

三江源地区卫星被动微波遥感特性的初步分析

王振占, 殷晓斌

中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080

[摘要] 微波可以穿透云层, 可以全天候监测目标区域, 还可以比较有效地分辨水体、植被、冰雪和荒漠等。因此, 微波遥感资料是研究地表类型众多的三江源地区的有效手段。全球第一个星载全极化微波辐射计 WindSat 测量的第 3 和第 4 个 Stokes 参数 T_3 和 T_4 , 作为前所未有被卫星传感器大面积、长时间序列测量的亮温, 为三江源地表目标的探测研究提供了新的工具和方法。仅使用垂直和水平极化亮温 T_V 和 T_H , 会将小面积水体和沼泽误识别成荒漠。结合 WindSat 辐射计所测量的 4 个 Stokes 参数, 可以较好地分辨三江源地区的典型目标, 例如雪山、湖泊和荒漠等, 有利于消除由于地表目标识别错误导致的土壤湿度研究可能存在的潜在误差。 T_V , $T_V - T_H$, $MPDI$ ($MPDI = (T_V - T_H) / (T_V + T_H)$) 以及 T_3 等值线的走向基本体现出西南东北走向, 这与该区域植被分布自东南向西北为针叶林、高山草甸草原、干旱草原及荒漠的特点密切相关。冰雪融化和凝结, 以及植被的生长和消亡, 使得该区域微波辐射的季节性变化显著。前视和后视垂直极化亮温 T_V 及 T_3 的差值表明, 该区域的微波辐射随观测方位角的变化是, 雪山积雪冰川和湖区的辐射方向性较强, 而植被和荒漠的辐射方向性较弱。

[关键词] 卫星遥感; 三江源地区; 微波辐射特性; 全极化微波辐射计

[中图分类号] P3

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)16-0022-08

Priliminary Analysis on Polarimetric Microwave Radiation in Sanjiangyuan Region

WANG Zhenzhan, YIN Xiaobin

Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract: With its cloud-penetrating capability, the microwave radiometer can provide all-weather information of ground surface, except for rainy areas. WindSat, the first polarimetric microwave radiometer in the world, can measure all of the four Stokes parameters. The third and fourth Stokes parameters, which have never been measured globally and for a long time, can be used to study Sanjiangyuan region. The types of ground, such as water, vegetation, hungriness and so on, can be easily distinguished according to all of the four Stokes parameters. Small lakes and swamps may be mistaken as bare soil or hungriness by using only vertical and horizontal polarimetric brightness temperature T_V and T_H . So, the identification with four parameters can eliminate errors with respect to soil moisture. In this respect, the microwave radiometer is superior in studying Sanjiangyuan, where there are various types of ground. The trends of isolines of T_V , $T_V - T_H$, $MPDI$ ($MPDI = (T_V - T_H) / (T_V + T_H)$) and the third Stokes parameters T_3 are generally southwest-northeast for forest of conifer, plain of meadow, droughty plain, hungriness distributed from southeast to northwest. The microwave radiation changes seasonally along with melting and freezing of ice and snow, growing and decaying of vegetation. The differences between T_V and T_3 of forward looking and back looking show that the microwave radiation of Sanjiangyuan region is anisotropic. The anisotropy of snow and ice and lake is stronger than that of vegetation and hungriness.

Key Words: space-borne microwave remote sensing; Sanjiangyuan region; character of microwave radiation; polarimetric microwave radiation

CLC Number: P3

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)16-0022-08

收稿日期: 2007-06-15

基金项目: 2006 年教育部研究生教育创新计划项目

作者简介: 王振占, 北京市中关村南二条 1 号中国科学院空间科学与应用研究中心, 研究员, 研究方向为微波遥感技术与应用研究、定标方法; E-mail: wzz@nmrs.ac.cn

青藏高原被称为“世界屋脊”、地球的第三极,它的隆起打乱了行星风系的临界尺度,迫使大气环流改变行径,成为一个独立的气候区域,孕育了黄河、长江、澜沧江、恒河、印度河等国内外许多著名的河流,是欧亚大陆上大江、大河发育得最多的区域。青藏高原对全球气候变化有着独特的影响,对青藏高原的研究已经成为全球科学竞争的热点^[1]。三江源地处青藏高原腹地,是世界上海拔最高、面积最大的高原湿地区域,起着各江河水文循环的初始作用。该区域存在的多年冻土层不仅可以防止水分下渗,使植被根系层保持高水分,且有利于营养成分的聚集,促进植被生长。由于大面积高寒湿地的存在,使得在地势高寒、大气储水能力甚差的半干旱气候区内可以存储生命之水,成为亚洲水源地。据资料,长江总水量的 25%、黄河总水量的 49%、澜沧江总水量的 15% 来自该地区^[2,3]。三江源水源如此充沛,有着“中华水塔”甚至“亚洲水塔”的称号。通过对该地区植被覆盖率、土壤湿度以及冰雪面积及厚度等参量的研究,对于评估三江源地区生态环境和水文气象条件的变化具有重要的意义。

微波辐射计数据可以用来研究植被覆盖,同时微波还能穿透一定深度的土层,根据不同频率的微波穿透深度不同,来研究土壤深层的信息^[4],可为冻土研究提供一种新的研究手段^[5]。全极化微波辐射计是一种新型的微波遥感器。与传统的微波辐射不同,全极化微波辐射不但测量目标微波辐射信号的两个正交极化分量,而且测量这两个正交极化分量的复相关量,即在传统微波辐射计功率幅度测量的基础上,进一步测量其相位。全极化微波辐射计的研究和发展,实现了人们在微波遥感中对电磁波频率、相位、幅度和极化的全部信

息的利用,可以获得比传统微波遥感器更多的目标信息。本文通过使用全球第一颗全极化微波辐射计卫星 WindSat 的资料,对三江源地区全极化微波辐射特性进行了初步研究。

1 三江源地区地理特征

三江源地区是指长江、黄河、澜沧江的源头,除在东南部和东部包括了西藏自治区和四川省的一小部分地区外,绝大部分都在青海省境内,地理范围为 $90^{\circ}32'57''\text{E}\sim 100^{\circ}21'47''\text{E}$, $31^{\circ}11'28''\text{N}\sim 35^{\circ}46'28''\text{N}$, 区域面积 $2.63\times 10^5\text{ km}^2$ 。该区域走向为西北-东南,长 900 km,宽 500 km。区内的主要山脉属于东昆仑山及其支脉阿尼玛卿山、巴颜喀拉山、可可西里山和唐古拉山脉。水系及山脉的大体走向与区域走向一致。三江源地区自然资源丰富、地形地貌复杂、自然环境类型多样,具有森林、灌丛、草甸、草原、荒漠、垫状植被、高山流石坡稀疏植被以及沼泽、水生植被等多种植被类型,是世界海拔最高、生物多样性最丰富、最集中的地区^[6]。三江源区具有世界上高海拔地区独一无二的大面积湿地生态系统,包括高原河流、湖泊、沼泽、雪山、冰川等多种湿地类型。其中,沼泽分布率大于 2.5%,是全国分布率最高的地区;有较大支流 180 余条;大小湖泊 16 500 余个;冰川总面积 1 400 km^2 以上,年消融量 10^{10} m^3 。三江源区海拔 3 450~6 621 m,区域内的高度的变化相当剧烈。本区气候类型属典型高原大陆型气候特征,具有寒冷、干旱、多风等特征,年平均气温 $-4\sim 3^{\circ}\text{C}$,年降水量为 260~770 mm,由东南向西北逐渐递减,并具有明显的区域分异。

从分类结果看,区内分布较多的有高山草甸草原、

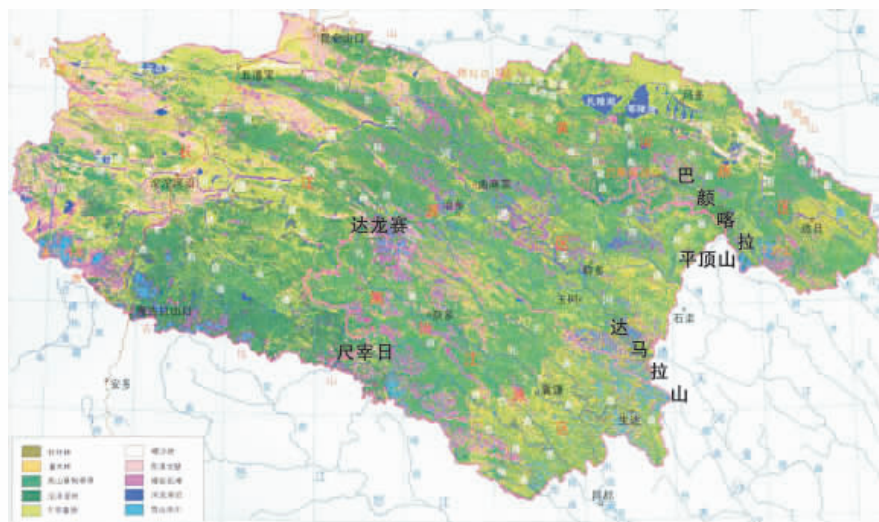


图 1 三江源区景观生态分类图

Fig. 1 Landscape and zoology classification of Sanjiangyuan region

干旱草原和沼泽湿地三种类型。其中,高山草甸草原的面积最大,为 75 264.44 km²,占全区面积的 28.62%;其次是干旱草原,为 68 775.42 km²,占 26.15%;占第三位的是沼泽湿地,40 520.67 km²,占 15.41%;三类合起来的面积为全区的 70.18%,再加上针叶林和灌木林,三江源区 75.58%的地面有植被覆盖^[7]。植被分布特点是自东南向西北为针叶林、灌木林、高山草甸草原、沼泽湿地、干旱草原及荒漠。参见图 1 所示的三江源区景观生态分类图,该图修订自龙晶^[7]。

2 WindSat 全极化微波辐射计简介

微波可以穿透云层,可以全天候监测目标区域,还能比较有效地分辨水体、植被、冰雪和荒漠等。微波传感器重复周期短、刈幅宽,可以准同时地监测大范围地球表面。因此,微波遥感资料是研究地表类型众多的三江源区的有利手段。传统的微波辐射计测量的是目标微波热电磁辐射功率的两个正交的极化分量,通常是 H (水平)和 V (垂直)极化。全极化测量微波辐射计除了测量 H 和 V 两个极化分量外,还将测量这两个正交分量的复相关分量 T_3 和 T_4 ,在电磁学上用 Stokes 极化参数表示,即

$$T_B = \begin{bmatrix} T_V \\ T_H \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_V \\ T_H \\ T_{45^\circ} - T_{-45^\circ} \\ T_l - T_r \end{bmatrix} = k \cdot \begin{bmatrix} \langle |E_V|^2 \rangle \\ \langle |E_H|^2 \rangle \\ 2\text{Re}\langle E_V E_H^* \rangle \\ 2\text{Im}\langle E_V E_H^* \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, E_V, E_H 分别为垂直和水平方向的电场强度, T_H 为辐射亮温的水平极化分量, T_V 为辐射亮温的垂直极化分量; T_3, T_4 分别为第 3 和第 4 个 Stokes 参数,反映了探测目标物体的方位角不对称性; $T_{45^\circ}, T_{-45^\circ}$ 分别为相对正交方向倾斜 45°和 -45°时的线性极化亮温; T_l, T_r 分别为左手圆极化和右手圆极化亮温。

WindSat 于 2003 年 1 月发射,是迄今为止全球第一个星载全极化微波辐射计,可以测量全部 4 个 Stokes 参数。Windsat 由 NRLRSD (Naval Research Laboratory Remote Sensing Division) 和 NC (Naval Center) 研制开发,主要是为 IPO (Integrated Program Office, US Navy and National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System) 提供空间技术服务。WindSat 辐射计有 5 个通道: 6.8, 10.7, 18.7, 23.8 和 37 GHz, 入射角分别为 53.5°, 49.9°, 55.3°, 53.0°和 53.0°, IFOV (Integrated Field Of View) 分别为 40 km×60 km, 25 km×38 km, 16 km×27 km, 12 km×20 km 和 8 km×13 km。其中, 10-, 18-, 和 37-GHz 通道可以全极化测量 T_V, T_H, T_3 和 T_4 , 6- 和 23-GHz 通道只测量 T_V 和 T_H ^[8]。

本文使用了 2003 年 2 月-2003 年 11 月总共 10 个

月的 WindSat 卫星的 Sensor Data Records (SDRs) 数据进行相应的分析研究, SDRs 数据版本为 1.9.0。 T_3 和 T_4 作为前所未有被卫星传感器大面积、长时间序列测量的亮温, 将成为为地表目标探测研究提供的新工具和方法。

3 三江源地区微波辐射特性分析

使用微波微波辐射计监测地表参量的相关研究已有相当长的历史, 研究参量包括土壤湿度、植被覆盖率、冰雪面积及厚度等^[9-18]。Pampaloni 等分别对 10 GHz 和 36 GHz 的极化差 ($\Delta T_{10} = T_{bv10} - T_{lh10}$, $\Delta T_{36} = T_{bv36} - T_{lh36}$) 进行了研究, 结果表明 ΔT_{10} 的数值对于裸土来说一般大于 15 K, 而 ΔT_{36} 则小一些; 对于作物覆盖地, ΔT_{10} 和 ΔT_{36} 都非常小, 有时甚至为负值。作为植被指数, 其变化范围为: ΔT_{10} 的数值对于裸土来说一般大于 15 K, 而 ΔT_{37} 则小些; 对于作物覆盖地, ΔT_{10} 和 ΔT_{37} 都非常小, 甚至有时为负值^[9]。Choudhury 等利用 ΔT_{37} 监测全球覆盖状况时, 研究了 ΔT_{37} 的取值范围, 结果为: 浓密植被区 ΔT_{37} 一般小于 5 K, 如巴西热带雨林; 稀疏植被区一般大于 20 K, 如撒哈拉沙漠、戈壁及沙特阿拉伯沙漠地区; 开放水面的 ΔT_{37} 大于 40 K^[10]。Wang 等论述了地表植被对微波亮度温度的强烈影响, 特别是对高频段亮度温度的影响^[11]。极化比指数 $MPDI (MPDI = (T_V - T_H) / (T_V + T_H))$ 是一个监测植被状况较好的指数, $MPDI < 0.03$ 表示有植被覆盖地区, $MPDI > 0.03$ 表示是荒漠或者水体^[18]。

3.1 地表典型目标的 4 个 Stokes 参数亮温差异

图 2 根据 2003 年 4 月 5 日下行前视 10.7 GHz 的 WindSat 数据绘制而得, (a) 是垂直极化亮温 T_V , (b) 是垂直极化亮温 T_V 与水平极化亮温 T_H 之差, (c) 和 (d) 分别是第 3 个和第 4 个 Stokes 参数。可以看出, 仅用一轨前视数据即可覆盖几乎整个三江源区; 结合所有 4 个 Stokes 参数, 可以较好地分辨出三江源区的典型目标。图 2(a) 和 (b) 表明, $T_V, T_V - T_H$ 及 T_3 等值线的走向基本体现出西南东北走向, 这与植被分布自东南向西北为针叶林、高山草甸草原、干旱草原及荒漠的特点密切相关, 参见图 1。

在图 2(a) 中, 低温区域分别对应于: ① 玛卿岗山 (6 282 m), 中心坐标 (99.4°E, 34.8°N); ② 巴颜喀拉山 (5 267 m), 中心坐标 (99°E, 33.3°N); ③ 扎陵湖、鄂陵湖区, 中心坐标 97.4°E, 34.9°N; ④ 达马拉山, 中心坐标 (97.6°E, 32.6°N); ⑤ 达龙赛山 (5 496 m), 中心坐标 (95°E, 33.5°N); ⑥ 尺宰日山 (5 403 m), 中心坐标 (95°E, 31.8°N); ⑦ 唐古拉山 (6 205 m), 中心坐标 (91°E, 33.3°N)。

以上 7 个目标的大体位置参见图 2(a) 中的标号。与图 2(a) 的低温区域对应的位置, 图 2(b) 均存在数个

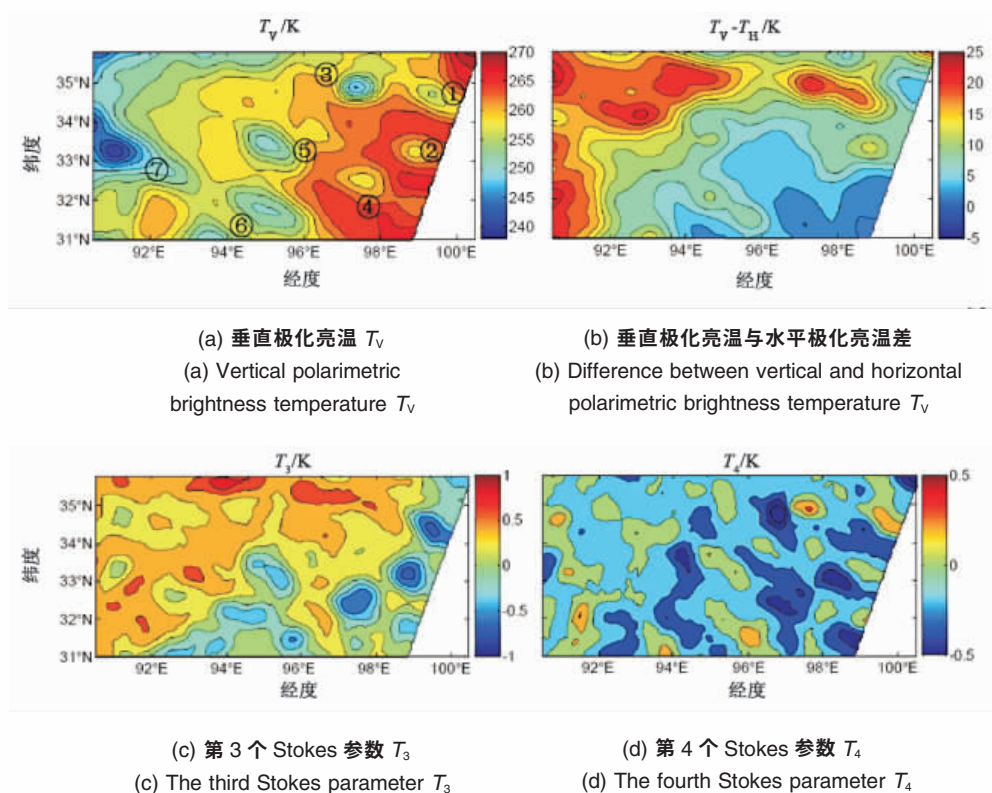


图 2 2003 年 4 月 5 日降轨前视 10.7 GHz 的 WindSat 数据示意图

Fig. 2 Brightness temperature of forward-view in descending pass at 5th April, 2003

高温差区域。其中,目标③的扎陵湖、鄂陵湖对应的高温区域比较明显,量值超过 25 K,其他雪山对应的高温区域的量值一般为 10~15 K,目标④的达马拉山区域亮温差值小于 10 K。图 2(c)表明,图 2(a)的 6 个雪山的低 T_V 区域, T_3 均小于 0;而目标③的扎陵湖、鄂陵湖对应的区域 T_3 大于 0。因此,结合下行轨道前视 10.7 GHz 的 T_V , $T_V - T_H$ 和 T_3 可以很容易区分湖泊与冰雪。

图 2(b)表明, $91^\circ\text{E} \sim 94^\circ\text{E}$, $34^\circ\text{N} \sim 35.5^\circ\text{N}$ 存在亮温差量值大于 20 K 的区域,对应于干旱草原,该区域无法明显地根据 T_V , T_3 和 T_4 进行分辨。图 2(d)表明, T_4 的量值很小,一般小于 ± 0.5 K,只能粗略地看出在前述 7 个目标区域, T_4 总是出现正负交替。目标③的扎陵湖、鄂陵湖区域的 T_4 变化相当剧烈,绝对值超过 2 K,这可能是由于辐射计探测波束由陆地到水面(反之亦然)时,左右圆极化天线方向图轻微未对准,导致计算 T_4 时清零不当所造成的^[19]。

3.2 地物目标的垂直和水平极化微波辐射特性

2003 年 2 月、5 月、8 和 11 月的 WindSat 升轨月平均数据如图 3 和图 4 所示。图 3 由 10.7 GHz 升轨刈幅数据平均到 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 经纬度网格绘制而得,这与 WindSat 的 10.7 GHz 通道分辨率 $25 \text{ km} \times 38 \text{ km}$ 大致相当。图 4 由 37 GHz 升轨刈幅数据平均到 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 经纬

度网格绘制而得,这与 WindSat 的 37 GHz 通道分辨率 $12.5 \text{ km} \times 12.5 \text{ km}$ 大致相当。图 3 和图 4 表明如下结果。

1) 34°N 以南的前视和后视垂直极化亮温 T_V 的差值(Forward-Backward)的高值部分(深红色)呈现西北-东南走向。自下而上各条带分别很好地对应于唐古拉山脉、达龙赛峰-达马拉山脉、巴颜喀拉山脉等山脉。这些亮温差值的高值条带在冬季最明显,春季减弱,夏季最小,秋季开始增强。这可能是由于太阳的影响,南侧的积雪和冰川少于北侧,而南侧植被多于北侧植被等原因造成的微波辐射随观测方位角变化,简称微波辐射方向性。条带量值的季节变化则与植被的生长枯萎,以及冰雪的融化凝结有关。同时也说明积雪和冰川辐射的方向性强于植被、土壤和岩石。37 GHz 前后视亮温差的量级大于 10.7 GHz,说明 37 GHz 的 T_V 对积雪和植被辐射的方向性更加敏感。

图 3 (a2)~(a4) 的扎陵湖、鄂陵湖区域 (97.4°E , 34.9°N) 均出现了 10.7 GHz 的亮温差正负号明显交替的现象,这与 T_4 在水-陆-水交界处出现的正负号明显交替的现象非常相似,但原因未知。图 3(a1)中并未出现此现象,可能是由于 2 月份湖面结冰的原因。但是, 37 GHz 的亮温差并未出现此现象。

降轨的前视和后视亮温差 (Forward-Backward)与

图 3 和图 4 所示升轨亮温差的分布类似, 量级大致相等, 但符号相反。WindSat 采用前视和后视扫描机制测量, 前视扫描角 (波束地面投影与卫星轨迹方向的夹角) $27.4^{\circ} \sim 38.9^{\circ}$, 后视扫描角 $144.8^{\circ} \sim 178.4^{\circ}$, 前视刈幅宽度为 1 000 km, 后视刈幅宽度为 400 km。前视和后视亮温差 (Forward-Backward) 大致体现了该区域地表微波辐射 180° 方向的差别。由于 WindSat 地球方位角 (波束地面投影与正北方向的夹角) 的取值范围有限, 无法确定亮温随 360° 方位角变化的具体表达式, 因此只使用平均的前视数据进行相应分析。今后将结合 AMSR 数据进行更详尽的地表目标微波亮温辐射方向特性研究。

2) 植被指数 $T_V - T_H$ 和 $MPDI$ 等值线的走向基本体现出西南东北走向。这一特征与植被分布自东南向西北为针叶林、高山草甸草原、干旱草原及荒漠的特点密切相关。参见图 1、图 3 (b1)~(b4), (c1)~(c4) 和图 4 (b1)~(b4), (c1)~(c4)。

为表述方便, 命名 $(92^{\circ}\text{E}, 31^{\circ}\text{N})$, $(100.5^{\circ}\text{E}, 31^{\circ}\text{N})$, $(100.5^{\circ}\text{E}, 35^{\circ}\text{N})$ 3 点连线确定的三角区域为 A 区, 参见

图 3 (b1)~(b4)。该区域的 $T_V - T_H$ 和 $MPDI$ 值比较小, 说明该区域植被较多。A 区 10.7 GHz 的 $T_V - T_H$ 和 $MPDI$ 值为春季最小、秋季最大, 而 37 GHz 的值为夏季最小、冬季最大。这说明 37 GHz 与植被覆盖的关系密切, 而 10.7 GHz 微波可以穿透植被, 其 $T_V - T_H$ 和 $MPDI$ 值包含了一部分土壤湿度信息^[20, 21], 因此 10.7 GHz 的植被指数的季节变化相对于 37 GHz 迟滞了一段时间。

为方便表述, 命名 $(90.5^{\circ}\text{E}, 33^{\circ}\text{N})$, $(96^{\circ}\text{E}, 35^{\circ}\text{N})$, $(90.5^{\circ}\text{E}, 35^{\circ}\text{N})$ 3 点连线确定的三角区域为 B 区, 参见图 3 (b1)~(b4)。该区域的 $T_V - T_H$ 和 $MPDI$ 值比较大, 说明该区域基本是裸露土壤类型, 这与图 1 所示的岩石滩和荒漠戈壁一致。B 区 10.7 GHz 和 37 GHz 的植被指数均为冬季最小、夏季最大, 表明该区域夏季土壤湿度最大, 冬季土壤湿度最小。B 区 10.7 GHz 和 37 GHz 植被指数的季节变化在时间上基本一致。这也再次印证了前面关于 10.7 GHz 微波可以穿透植被, 其植被指数包含了土壤湿度信息的结论。

3) 植被指数 $T_V - T_H$ 和 $MPDI$ 值在扎陵湖、鄂陵湖区域 $(97.4^{\circ}\text{E}, 34.9^{\circ}\text{N})$ 的量值较大, 某些季节甚至大于裸

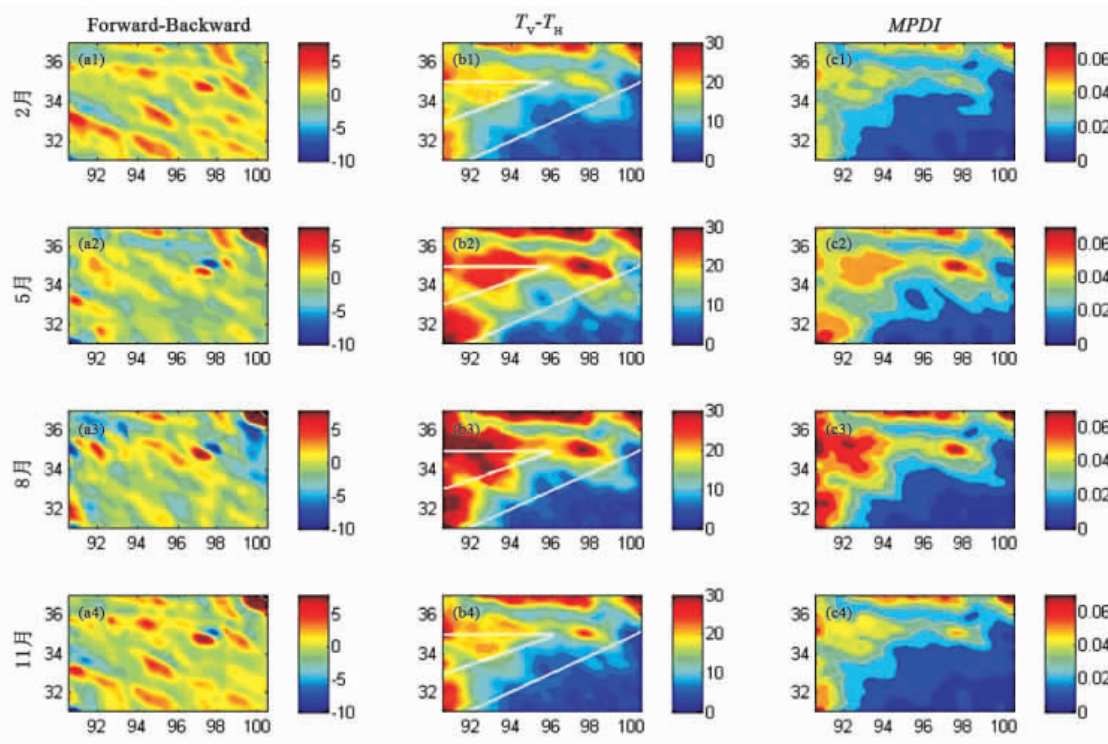


图 3 WindSat 10.7 GHz 升轨的月平均数据

注: 自上到下分别为 2, 5, 8, 11 月的月平均数据, 自左至右分别为前视与后视垂直极化亮温 T_V 的差值, 前视垂直极化亮温 T_V 与水平极化亮温 T_H 的差值 $T_V - T_H$, 前视数据的 $MPDI$ 值, 网格分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 经纬度

Fig. 3 Monthly-averaged data of ascending pass at 10.7 GHz

Notes: The data of February, May, August, November are shown from top to bottom. The difference between forward-view and backward-view, the difference between T_V and T_H and $MPDI$ of forward-view are shown from left to right. The resolution of grid is $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$

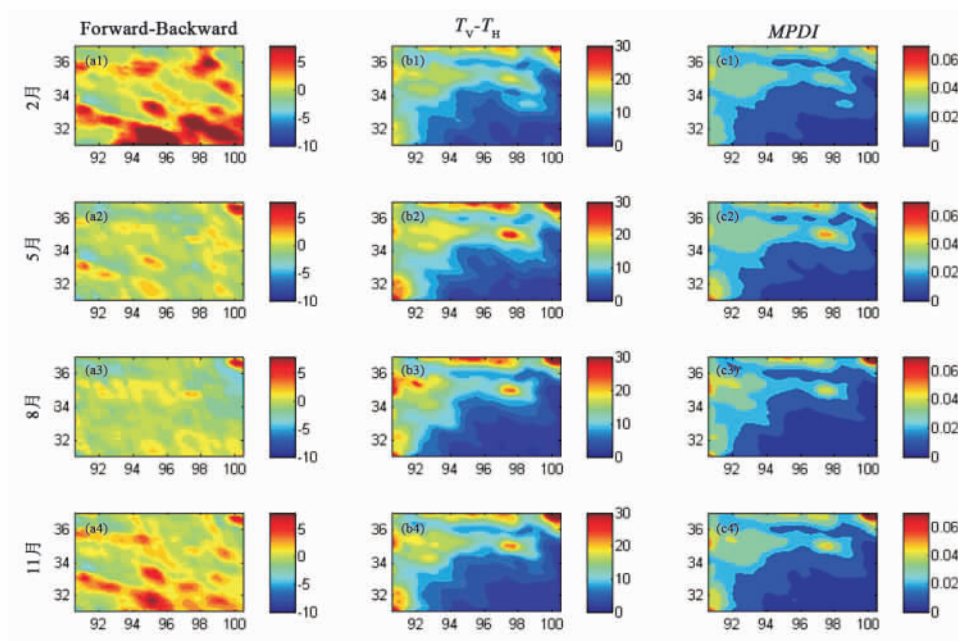
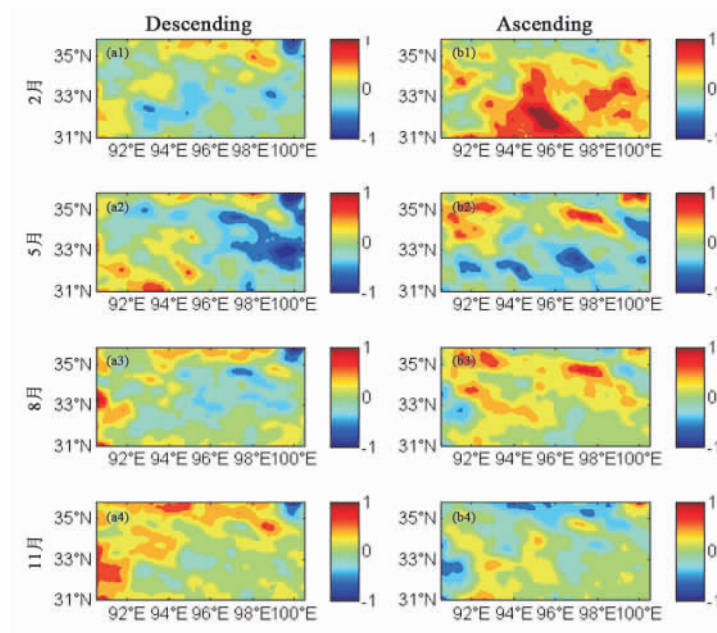


图 4 WindSat 37 GHz 升轨月平均数据

注：自上到下分别为 2, 5, 8, 11 月的月平均数据，自左至右分别是前视与后视垂直极化亮温 T_V 的差值，前视垂直极化亮温 T_V 与水平极化亮温 T_H 的差值 $T_V - T_H$ ，前视数据的 MPDI 值，网格分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 经纬度

Fig. 4 Monthly-averaged data of ascending pass at 37 GHz

Notes: The data of February, May, August, November are shown from top to bottom. The difference between forward-view and backward-view, the difference between T_V and T_H and MPDI of forward-view are shown from left to right. The resolution of grid is $0.1^\circ \times 0.1^\circ$

图 5 WindSat 10.7 GHz 前视和后视 T_3 的差值 $T_{3F} - T_{3B}$ 的月平均数值

注：自上到下分别是 2, 5, 8, 11 月的月平均数据，自左至右分别是下行轨道和上行轨道的 T_3 前后视差值，网格分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 经纬度

Fig. 5 Monthly-averaged difference of forward-view and backward-view of T_3 ($T_{3F} - T_{3B}$) at 10.7 GHz

Notes: The data of February, May, August, November are shown from top to bottom. The difference between forward-view and backward-view of descending pass and ascending pass are shown from left to right. The resolution of grid is $0.25^\circ \times 0.25^\circ$

裸土的指数。反演土壤湿度时,如果不考虑面积不够大也不足够小的水体的定位问题,可能会将该区域误认为是裸土,从而导致土壤湿度反演的巨大误差。对于使用 WindSat 辐射计数据进行相关反演的应用来讲,可以通过 T_4 及 10.7 GHz 前后视亮温差在研究区域出现明显正负号交替的现象初步判断此类水体目标。

3.3 地物目标的相关通道亮温分布特点

2003 年 2,5,8,11 月的 WindSat 10.7 GHz 的前视与后视 T_3 的差值 $T_{3F}-T_{3B}$ 的月平均数值如图 5 所示,网格分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 经纬度,这与 WindSat 10.7 GHz 通道 $25 \text{ km} \times 38 \text{ km}$ 的分辨率大致相当。三江源地区地物目标的相关通道的亮温分布具有如下特点。

1) 三江源区大部分区域的下行轨道和上行轨道的 $T_{3F}-T_{3B}$ 的符号相反,表明该区域的 T_3 和 T_V 一样具有方向性。 34°N 以南的前视与后视 T_3 的差值 $T_{3F}-T_{3B}$ 呈现西北-东南走向。自下而上各条带分别很好地对应于达龙赛峰-达马拉山脉、巴颜喀拉山脉等山脉。巴颜喀拉山等雪山区域对应的 $T_{3F}-T_{3B}$ 量值较大,且冬季量值明显高于夏秋两季,说明冬季积雪和冰川辐射的方向性强于夏秋季的植被,证实了极化辐射计可以监测冰川各向异性的猜测^[22]。

2) 雪山区域上行轨道的 $T_{3F}-T_{3B}$ 量值大于下行轨道的量值,参见图 5(a1)、(a2)、(b1)和(b2)。由于上行轨道卫星的运行方向与山体走向一致,而下行轨道卫星运行方向与山体走向近似正交,因此可以推断沿雪山冰川走向的微波辐射方向信号强于其正交方向的方向信号。

3) 2 月时,雪山区域上行轨道 $T_{3F}-T_{3B}>0$,参见图 5(b1);而 5 月时,这些区域的 $T_{3F}-T_{3B}<0$,参见图 5(b2)。冬春两季 $T_{3F}-T_{3B}$ 符号的变化是由冰川在春季融化造成的。夏秋两季冰川大面积减少以及植被的大量出现,使得 $T_{3F}-T_{3B}$ 的变化趋于缓和,参见图 5(b3)和(b4)。前视与后视垂直极化亮温 T_V 的差值并无与此类似的在不同季节符号变化的现象,参见图 3 和图 4。

4) 扎陵湖和鄂陵湖区对应的 $T_{3F}-T_{3B}$ 量值在春夏两季高于秋冬两季,但是一年四季其量值的符号没有改变,与前述和雪山冰川的 $T_{3F}-T_{3B}$ 在冬春两季存在强烈符号变化的特性不同。这体现了冰川和水体辐射方向特性的不同,有利于识别冰川和水体。

5) 中心为 ($99^\circ\text{E}, 33^\circ\text{N}$) 的区域对应于巴颜喀拉山脉(平顶山)南麓和雅砻江上游流域。该区域 5 月份下行轨道 $T_{3F}-T_{3B}<-1$,参见图 5(a2)。该现象可能是因为山脉的冰川和积雪融化,下行轨道方向恰好与冰水混合物沿山势流下的流向一致,所以使得 $T_{3F}-T_{3B}$ 量值显得比较突出。

4 结论

全球第一个星载全极化微波辐射计 WindSat 测量的 Stokes 参数 T_3 和 T_4 , 作为前所未有的被卫星传感器大面积、长时间序列测量的亮温,为三江源地表目标的探测研究提供了新工具和方法。

植被指数 T_V-T_H 和 MPDI 在扎陵湖、鄂陵湖区域 ($97.4^\circ\text{E}, 34.9^\circ\text{N}$) 的量值较大,某些季节甚至大于裸土的指数。反演土壤湿度时如果不考虑面积不够大也不足够小的水体的定位问题,可能会将该区域误认成裸土,从而导致土壤湿度反演的巨大误差。结合 WindSat 辐射计所有 4 个 Stokes 参数,可以比较好地分辨三江源区的典型目标,例如雪山、湖泊和荒漠等,有利于消除前述土壤湿度研究存在的潜在误差。

T_V 、(T_V-T_H)、MPDI 及 T_3 等值线的走向基本体现出西南东北走向,这与该区域植被分布自东南向西北为针叶林、高山草甸草原、干旱草原及荒漠的特点密切相关。前视和后视垂直极化亮温 T_V 的差值以及 T_3 的差值表明该区域的微波辐射随观测方位角变化,简称具有辐射方向性。山脉和湖区的辐射方向性较强,而植被和荒漠的辐射方向性较弱。下一步将结合资源卫星资料和实测资料进行三江源地表目标辐射方向特性的定量研究,这有利于提高土壤湿度等反演应用研究的精度。

三江源的地表类型众多,而且类型随地理位置的变化剧烈,目前阶段微波辐射计分辨率较低,一个视场角 (IFOV) 的测量值可能包括众多地表类型的贡献。因此,要准确定量反演高分辨的土壤湿度、植被覆盖或者冰雪量比较困难。建议采用总水量评估的方法研究该区域含水量,即将植被含水量、土壤含水量以及湖泊冰雪水量总和作为一个整体进行研究。

致谢: WindSat 数据由 WindSat 研究小组提供。

参考文献 (References)

- [1] 王磊, 李震, 陈权. 植被覆盖地区 AMSR-E 反演土壤水分算法研究[J]. 高技术通讯, 2006, 16(2): 204-209.
WANG Lei, LI Zhen, CHEN Quan. Soil moisture retrieval with AMSR-E in the region with vegetation coverage[J]. High Technology Letters, 2006, 16(2): 204-209.
- [2] 王磊, 李震, 陈权. MPDI 在微波辐射计植被覆盖区土壤水分反演中的应用[J]. 遥感学报, 2006, 10(1): 34-38.
WANG Lei, LI Zhen, CHEN Quan. The application of MPDI during the soil moisture retrieval from radiometer in the region with vegetation cover [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(1): 34-38.
- [3] 李林, 李凤霞, 郭安红, 等. 近 43 年来“三江源”地区气候变化趋势及其突变研究[J]. 自然资源学报, 2006, 21(1): 79-85.
LI Lin, LI Fengxia, GUO Anhong, et al. Study on the climate change trend and its catastrophe over "San-

- jiangyuan" region in recent 43 years[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(1): 79-85.
- [4] 杨虎, 施建成. FY-3 微波成像仪地表参数反演研究[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(1): 194-200.
YANG Hu, SHI Jiancheng. On the estimation of land surface parameters by using FY-3A microwave radiometer imager (MWRI) [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2005, 20(1): 194-200.
- [5] 董立新, 王文科, 孔金玲, 等. 黄河上游玛多县生态环境变化遥感监测及成因分析 [J]. 水土保持通报, 2005, 25 (4): 68-72.
DONG Lixin, WANG Wenke, KONG Jinling, *et al.* Super-vise of eco-environmental change based on RS methods and causal analysis in Maduo County in upriver regions of the Yellow River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005, 25(4): 68-72.
- [6] 石磊, 马俊飞, 杨太保. 基于“GIS/RS”技术的三江源地区生态环境建设的研究 [J]. 水土保持研究, 2005, 12 (4): 212-214.
SHI Lei, MA Junfei, YANG Taibao. Research frame of ecological environment building based on "GIS/RS" technology in three river resource region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(4): 212-214.
- [7] 龙晶. 三江源区位置面积及景观生态遥感研究[J]. 林业资源管理, 2005, 4: 30-36.
LONG Jing. Remote sensing analysis of the Three-rivers' Headstream Region [J]. Forest Resources Management, 2005, 4: 30-36.
- [8] 车涛, 李新, 高峰. 青藏高原积雪深度和雪水当量的被动微波遥感反演[J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 363-368.
CHE Tao, LI Xin, GAO Feng. Estimation of snow water equivalent in the Tibetan Plateau using passive microwave remote sensing data (SSM/I) [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(3): 363-368.
- [9] 高峰, 王介民, 孙成权, 等. 微波遥感土壤湿度研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2001, 16(2): 97-102.
GAO Feng, WANG Jiemin, SUN Chengquan, *et al.* Advances in study on microwave remote sensing of soil moisture[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2001, 16(2): 97-102.
- [10] 刘敏超, 李迪强, 温琰茂. 基于 GIS 的三江源地区物种多样性保护优先性分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(4): 51-54.
LIU Minchao, LI Diqiang, WEN Yanmao, *et al.* Assessment of the priorities of species diversity conservation in Sanjiangyuan region by GIS [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(4): 51-54.
- [11] F T 乌拉比, R K 穆尔, 冯建超. 微波遥感 [M]. 第 1 卷. 侯世昌, 马锡冠, 等译. 北京: 科学出版社, 1988.
ULABY F T, MOORE R, FUNG A. Microwave remote sensing[M]. vol 1. Beijing: Science Press, 1988.
- [12] 张钟军, 孙国清, 朱启疆. 植被层对被动微波遥感土壤水分反演影响的研究[J]. 遥感学报, 2004, 8(3): 207-213.
ZHANG Zhongjun, SUN Guoqing, ZHU Qijiang. The study of vegetation effect on passive microwave soil moisture retrieval[J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8 (3): 207-213.
- [13] CHOUDHURY B J, TUCKER C J. Monitoring global vegetation using Nimbus-7, 37 GHz data: Some empirical relations [J]. International Journal of Remote Sensing, 1987, 8(7): 1085-1090.
- [14] DU Y, ULABY F T, DOBSON M C. Sensitivity to soil moisture by active and passive microwave sensors [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(1): 105-114.
- [15] ELLINGSON S W, JOHNSON J T. A polarimetric survey of radio-frequency interference in C- and X-band in the continental United States using WindSat radiometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(3): 105-114.
- [16] GAISER P W, GERMAIN K, TWAROG E, *et al.* The Wind-Sat spaceborne polarimetric microwave radiometer: Sensor description and early orbit performance [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(11): 2347-2361.
- [17] JACKSON T J, SCHMUGGE T J. Vegetation effects on the microwave emission from soils[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 36: 203-210.
- [18] PAMPALONI P, PALOSCIA S. Microwave emission and plant water content: a comparison between field measurements and theory [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1986, 24(6): 900-905.
- [19] RUF C S, ZHANG H P. Performance evaluation of single and multichannel microwave radiometers for soil retrieval [J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 75: 86-99.
- [20] WANG L, LI Z, CHEN Q. Estimating the vegetation coverage with MPDI [C]// Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2005), 6: 4512-4515.
- [21] WANG J R. Effect of vegetation on soil moisture sensing observed from orbiting microwave radiometers [J]. Remote Sensing of Environment, 1985, 17: 141-151.
- [22] YUEH S H, NGHIEM S V, KWOK R. Polarimetric emission from anisotropic media for passive remote sensing of sea ice [C]. Proceedings of IEEE IGRSS'92, 1992, 966-968.

(责任编辑 朱宇)