

# 青海高原春秋季节地表土冻融的微波遥感监测<sup>\*</sup>

曹 梅 盛

(中国科学院兰州冰川冻土研究所 兰州 730000)

张 铁 钧

(美国 NASA/Goddard 空间飞行中心 Greenbelt MD 20771)

**摘 要** 用青海高原地区 1983 年的 SMMR18 及 37GHz 水平极化微波亮温记录与台站地表 5cm 深温度实况相比较, 统计确定部分考虑含水量对区分地表土冻融影响的亮温  $T_{37H}$  及亮温谱梯度 SG 两参数综合模式, 区分的正确率达 74%。青海高原地处于旱半干旱环境, 春季地表土含水量低, Zuerndorfer 提出的负亮温谱梯度, 在春季区分冻融的效果并不明显。该文作了改进, 效果明显。

**关键词** 地表土冻融, 微波遥感, 青海高原

## 1 引 言

地表土的冻融变化, 将改变它的热学性质<sup>[1]</sup>, 影响区域地气系统的水热交换、相应的天气气候及地表径流过程, 它是环境研究、资源开发以及工程设计中经常需考虑的因素之一。由于青海高原自然环境恶劣, 交通不便加之历史原因, 区内地表冻融测站甚少且很不均匀。因此, 根据台站记录分析地表冻融规律及时空分布, 可靠程度有限。卫星遥感, 特别是具全天候监测能力微波遥感技术的发展, 为同步监测大范围环境, 提供了高技术。由于地表融土冻结时, 土的比辐射率也增大, 使亮温单参数区分冻融增加了不确定。1989 年 Zuerndorfer 等探讨了用多通道微波扫描辐射计 (SMMR) 所获取的亮温谱梯度与 37GHz 亮温监测冻融过程<sup>[2]</sup>。该文把 1983 年在青海高原 32°—40°N, 90°—100°E 范围 SMMR 记录, 用改进的双参数模式, 进一步探讨微波遥感监测地表土冻融状态的能力。

## 2 资料与处理

1978 年 10 月发射升空的雨云-7 号太阳同步极轨卫星, 运载着能测量 5 通道极化微波辐射的

SMMR。它在正午与午夜通过赤道。每隔 6 天对同一地区重测一次, 有关特征值已列于表 1。文中分析时已将本区 0.5°×0.5°经纬网格内的各通道亮温记录, 用高斯分布拟合成网格 6 天亮温均值。

表 1 SMMR 若干特征值

Table 1 Some characteristics of SMMR

波长 (cm)	频率 (GHz)	空间分辨率 (km)	温度分辨率 (K)	天线波束宽 (deg)
0.81	37.00	30	1.5	0.8
1.43	21.00	60	1.5	1.4
1.66	18.00	60	1.2	1.6
2.80	10.69	97.5	0.9	2.6
4.54	6.60	156	0.9	4.2

卫星传感器接收的地表微波发射, 主要来自表层。所以该文已将 5cm 深地温相对 0°C 的高低, 代表地表土冻融实况。为与 SMMR 过境亮温记录相配合, 地温取对应 6 天的均值。使用的亮温系夜间过境的水平极化记录。日地温系 02、08、14 及 20 北京时 4 次测温记录的均值。区内有地面台站 25 个, 主要分布在高原东部。为保证所建区分冻融的统计模式较可靠, 特意在冻融交替的春秋二季, 即

3月8日至3月24日及10月28日至11月13日, 选用冻融次数相近的实测为样本(表2)。该时段内 SMMR 监测全境均为3个轮回。但由于个别点某

表 2 对比地表实况与 SMMR 监测的样本数

Table 2 Number of samples for comparison between ground truth and SMMR monitoring

季节	冻结(个)	融化(个)	总计(个)
春季	36	36	72
秋季	37	34	71
春与秋	73	70	143

个时刻的漏缺, 实际统计样本数为 143 个。

### 3 冻融状态微波监测原理

卫星传感器接收的地表微波亮温  $T_b$  近似如下所示<sup>[3]</sup>:

$$T_b = eT_0 + (1 - e) T_{sky}$$

式中  $e$  与  $T_0$  分别为地表土比辐射率和温度(K);  $T_{sky}$  为天空视在温度(K)。由于研究区地处 4000m 以上的高海拔干旱、半干旱环境,  $T_{sky}$  对  $T_b$  影响可暂忽略。

当融土随  $T_0$ (K) 下降变成冻土而土比辐射率改变微弱时, 微波遥感监测的地表亮温将相应下降。因此, 可据研究区  $T_0$  的变化来区分冻融。但实验证实, 稍高含水量土融化过渡到冻结时, 比辐射率将出现明显跃增, 乘积  $eT_0$  比冻结前反而增大, 降低了  $T_b$  区分冻融准确率。

实验表明, 冻土中水分子已不能无约束地与微波电场协调对齐, 旋转自由度减少, 冻土在微波波段将呈现视在干燥。土的介电常数实部  $\epsilon'$  减少而比辐射率增大。表 3 提供了实验室测量的含水量 15% 两类均质土的辐射特性。表内列出 10 GHz 波

表 3 两类含水量 15% 土的辐射性质<sup>[4,5]</sup>

Table 3 Radiometric properties of two soils with 15% moisture content

	+5°C						-5°C					
	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$e(0)$	$T_b$	$\tan\delta$	$Z_e$	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$e(0)$	$T_b$	$\tan\delta$	$Z_e$
Goodrich 粘土	8.2	3.5	0.77	221	0.43	0.13 $\lambda$	4.9	1.0	0.86	235	0.20	0.36 $\lambda_0$
Fairbanks 粉砂土	9.6	5.0	0.74	214	0.52	0.10 $\lambda_0$	4.1	0.02	0.89	242	0.005	15.7 $\lambda_0$

段上它们由融变冻时  $\epsilon'$  及天底点比辐射率  $e(0)$  的变化<sup>[4,5]</sup>。Goodrich 粘土和 Fairbanks 粉砂土从 +5°C 下降至 -5°C,  $e(0)$  的增大已分别招致亮温  $T_b$  增加 14K 及 28K, 但同样降温下,  $e = 0.8$  干土, 由于比辐射率无明显变化,  $T_b$  将减少 8K。显然, 含水量变动给  $T_b$  区分冻融, 带来不确定。这现象在较高频率 37GHz 下同样存在, 程度有所减弱。

Zuerndorfer 发现, SMMR 的 10.7-37GHz 负亮温谱梯度(SG)对土的冻结有良好指示作用。因为冻结也降低土体介电常数虚部  $\epsilon''$ , 且比  $\epsilon'$  下降幅度更大。所以损耗正切  $\tan\delta = \epsilon''/\epsilon'$  降低, 使热发射光子可来自发射介质更深处, 有效发射深  $Z_e$  增大<sup>[5]</sup>。表 3 已列出上述两类土从 +5°C 降至 -5°C 时  $\epsilon''$ ,  $\tan\delta$  及  $Z_e$  的变化。Fairbanks 粉砂土  $Z_e$  已高达 15.7 $\lambda_0$ ,  $\lambda_0$  为相应频率的自由空间波长。较长热光子平均路径, 给光子体散射创造了更多机会。波长越短, 土体呈现不均匀性越大, 逸出地表前热发射光子的散射机会也将比较长波长得多。所以等温半空间体散射介质应存在  $\frac{\partial T_b}{\partial f} < 0$  ( $f$  为频率 (GHz))。England 理论计算一维加热半空间介质模型的结果, 也证实它的存在<sup>[6]</sup>。

Zuerndorfer 等在强调  $T_{37}$  及  $SG$  分别反映气温及地表土冻融状态基础上, 提出把  $T_{37}$  及 10.7-37GHz 区间的  $SG$  各自化成反映冻融的可能系数  $P_{37}$  和  $P_{SG}$ , 再把两者相乘构成所谓冻融指数 ( $FI$ )。  $P_{37}$ ,  $P_{SG}$  及  $FI$  值均介于 0-1 之间, 其计算步骤如下:

$$P_{37} = \begin{cases} 0 & T_{37} > T_{37,\max} \\ \frac{T_{37,\max} - T_{37}}{T_{37,\max} - T_{37,\min}} & T_{37,\min} < T_{37} < T_{37,\max} \\ 1 & T_{37} < T_{37,\min} \end{cases}$$

$$P_{SG} = \begin{cases} 0 & \frac{\partial T_b}{\partial f} > \left(\frac{\partial T_b}{\partial f}\right)_{\max} \\ \left(\frac{\partial T_b}{\partial f}\right)_{\max} - \left(\frac{\partial T_b}{\partial f}\right)_{\min} & \left(\frac{\partial T_b}{\partial f}\right)_{\min} < \frac{\partial T_b}{\partial f} < \left(\frac{\partial T_b}{\partial f}\right)_{\max} \\ 1 & \frac{\partial T_b}{\partial f} > \left(\frac{\partial T_b}{\partial f}\right)_{\min} \end{cases}$$

式中  $T_{37}$ ,  $\frac{\partial T_b}{\partial f}$  为监测区 37GHz 亮温及 10.7-37GHz 区间 SG;  $T_{37.\max}$ 、 $T_{37.\min}$ 、 $\left(\frac{\partial T_b}{\partial f}\right)_{\max}$ 、 $\left(\frac{\partial T_b}{\partial f}\right)_{\min}$  均系样本统计所得。FI 在 1983 年秋季美国北方地区地表土冻融边界划分应用中, 取得一定成效。鉴于土中含水量多与少会影响 SG 的大小<sup>[4]</sup>, 而  $T_{37H}$  不但对气温波动有指示作用, 还含若干土中含水量信息。文中已将它直接融合到 SG 内, 即把两参数等权相乘组合一起的 Zuerndofer 原模式作了改进。

### 4 结果与讨论

图 1、2 分别为青海高原春秋二季 143 个地温记录与 SMMR 所得  $T_{37H}$  及 18 与 37GHz 间 SG 关系的图示。统计所得最佳区分阈值分别为 222.5K 与 -0.17K/GHz。此时春秋二季及春与秋各季冻融区分准确率分别为 68%、71%、65% 及 69%、67%、70% (表 4)。所以  $T_{37H}$  的区分准确率春季优于秋季, 而 SG 则相反, 显然, 长期处于冬半年干旱环境的青海高原, 春季地表土含水量接近全年最低。冻结提升的比辐射率值很小,  $T_{37}$  判别地表冻融能力增强, 此时 SG 判别能力最低, 但经夏秋多雨的秋冬时刻, 地表土含水量较高, 所述两单参数正确率高低的次序则相反。

图 3 是地表土冻融状态下  $T_{37H}$  与 SG 关系的图示。较单个参数等权组合, 图 3 上阈值  $SG = 4.26 - 0.0200 \times T_{37H}$  区分的效果, 不但准确率有所提高, 且足够稳定地不随含水量季节波动而变。因为它部分包容了提高区分准确率的含水量信息。

表 3 已指出, 相同含水量不同的土类, 有效发射深度  $Z_e$  差别也很大。青海高原地面覆有砂壤土为主的沼泽土到以砂砾石土及砂石土为主的灰棕荒漠土。多样的地表土类将使各地冻结状态 SG 阈值也呈差异。此外, 式中  $T_{37H}$  含水量信息很有限。这些都是所建模式误判的主要来源。现有微波遥感土中含水量模式的运用<sup>[7]</sup>, 也许将会降低若干误

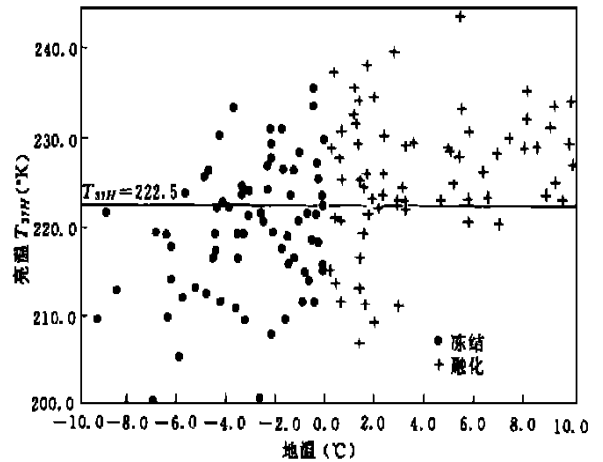


图 1  $T_{37H}$ 与地温关系的图示

Fig.1 Scatter plot of  $T_{37H}$  vs. ground temperature

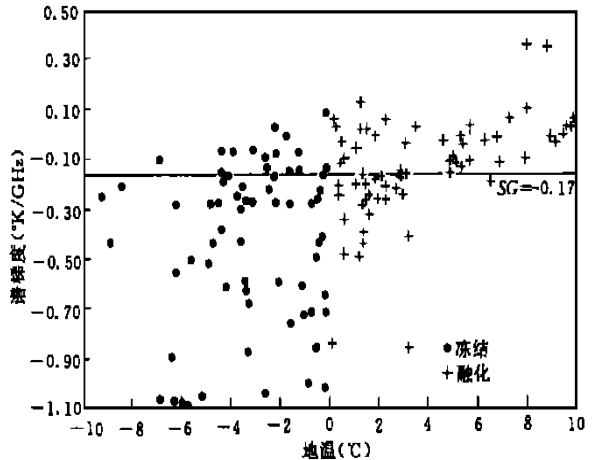


图 2 SG 与地温关系的图示

Fig.2 Scatter plot of SG vs. ground temperature

表 4 SMMR 微波遥感青海高原地表土冻融与地面实况的比较  
Table 4 Comparison of ground truth with SMMR microwave remote sensing on terrainsoil's freeze/thaw condition

季 节	地面实况	SMMR 微波遥感					
		$T_{37H}=222.5\text{ K}$		$SG=-0.17(\text{ K / GHz})$		$SG=4.26-0.0200 \times T_{37H}(\text{ K / GHz})$	
		冻 结	融 化	冻 结	融 化	冻 结	融 化
春 季	冻结(个)	24	12	26	10	29	7
	融化(个)	9	27	15	21	11	25
	准确率(%)	71		67		75	
秋 季	冻结(个)	22	15	29	9	25	12
	融化(个)	19	24	12	21	7	27
	准确率(%)	65		70		73	
春与秋季	冻结(个)	46	27	55	18	54	19
	融化(个)	19	50	27	43	18	52
	准确率(%)	68		69		74	

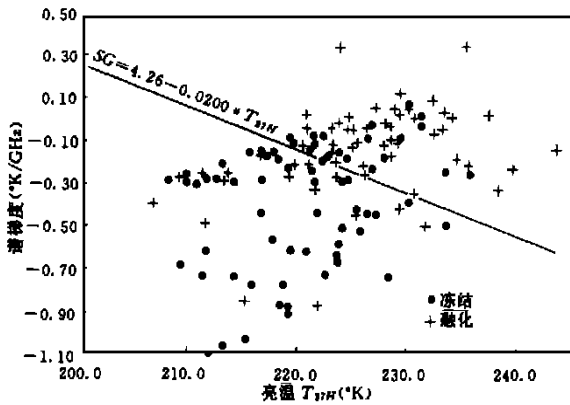


图 3 SG 与  $T_{37H}$  关系的图示  
Fig.3 Scatter plot of SG vs.  $T_{37H}$

差。在微波波段积雪也属相对不均匀透明介质。多波段测量积雪亮温时也将呈负 SG，可成为地表土冻融遥感的干扰因素。但青海高原有雪覆盖时雪厚一般少于 10cm，地表土的冻结常与积雪同步出现。建模 143 个样本中只有 11 个为地面有积雪的记录，其相应地表土记录均为冻结。因此区内积雪不会严重干扰微波遥感冻融。反之，微波遥感积雪时，冻土的出现却是需加考虑的干扰因素<sup>[8]</sup>。

### 5 初步应用

图4(a)、(b)、(c)、(d)分别为 4 月 1—5 日、4 月 13—17 日、5 月 7—11 日及 6 月 30 日—7 月 4 日境内冻融范围变化的监测结果。它们的冻区分别占全境的 85%、55%、22% 及 1%。所以青海高原 4 月初仍冰封大地，只有高原边缘北部及东部的低海拔处开始融化。4 月中旬高原主体地表开始融化，但横贯高原的山体及山麓地带仍封冻，5 月初山体区还保留封冻。直至 7 月初，只有境内昆仑山与唐古拉山系的可可西里及祖尔肯乌拉山区，仍呈冻结。再次证实判别模式是可靠的。7 月已是仲夏，但一些常年冻封雪山地表，自然仍呈冻结状态。秋季冻融范围变化表明，1983 年 11 月上旬近一半面积已进入冻结状态。所建模式对同期青藏高原其它地区尚有的 61 个样本校核结果，准确率达 81%，即它可有效扩展用到青藏高原全境。因为它与青海高原子区的自然环境类同，其它环境下应用本模式时，统计系数将有所变化。

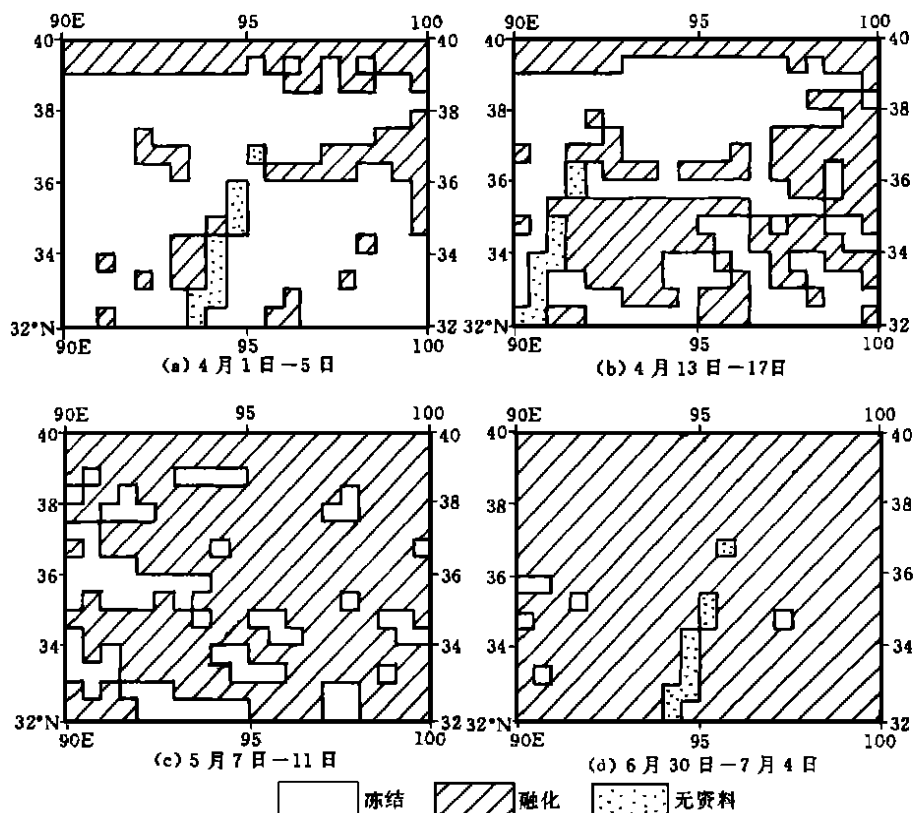


图 4 青海高原地表土冻融分布

Fig.4 Distribution of the soil's freeze/thaw condition in Qinghai Plateau on

### 参 考 文 献

[1] 徐学祖, 陶兆祥, 付素兰. 典型融冻土的热学性质. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊, 第 2 号. 科学出版社, 1981, 55-71.

[2] Zuerndorfer, B. W. et al. Mapping Freeze/Thaw Boundaries with SMMR Data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1990, **52**, 199-225.

[3] Ulaby, F. T. et al. Microwave Remote Sensing, Active and Passive. Addison-Wesley, Reading MA. 1981, 186-225.

[4] Hoekstra, P. et al. Dielectric Properties of Soils at UHF and Microwave Frequencies. *JGR*, 1974, **79**, 1699-1708.

[5] Zuerndorfer, B. W., England, A. W., Wakefield, G. G. The Radiobrightness of Freezing Terrain. *Proc. of IGARSS 89, Vancouver, B. C.*, 10-14 July, 1989, 2748-2751.

[6] England, A. W. et al. Radiobrightness of Diurnal Heated Freezing Soil. *IEEE Trans GRS*, 1990, **28**, 464-475.

[7] Engman, E. T. Applications of Microwave Remote Sensing of Soil Moisture for Water Resources and Agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 1991, **35**, 213-226.

[8] 曹梅盛, 李培基, Robinson D. A. 等. 中国西部积雪 SMMR 微波遥感的评价与初步应用. *环境遥感*, 1993, **8** (4): 260-269.

### 作 者 简 介

曹梅盛, 男, 1937 年 6 月生, 研究员。1960 年清华大学水利工程系毕业。现主要从事遥感技术在冰冻圈研究中的应用以及全球气候变化与冰川积雪动态等方面研究。国内外期刊或文集上发表论文 50 余篇, 并参与“气候变化对西北华北水资源的影响”等多部专著的编写。

## Monitoring Terrain Soil Freeze/Thaw Condition on Qinghai Plateau in Spring and Autumn Using Microwave Remote Sensing

Cao Meisheng

(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences Lanzhou 730000)

A.T.C.Chang

(NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland MD 20771)

**Abstract** The station temperature measurements at 5 cm depth in Qinghai Plateau are compared with the records of horizontally polarized brightness temperature at 37 and 18 GHz from SMMR in 1983. The statistical analysis for classification freeze/thaw condition is used to determine a comprehensive algorithm of two parameters: brightness temperature at 37 GHz and spectral gradient of brightness temperature. It is partly considered that the influence of moisture content on classification, the accuracy of classification still reaches 74%. Since the Qinghai Plateau is located in an arid environment, the soil moisture content is low in Spring and the spectral gradient does not affect the increasing accuracy for classification.

**Key words** Freeze/thaw of terrain soil, Microwave remote sensing, Qinghai Plateau