 13:30)和降轨(北京时间 1:30)亮温判定近地表冻融循环。

由于辐射计不稳定和大气条件影响等造成部分数据丢失,缺失的数据为:2002 年第 211~217 天和第 256~262 天,2003 年第 304~308 天,2004 年第 324 天。

2.2 中国土地利用图

1:100 000 中国土地利用矢量图来源于 Landsat/TM 影像和中巴资源卫星影像,7 000 km 横断面共 13 300 个样点验证了土地利用图的解译精度是 92.9%^[20]。依据地表土地利用类型面积权重,将矢量土地利用图重采样为 25 km EASE-Grid 格式数据。

由于水体介电常数较大,相同条件下发射率低。水体比例较大的像元亮温辐射明显减弱,易被判定为冻结地表,影响地表冻融状态识别精度^[10,21],尤其是接近海岸和湖泊的混合像元,因此本研究中剔除水体面积比例超过 40% 的像元,不参与冻融分类,水体像元共 75 个。冬季,由于“体散射变暗”效应,沙漠的微波辐射信号和冻结地表非常相似,沙漠很可能被误分为冻结地表。本研究中依据中国土地利用图提取所有沙漠像元,同样不参与分类,沙漠像元共 864 个。

2.3 气象台站地表温度观测

本文主要使用 2002~2005 年的中国气象台站 CMA (China Meteorological Administration) 的日最高地表温度和日最低地表温度用于算法标定。日最佳地表温度使用最高/最低温度计观测。其中 28 个气

象站点地表观测数据用于算法标定,地表类型主要为农田(39.29%)、草地(28.57%)和林地(14.29%),包

含了中国主要的地表类型;其他 122 个气象站点用于算法验证,相关气象站点分布情况见图 1。

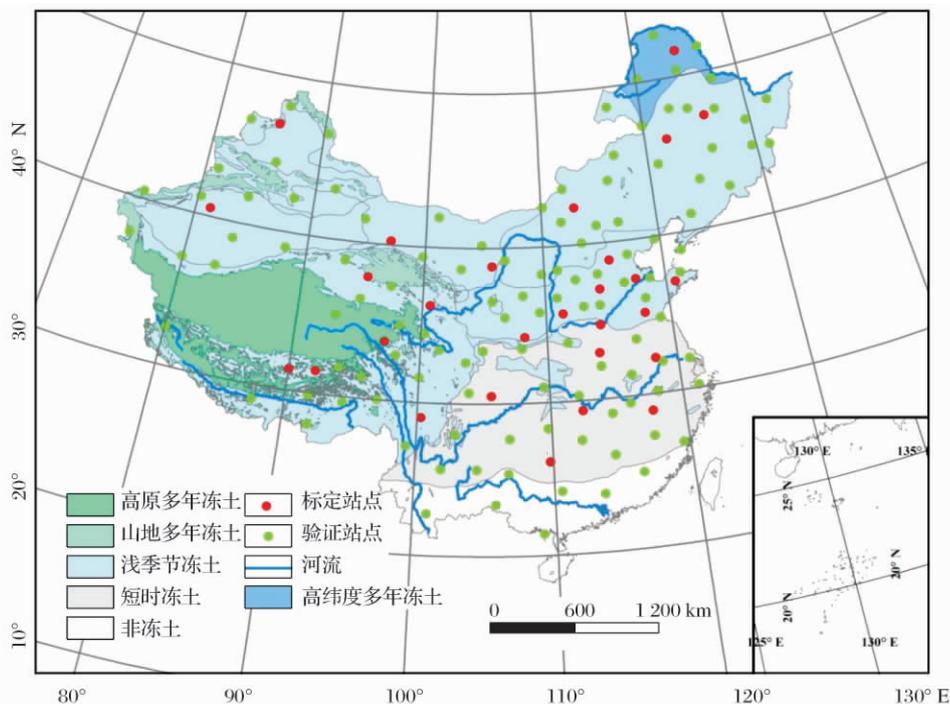


图 1 算法标定和验证气象台站分布

Fig. 1 China meteorological stations for algorithm calibration and validation

逐时地表温度数据主要来源于“全球协调加强观测计划”CEOP(Coordinated Enhanced Observing Period)。该数据主要用于分析微波辐射计过境时刻地表温度和气象站逐日地表温度之间的相关性,以利用分布较广的气象站日地表温度表示辐射计过境时刻的地表冻融状态。

3 AMSR-E 地表冻融双指标分类算法

为保持双指标算法的延续性和一致性,本文主要使用 AMSR-E 18 GHz 和 37 GHz 垂直极化亮温数据 ($T_{B_{18V}}$ 和 $T_{B_{37V}}$)。研究中使用光谱差 ($SD = T_{B_{37V}} - T_{B_{18V}}$) 取代原算法中的谱梯度^[11]。

升轨:

$$\begin{aligned} T_{B_{37V}} > T_{a_cutoff} \text{ and } SD_a > SD_{a_cutoff} & \text{ 融化土壤} \\ T_{B_{37V}} < T_{a_cutoff} \text{ or } SD_a < SD_{a_cutoff} & \text{ 冻结土壤} \end{aligned} \quad (1)$$

降轨:

$$\begin{aligned} T_{B_{37V}} < T_{d_cutoff} \text{ and } SD_d < SD_{d_cutoff} & \text{ 冻结土壤} \\ T_{B_{37V}} > T_{d_cutoff} \text{ or } SD_d > SD_{d_cutoff} & \text{ 融化土壤} \end{aligned} \quad (2)$$

T_{a_cutoff} 和 T_{d_cutoff} 分别是升轨和降轨时的亮温阈值, SD_a 和 SD_d 是升轨和降轨的光谱差值, SD_{a_cutoff} 和 SD_{d_cutoff} 是升轨和降轨的光谱差值阈值。

3.1 算法标定

选择研究区 3×3 个 AMSR-E 像元范围内土地利用类型均一的 28 个气象台站(表 1)。针对 AMSR-E 升轨和降轨亮温数据分别进行双指标算法阈值标定,得到升轨亮温阈值 (T_{a_cutoff}) 和降轨亮温阈值 (T_{d_cutoff}),根据冻结地表的“体散射变暗效应”,升轨和降轨的光谱差阈值 (SD_{a_cutoff} 和 SD_{d_cutoff}) 确定为 0。

算法标定时,由于与卫星过境时刻同步的地表温度观测比较匮乏,选取与卫星过境时刻相邻的 CEOP 逐时地表温度观测代表卫星过境时刻的地表温度及其冻融状态,建立气象台站观测的逐日地表温度与 CEOP 卫星过境时刻地表温度之间的线性拟合关系。根据此线性关系和气象台站观测数据,从标定站点中选择冻结/融化状态训练样本。

由于逐时地表温度观测数据获取的局限性,目前只能采用 CEOP 青藏高原地表温度数据。根据 CEOP 逐时观测数据统计得到日最高温度 (T_{s_max})、日最低温度 (T_{s_min}) 和日平均温度 (T_{s_ave})。AMSR-E 升轨、降轨时刻地表温度 (T_{s_d} 和 T_{s_d}) 使用卫星过境 13:00 和 14:00、1:00 和 2:00 时刻 CEOP 地表温度平均值代替。

表 1 标定算法的气象台站相关信息

Table 1 Information of CMA stations for algorithm calibration

站点	名称	位置	经度/°E	纬度/°N	海拔/m	类别	地表类型
50349	新林	黑龙江	124.33	51.70	494.6	基本站	疏林地
50758	明水	黑龙江	125.90	47.17	249.2	基本站	旱地
50838	乌兰浩特	内蒙古	122.05	46.08	274.7	基本站	旱地
51156	和布克赛尔	新疆	85.72	46.78	1 291.6	基本站	低覆盖草地
51730	阿拉尔	新疆	81.27	40.55	1 012.2	基本站	低覆盖草地
52436	玉门镇	甘肃	97.03	40.27	1 526.0	基本站	戈壁
52713	大柴旦	青海	95.37	37.85	3 173.2	基本站	裸岩石砾地
52856	恰卜恰	青海	100.62	36.27	2 835.0	基本站	未利用地
53276	朱日和	内蒙古	112.90	42.40	1 150.8	基准站	低覆盖草地
53602	阿拉善左旗	内蒙古	105.67	38.83	1 561.4	基本站	盐碱地
53798	邢台	河北	114.50	37.07	76.8	基准站	旱地
53963	侯马	山西	111.37	35.65	433.8	基准站	旱地
54602	保定	河北	115.52	38.85	17.2	基本站	旱地
54725	惠民县	山东	117.53	37.48	11.7	基准站	旱地
54852	莱阳	山东	120.73	36.97	54.4	基本站	旱地
54929	费县	山东	117.95	35.25	121.2	基本站	旱地
55279	班戈	西藏	90.02	31.38	4 739.0	基本站	高覆盖草地
55299	那曲	西藏	92.07	31.48	4 507.0	基本站	高覆盖草地
56034	清水河	青海	97.13	33.80	4 415.4	基本站	高覆盖草地
56357	稻城	四川	100.30	29.05	3 748.0	基本站	中覆盖草地
57034	武功	陕西	108.22	34.25	447.8	基本站	旱地
57091	开封	河南	114.30	34.78	72.5	基本站	旱地
57290	驻马店	河南	114.02	33.00	82.7	基本站	旱地
57405	遂宁	四川	105.55	30.50	278.2	基本站	耕地
57562	石门	湖南	111.37	29.58	116.9	基准站	疏林地
57845	通道	湖南	109.78	26.17	397.5	基本站	高覆盖草地
58236	滁县	安徽	118.30	32.30	27.5	基本站	耕地
58527	景德镇	江西	117.20	29.30	61.5	基本站	林地

根据改则(32.1°N, 84.4°E, 4 414.9 m)站的 CEOP 观测所得日地表温度 (T_{s_max} 、 T_{s_min} 、 T_{s_ave}) 和 AMSR-E 过境时地表温度 (T_{s_d} 、 T_{s_d}) 之间的最小二乘线性回归关系(图 2),用以确定对应于升轨和降轨的逐日观测数据。由图 2 可以得出, T_{s_d} 与 T_{s_max} 之间和 T_{s_d} 与 T_{s_min} 之间回归关系的决定系数 R^2 明显大于 T_{s_d} 与 T_{s_min} 、 T_{s_d} 与 T_{s_ave} 、 T_{s_d} 与 T_{s_max} 、 T_{s_d} 与 T_{s_ave} 的决定系数,这是由于升轨和降轨过境时间与日最高和最低温度出现时间相差不大。因此,使用逐日 T_{s_max} 和 T_{s_min} 分别标定和验证升轨和降轨的分类算法阈值。

不考虑土壤盐分的影响,当 AMSR-E 升轨过境地表温度 T_{s_d} 为土壤冻结点(0 °C)时,对应的日最高地表温度为 3.7 °C;当 AMSR-E 降轨过境地表温度 T_{s_d} 为土壤冻结点(0 °C)时,对应的日最低地表温度为 -4.24 °C。当 $T_{s_max} > 3.7$ °C 时,确定该像元处于融化状态;当 $T_{s_min} < -4.24$ °C 时,确定该像元

处于冻结状态。根据以上选取准则,确定升轨时融化样本 20 815 个,冻结样本 1 249 个,降轨时冻结样本 4 376 个,融化样本 17 389 个。

分别计算升轨和降轨时冻结样本和融化样本的 T_{B_37V} 平均值、标准差和双倍标准差,可以看出融化样本的 T_{B_37V} 明显高于冻结样本(表 2)。升轨时冻结训练样本和融化训练样本的(均值±标准差)两个重叠区域的中值确定为 T_{a_cutoff} ,同理确定降轨时的地表冻融分类阈值为 T_{d_cutoff} 、 SD_{d_cutoff} 和 SD_{a_cutoff} 以 0 作为阈值。

降水与沙漠类似,也具有较弱的体散射效应,可能被误分为冻结地表,但由于降水事件发生位置很随机,因此需要根据亮温数据剔除降水像元。2006 年 Bettenhausen 等^[24]提出了下垫面为海洋的 AMSR-E 降水识别算法,但是没有适用于下垫面为陆地的 AMSR-E 降水识别算法。本研究中尝试建立

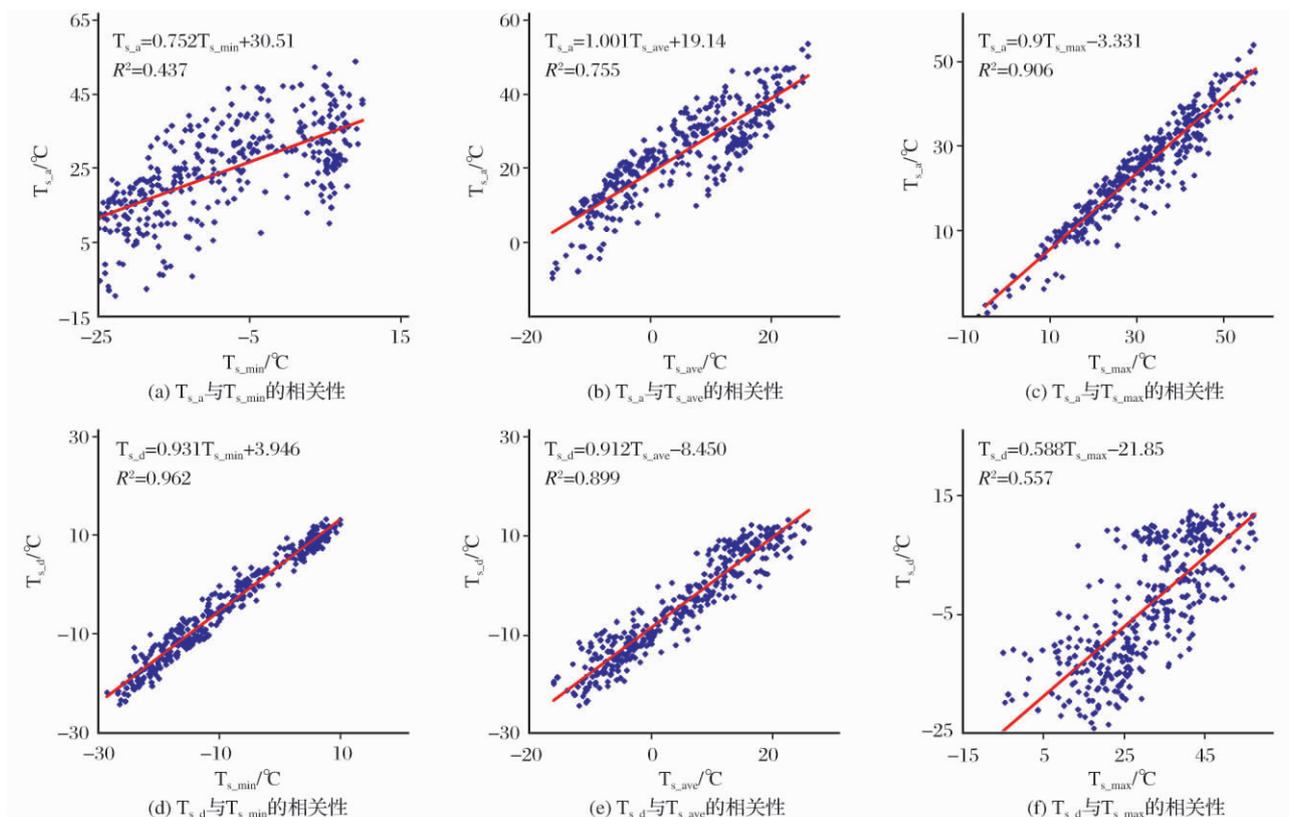


图 2 $T_{s,d}$ 、 $T_{s,d}$ 与 $T_{s,max}$ 、 $T_{s,min}$ 、 $T_{s,ave}$ 的相关性

Fig. 2 Correlation between $T_{s,d}$ 、 $T_{s,d}$ and $T_{s,max}$ 、 $T_{s,min}$ 、 $T_{s,ave}$

表 2 升降轨时冻结和融化样本统计结果

Table 2 Brightness temperature statistical of frozen and thawed samples

		$T_{B_{37V}}/K$		
		平均值	标准差	两倍标准差
升轨	冻结样本	256.20	8.14	16.29
	融化样本	276.65	9.27	18.54
降轨	冻结样本	253.45	7.09	14.18
	融化样本	269.17	7.58	15.16

SSM/I垂直极化亮温(19、22 和 85 GHz)与 AMSR-E 相近频段垂直极化亮温(18、23 和 89 GHz)之间的定量关系(图 3),用于将 SSM/I 降水识别算法^[25-26]改写成适用于 AMSR-E 的降水识别公式(公式(3)和(4))。

升轨降水识别公式:

$$SI(89_V) = A + B[0.671T_V(18) + 83.46] + C[0.693T_V(23) + 76.44] + D[0.693T_V(23) + 76.44]^2 - [0.886T_V(89) + 19.96]$$

$$0.693T_V(23) + 76.44 > 158 + 0.49[0.886T_V(89) + 19.96] \quad (3)$$

降轨降水识别公式:

$$SI(89_V) = A + B[0.077T_V(18) + 6.171] + C[0.951T_V(23) + 11.80] + D[0.951T_V(23) + 11.80]^2 - [0.955T_V(89) + 8.168]$$

$$0.951T_V(23) + 11.80 > 158 + 0.49[0.955T_V(89) + 8.168] \quad (3)$$

其中:系数 A 取值 450.2, B 为 -0.506, C 为 -1.874, D 为 0.00637。

3.2 算法验证

根据 AMSR-E 升轨和降轨一天两次过境观测,将中国近地表冻融细分为:日内完全冻结、日内完全融化、日内冻融循环和日内逆向冻融循环 4 种类型。当升轨和降轨同时识别地表为冻结或者融化状态时,定义为日内完全冻结或日内完全融化;当升轨为融化状态且降轨为冻结状态时定义为日内冻融循环;升轨为冻结状态且降轨为融化状态时定义为日内逆向冻融循环,该类型多为分类不准确造成,不参与后续的验证和分析工作。

使用以下变量评估地表冻融状态算法的分类精度:① F_V 为被正确分类的日内完全冻结像元数;② F_t 为日内完全冻结像元总数;③ T_V 为被正确分类的日内完全融化像元数;④ T_t 为日内完全融化像元总数;⑤ TR_V 为被正确分类的日内冻融循环像元

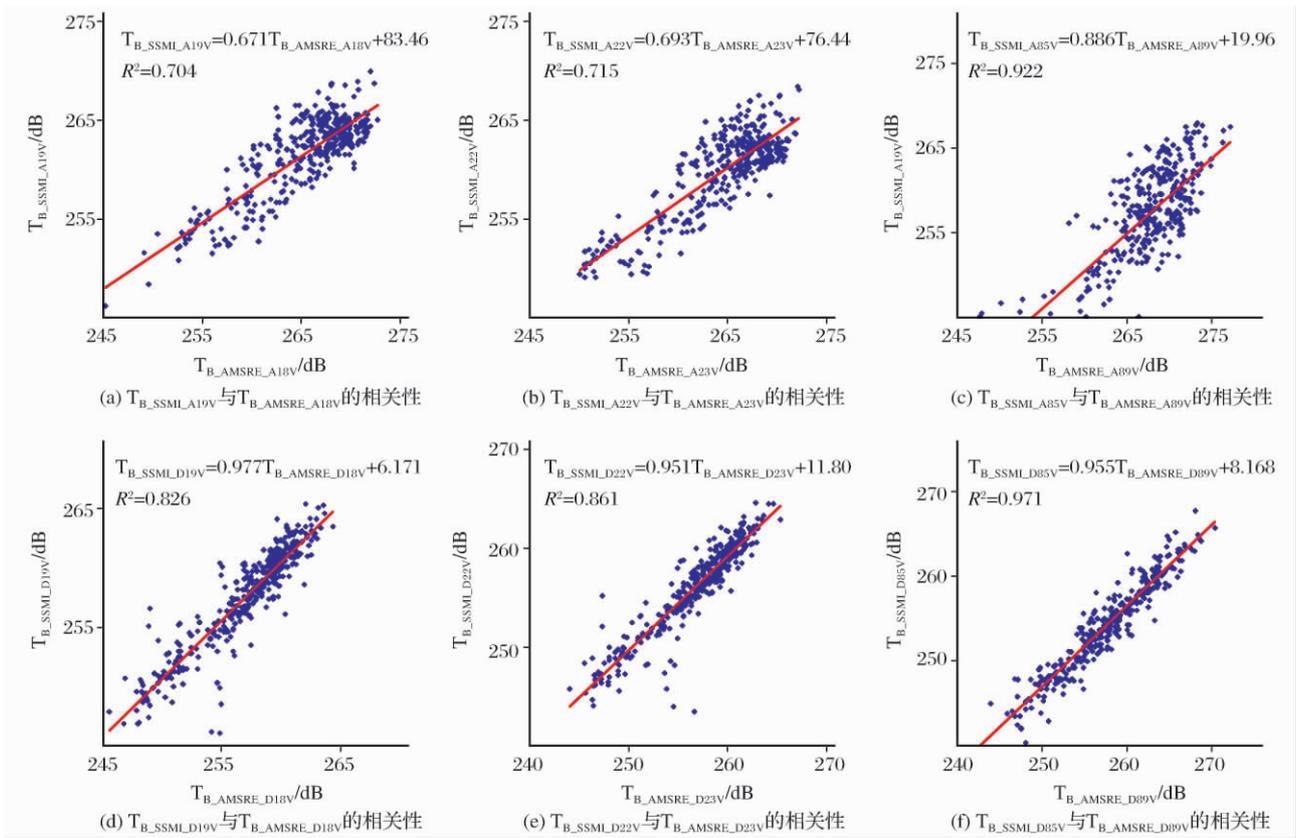


图 3 SSM/I 和 AMSR-E 升降轨相近频率亮温之间的相关性

Fig. 3 Correlation of SSM/I and AMSR-E descending and ascending orbit brightness temperature of corresponding frequencies

数;⑥ TR_t 为日内冻融循环像元总数。

各评估变量的计算方法如下:

(1) 日内完全冻结地表分类精度:

$$A_F = F_{\downarrow} / F_t \quad (5)$$

(2) 日内完全融化地表分类精度:

$$A_T = T_{\downarrow} / T_t \quad (6)$$

(3) 日内冻融循环地表分类精度:

$$A_{TR} = TR_{\downarrow} / TR_t \quad (7)$$

(4) 整体分类精度:

$$A = (F_{\downarrow} + T_{\downarrow} + TR_{\downarrow}) / (F_t + T_t + TR_t) \quad (8)$$

选取 122 个气象站点的日最低地表温度和日最高地表温度用于分类算法精度验证和评价,地表类型主要是草地(28.69%)、农田(26.23%)和林地(22.95%),海拔从几十米到几千米。同算法标定时的判别准则,AMSR-E 升轨时,当日最高地表温度高于 3.7 °C,认为该像元为融化状态,否则为冻结状态;降轨时,当日最低地表温度低于 -4.24 °C,像元为冻结状态,否则为融化状态。

经过 122 个气象台站 3 a 共 30 660 条数据验证得到日内完全融化地表分类精度为 75.93%,日内完全冻结地表分类精度为 98.34%,日内冻融循环地表

分类精度 69.44%,总体分类精度为 73.33%。

4 结果分析

根据本文重新标定的双指标算法,获得 2004 年逐日地表冻融状态分类结果。AMSR-E 因扫描带宽有限,一天之内无法完全覆盖整个中国区域,因此使用连续 7 d 合成获得覆盖中国全境的日地表冻融分类结果。

由表 3 可以看出,1~12 月升轨和降轨的冻结地表面积均是先逐渐减少然后逐渐增加。7 月份冻结地表面积最小,主要分布在青藏高原西北部,仅为 $0.0767 \times 10^6 \text{ km}^2$,但是融化地表面积最大,占国土面积的 93.61%;冻结地表面积在 1 月份最大,为 $6.6835 \times 10^6 \text{ km}^2$,约占国土面积的 71.91%,相应融化地面积为 32.28%。相同月份,升轨冻结地表面积小于降轨冻结地表,升轨融化土壤面积大于降轨融化地表。

由图 4 看出,1 月份日内完全冻结地表和日内完全融化地表大体以秦岭淮河为界,南部主要是日内完全融化地表,其中有少量日内冻融循环地表,北部以日内完全冻结地表为主。随着温度逐渐升高,日内完全冻结地表南界、日内完全融化地表北界和

表 3 2004 年月平均升轨、降轨和日冻融循环不同近地表冻融状态面积统计

Table 3 Monthly extent of near surface freeze/thaw states of ascending, descending and daily freeze/thaw cycle in 2004

月份	升轨($\times 10^6$ km 2)		降轨($\times 10^6$ km 2)		日冻融循环($\times 10^6$ km 2)			
	冻结地表	融化地表	冻结地表	融化地表	日内完全冻结	日内完全融化	日内冻融循环	日内逆向冻融环
1	5.7667	3.5271	6.6835	2.6103	5.8232	2.6455	0.8251	0
2	4.8838	4.4100	6.4491	2.8447	4.9655	2.9427	1.3956	0
3	3.1224	6.1713	5.6064	3.6873	3.2927	3.7791	2.2220	0
4	1.2228	8.0709	3.7206	5.5731	1.2750	5.7044	2.3143	0
5	0.5863	8.7075	2.5707	6.7230	0.5813	6.7677	1.9448	0
6	0.2803	9.0135	1.7538	7.5399	0.2960	7.5701	1.4271	0.0006
7	0.0767	9.2171	1.0821	8.2117	0.0940	8.2249	0.9753	0
8	0.0811	9.2127	1.0764	8.2173	0.0970	8.2645	0.9306	0.0019
9	0.3469	8.9469	2.3420	6.9518	0.3934	7.0335	1.8669	0
10	1.7174	7.5764	3.6911	5.6026	1.7494	5.8684	1.6859	0
11	4.0424	5.2514	5.9765	3.3172	4.2479	3.4957	1.5502	0
12	5.3972	3.8966	6.4466	2.8472	5.6806	2.9151	0.6981	0

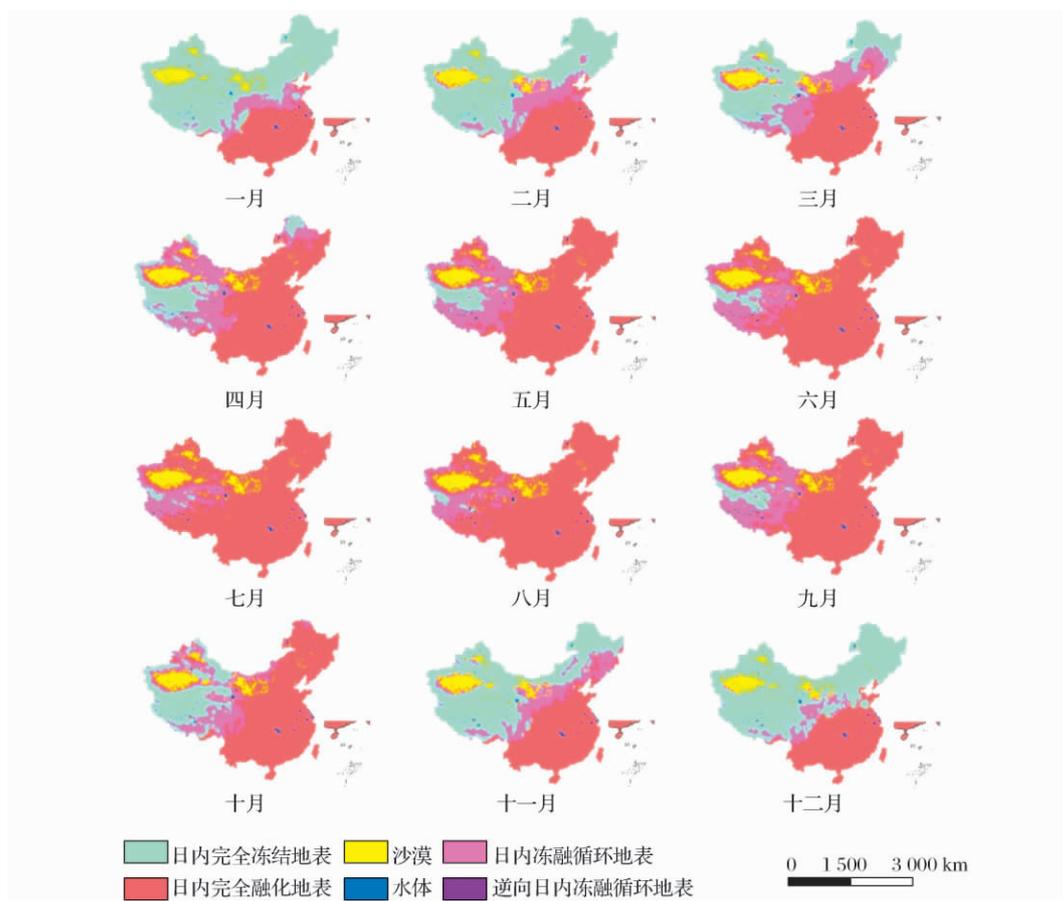


图 4 2004 年月平均日内地表冻融分类结果

Fig. 4 Monthly average extent of daily surface soil freeze/thaw states in 2004

日内冻融循环地表的南北界从东南向西北移动。从 1 月开始, 日内完全冻结地表面积逐渐减小, 7 月份面积达到最小, 仅占国土面积的 1.01%; 日内完全融化地表面积逐渐增大, 8 月份面积达到最大, 占国土面积的 88.92%(表 3)。从 9 月份开始完全冻结

地表范围从西北向东南逐渐扩散, 直至秦岭淮河, 形成一个完整的年近地表冻融循环周期。日内冻融循环地表主要出现在日内完全冻结地表区和日内完全融化地表区的交界地带, 主要出现在春季(3~5 月)和秋季(9~11 月), 4 月份面积最大, 占全国总面积

的 24.90%, 12 月份最小, 占 7.51% (表 3)。日内逆向冻融循环主要出现在 6 月和 8 月, 面积比例最大为 0.02%, 其多半是由于降水未完全剔除导致的误分类引起的。

根据日内近地表冻融循环状态的时间序列信息, 可将年近地表冻融循环周期划分为稳定冻结期、稳定融化期、春季冻融过渡期和秋季冻融过渡期。由于天气和亮温噪声等因素干扰, 几天内可能出现日内近地表冻融状态的跳跃性变化, 使用 5 d 窗口对日内近地

表冻融循环结果进行平滑, 以便提取稳定连续的 4 个冻融循环周期。连续 5 d 中, 出现频率最高的近地表冻融循环状态即为平滑后的日内近地表冻融循环分类结果。当地表至少连续 5 d 为日内完全冻结地表或日内完全融化地表时, 这个时间段判为稳定冻结期或稳定融化期; 地表至少连续 5 d 为日内冻融循环地表时, 这个时间段判定为冻融过渡期, 冻融过渡期出现在 3~6 月的为春季冻融过渡期, 在 9~12 月前出现的为秋季冻融过渡期。

表 4 代表性站点稳定冻结期、稳定融化期、春季冻融过渡期和秋季冻融过渡期
Table 4 Stable frozen period, stable thawed period, spring freeze/thaw transition period and fall freeze/thaw transition period of CMA stations with different latitude and altitude

站点	纬度/°N	海拔/m	冻土类型	稳定冻结期		稳定融化期		春季冻融过渡期		秋季冻融过渡期	
				开始时间*	持续时间**	开始时间	持续时间	开始时间	持续时间	开始时间	持续时间
黑龙江漠河	52.97	433.0	高纬度多年冻土	293	188	133	138	116	17	271	22
新疆吐尔尕特	40.52	4 804.4	山地多年冻土	291	198	—	—	124	81	205	86
西藏安多	32.35	4 800.0	高原多年冻土	286	213	190	50	134	56	240	46
西藏改则	32.15	4 414.9	浅季节冻土	276	187	215	11	98	117	226	50
山东朝阳	36.23	42.7	浅季节冻土	349	17	45	281	1	44	326	23
江西贵溪	28.30	51.2	短时冻土	—	—	205	365	—	—	—	—

注: 开始时间*: 儒略日; 持续时间**: 天数

由表 4 可以看出, 不同纬度和海拔地区, 年内近地表冻融循环周期的差异。新疆吐尔尕特属于高纬度高海拔地区, 稳定冻结期从 10 月中旬开始一直持续到次年的 5 月初, 春季冻融过渡期和秋季冻融过渡期连续出现, 中间没有稳定融化期; 西藏安多与吐尔尕特海拔相差不大, 但是由于纬度降低, 安多站出现稳定融化期, 但时间相对较短, 从 7 月初到 8 月底; 黑龙江漠河处于高纬度多年冻土区, 可以明显看出近地表冻融循环周期的变化, 即稳定冻结期从 10 月中下旬到次年 4 月中旬, 稳定融化期是 5 月到 9 月, 4 月以及 9 月分别是春季冻融过渡期和秋季冻融过渡期; 改则位于青藏高原浅季节冻土区, 稳定融化期是 7 月下旬到 8 月下旬, 与安多地区相比, 稳定融化期缩短 1 个月。改则地区春季冻融过渡期较长, 从 4 月持续到 7 月; 随着纬度或海拔的降低, 稳定融化期增长, 山东朝阳地区的稳定冻结期和过渡期近 4 个月, 近 8 个月地表处于完全融化状态; 到达

中国南部, 江西贵溪地区 (位于短时冻土区) 近地表全年处于融化状态, 无稳定冻结期。

中国低纬度地区没有稳定冻结期; 相同纬度, 海拔越高稳定期 (稳定冻结期和稳定融化期) 越长; 海拔越低稳定期越短, 过渡期 (春季冻融过渡期和秋季冻融过渡期) 较长。对于高海拔地区, 若纬度高则稳定融化期短, 无稳定融化期, 纬度低, 稳定融化期延长。从表 4 可以得出, 中国大部分地区的稳定冻结期主要出现在 1 月和 2 月, 稳定融化期出现在 7 月和 8 月, 春季冻融过渡期和秋季冻融过渡期分别出现在 3~5 月和 9~11 月。

6 结 语

本研究重新标定了地表冻融双指标算法中的 $T_{B,37V}$ 的阈值, 利用 AMSR-E 一天两次过境数据, 将逐日地表冻融状态细分为日内完全冻结、日内完全融化、日内冻融循环和日内逆向冻融循环。辐射计过境

时的地表温度能反映真实的地表冻融状态,但考虑到地表温度数据的获取局限性,本文建立了气象站日最大值地表温度与辐射计过境时刻地表温度之间的关系,最终采用气象站日观测地表温度标定双指标算法。经 122 个气象站日观测地表温度的验证,AMSR-E 日内完全冻结地表分类精度为 98.34%,日内完全融化地表分类精度为 75.93%,日内冻融循环地表分类精度为 69.44%,总体分类精度为 73.33%。

日内冻融循环地表和日内完全融化地表的分类精度较低,与标定温度阈值时仅采用 CEOP 观测站点数据有关。由于 CEOP 观测点分布于中国海拔较高的青藏高原,导致标定所得温度阈值偏低,分类结果中日内完全融化土壤面积相对较大。今后将重点收集青藏高原以外地区,特别是中国北方和东部地区的高时间分辨率地表温度观测数据,以进一步改善分类精度。

日内冻融循环分类精度与降水有密切关系。研究中引入 SSM/I 降水公式,通过寻找两种辐射计相近波段的相关性,得到适用于 AMSR-E 频段的降水识别公式。该方法无法保证高精度地剔除降水像元。2004 年 1、6、8 月中国南部日内完全融化地表范围内零星出现日内逆向冻融循环地表,就是由于降水数据未完全剔除引起的。

此外,本研究仅利用了 AMSR-E 的升轨和降轨过境数据,其他时刻地表冻融状态是未知的,仅依靠两次冻融分类结果判定日内冻融循环存在一定的不确定性。计划于 2014 年发射的 SMAP(Soil Moisture Active and Passive),将同步使用 L 波段 SAR 和辐射计数据监测地表冻融循环,为未来遥感监测近地表冻融循环算法研究开拓了新方向。拟在今后的研究中联合使用其他时刻过境的微波数据(例如 SSM/I、ASCAT、SMOS、SMAP 等),重点研究主被动微波遥感相结合观测近地表冻融状态,将被动微波的亮度温度和主动微波的后向散射系数相结合,实现多源信息优势互补,提高判定日内近地表冻融循环状态的时间分辨率,更加准确地反映近地表冻融循环。

致谢:感谢 NSIDC 提供的 AMSR-E 逐日亮温数据集,CMA 和 CEOP 项目提供的地表温度观测数据!

参考文献 (References):

[1] 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.]

[2] Li X, Jin R, Pan X D, *et al.* Changes in the Near-surface Soil Freeze-thaw Cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 17: 33-42.

[3] Zhang T J, 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): 8860. doi: 10. 1029/2003JD003530.

[4] 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.]

[5] Zhang T J, 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.

[6] Goodison B E, Brown R D, Crane R G. EOS Science Plan: Chapter 6 Cryospheric System[R]. Maryland: NASA/Goddard Space Flight Center, 1999.

[7] Ran Y H, Li X, Cheng G D, *et al.* Short Communication Distribution of Permafrost in China: An Overview of Existing Permafrost Maps [J]. *Permafrost and Periglacial Process*, 2012, 23: 322-333.

[8] Jin R, Li X, Che T. A Decision Tree Algorithm for Surface Freeze/Thaw Classification Using SSM/I[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: 2651-2660.

[9] 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.

[10] 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). doi:10. 1029/2003JD004472.

[11] Zuerndorfer B, England A W, Dobson M C, *et al.* Mapping Freezing/Thaw Boundary with SMMR Data[J]. *Agricultural and Meteorology*, 1990, 52(1-2): 199-225.

[12] Zuerndorfer B, England A W. Radiobrightnesses Decision Criteria for Freeze/Thaw Boundaries[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(1): 89-102.

[13] 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 Scatterometer Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(3): 360-374.

[14] Kimball J S, McDonald K C, Frolking S, *et al.* Radar Remote Sensing of the Spring Thaw Transition Across a Boreal Landscape[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(2): 163-175.

[15] Wismann V. Monitoring of Seasonal Thawing in Siberia with ERS Scatterometer Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(4): 1804-1809.

[16] Frolking S, McDonald K C, Kimball J S, *et al.* Using the Space-

- Borne NASA Scatterometer (NSCAT) to Determine the Frozen and Thawed Seasons[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D22): 27895-27907.
- [17] Kimball J S, McDonald K C, Running S W, *et al.* Satellite Radar Remote Sensing of Seasonal Growing Seasons for Boreal and Subalpine Evergreen Forests[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(2): 243-258.
- [18] 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.
- [19] Kim Y, Kimball J S, Glassy J. 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.
- [20] Liu J Y, Liu M L, Zhuang D F, *et al.* Study on Spatial Pattern of Land-use Change in China during 1995-2000[J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 46(4): 373-384.
- [21] Njoku E G, Jackson T J, Lakeshmi V, *et al.* Soil Moisture Retrieval from AMSR-E[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(2): 215-229.
- [22] Kim Y, Kimball J S. Landscape Freeze/Thaw Status Using Satellite Passive Microwave Remote Sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(3): 949-960.
- [23] Basist A, Grody N C, Peterson T C, *et al.* Using the Special Sensor Microwave/Imager to Monitor Land Surface Temperatures, Wetness and Snowcover[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1998, 37: 888-911.
- [24] Bettenhausen M H, Bevilacqua R M, Wang N Y, *et al.* A Non-linear Optimization Algorithm for Windsat Wind Vector Retrievals[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(3): 597-609.
- [25] Fiore J V, Grody N C. Classification of Snow Cover and Precipitation Using SSM/I Measurement; Case Studies[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13(17): 3349-3361.
- [26] Grody N C. Classification of Snow Cover and Precipitation Using the Special Sensor Microwave Imager[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(D4): 7423-7435.

Algorithm Development of Monitoring Daily Near Surface Freeze/Thaw Cycles Using AMSR-E Brightness Temperatures

Xie Yanmei¹, Jin Rui¹, Yang Xingguo²

(1. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. *Ningxia Hui Autonomous Region Meteorological Service, Yinchuan 750002, China*)

Abstract: In the study, we have utilized daily ascending (1:30PM) and descending (1:30AM) brightness temperatures to monitor the near surface freeze/thaw states. The dual-indices algorithm has been used to identify the near surface freeze/thaw states twice a day, which can classify daily surface freeze/thaw cycle into daily frozen surface, daily thawed surface, daily surface freeze/thaw cycle and daily surface inverse freeze/thaw cycle. This study calibrates the thresholds of descending and ascending orbit 37GHz vertical polarization brightness temperature, respectively, by in situ daily maximum surface temperature and daily minimum surface temperature of 28 meteorological stations, and another 122 meteorological stations in China are used for algorithm validation. The classification accuracy of daily frozen surface is above 90%. The classification accuracies of daily thawed surface and daily surface freeze/thaw cycle is around 70%. On the basis of daily freeze/thaw state, annual surface freeze/thaw cycle is divided into stable frozen period, stable thawed period, spring freeze/thaw transition period and fall freeze/thaw transition period. According to results of 2004, in January, daily frozen surface and daily thawed surface is roughly bounded by Tsinling Mountains and Huai River. Boundaries of daily frozen surface south, daily thawed surface north and daily freeze/thaw cycle south/north move from southeast to northwest of China, with increasing surface temperatures, and then move back for decreasing surface temperatures. Stable frozen period mainly appears in January and February, and stable thawed period is in July and August. Spring freeze/thaw transition period occurs during March to May, and fall freeze/thaw transition period in September, October and November.

Key words: AMSR-E; Brightness temperature; Daily surface freeze/thaw cycle; Surface freeze/thaw state