

星载微波 SSM / I 遥感在中国东北华北 农田的辐射特征分析*

金亚秋

(复旦大学波散射和遥感中心 上海 200433)

摘要 本文研究了星载微波 SSM / I 1996 年在中国东北华北平原农田上 7 个通道辐射亮度温度(T_b)的遥感数据,提出用几个通道 T_b 组合的散射指数和极化指数来分析中国平原地区农田的微波辐射特征,及其随生长季节的时间性变化。星载 SSM / I 数据可以监视农作物的生长和平原地区地面湿度的变化。本文还给出了大气和农作物地表矢量辐射传输的数值模拟结果。

关键词 星载微波, SSM / I, 农作物和农田

1 引言

星载微波被动遥感能穿过云层全天候多年连续地观察全球表面,并还能给出地表覆盖层的内部信息。星载微波遥感已成为当今以至下世纪初最主要的遥感手段。目前在轨运行的防卫气象卫星计划(DMSP)的 SSM / I(特别微波辐射计成像)有 7 个通道(19, 37, 85 GHz 的垂直和水平极化, 22 GHz 的垂直极化)。其两颗卫星 F13, F10 每天下行(DS)和上行(AS)通过时间分别为当地时间: DS-F13 上午 6 点, DS-F10 上午 10 点, AS-F13 下午 6 点, AS-F10 下午 10 点。SSM / I 自 1989 年 F8 开始运行以来已有 8 年。多年连续的全球观察数据,可以为全球性研究和区域性环境监视农业管理等,在时间系列和各空间尺度上提供丰富的信息。DMSP 的 SSM / I 将运行到 2000 年之后,新发展的 SSM / I S(成像和探测)以及 2000 年欧洲的 ESA-MIMR(多通道成像微波辐射计)将有更多的通道和更高的空间分辨率。因此,如何利用多年连续积累的全球多通道极化 T_b 的遥感数据,从中提取大气和各类地表(农田、森林、积雪、沙漠、海洋、海冰等等)的有用信息,是发展星载遥感的根本目的,也是一项可以长期运行的应用广泛的科学研究和开发工作。

对农作物生长的监视和评估,一直是各类遥感(可见光、红外、微波等)的主要问题之一。影响农田

微波辐射特征的主要是农作物生长的物理状态,下垫土壤的湿度,地表的粗糙度,大气水汽和降水,大气和地表的物理温度等。虽然对于农作物的微波散射和辐射有过不少地面车载或机载的测量和理论模拟^[1,2],但是如何利用星载 SSM / I 的遥感数据,分析农田的微波辐射特征,它与农作物生长状态、地表湿度、大气水汽等之间的定量关系,以及随生长季节的时间性变化,几乎还未有过研究。

本文挑选了中国东北和华北平原二地的农田区域,利用 1996 年 1—9 月星载微波 SSM / I 7 个通道的辐射亮度温度(T_b),得到反映农田微波辐射特征及其演变的极化指数和散射指数。用这些指数讨论了星载微波遥感农田的辐射特征,以及随生长季节的时间性变化。本文还给出了大气和农作物地表矢量辐射传输的理论数值模拟,及在 SSM / I 各通道上的 T_b 表现。

2 中国东北华北平原农田的 SSM / I 数据

图 1 给出我国东北辽宁地区(N42.16° E123.17°)1996 年 1—9 月 19, 37, 85GHz 垂直极化 T_b 的 SSM / I DS-F10 数据。从图中可以看出, T_b 随季节性大气和地表的物理温度变化而变化。从图 1 的 1 月份数据表明,由于冰雪粒子特别在高频率 85 GHz 的强散射,而使地面积雪时 85GHz 的 T_b 远小于其它较低频率通道的 T_b 。在 2 月之后积雪融解和物

* 国家自然科学基金项目 49685005, 69771007, 并得到上海科学技术发展中心, 中国科学院长春净月潭遥感开放实验站基金的资助。

收到稿件日期: 1996-10-22; 收到修改稿日期: 1997-04-15

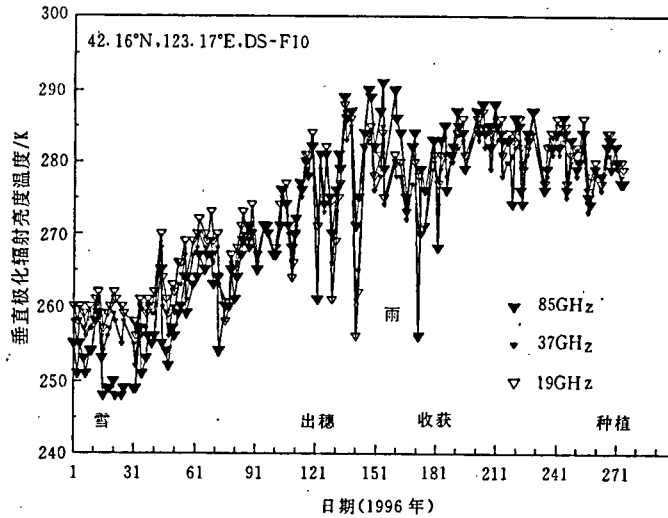


图1 东北辽宁地区农田1996年1—9月垂直极化 T_B 的SSM/I数据

Fig.1 SSM/I data of T_{Bv} over the northeastern China during January—September 1996

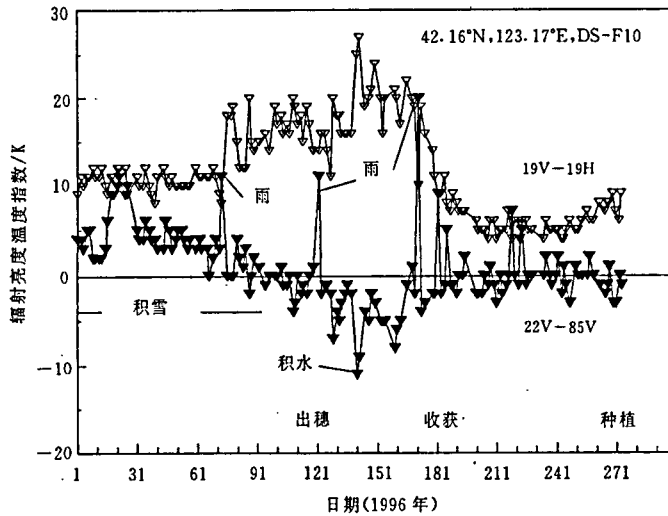


图2 散射指数和极化指数

Fig.2 Scattering and polarization indices during January—September 1996

理温度的升高,使各通道的 T_B 上升。降水粒子的散射同样使 T_{B85} 远小于其它通道的 T_B 。一般地,可用高低两个频率通道 T_B 之差作为散射信号。我们定义散射指数 $SI_V \equiv T_{22V} - T_{85V} > 0$ 来识别积雪和降雨。这里 T_{22V} 是指 22GHz 垂直极化的辐射亮度温度,其它类同。用 22GHz 是因为 22GHz 的大气水汽吸收比 19GHz 更接近于 85GHz 的大气水汽吸收,因此 SI_V 可减小大气水汽的影响因素。

图 2 给出由图 1 SSM / I DS-F10 观察数据得到的散射指数 SI_V 。可以看出,积雪和降雨的散射信号使 SI_V 出现峰值。由于积雪融解和降雨,地面的湿度 M 增加,而使地面极化反射率 r_V, r_H 之间的差异增大。这样,垂直极化与水平极化 T_B 之间的差异 $T_V - T_H$ 增大。定义极化指数 $PI_{19} \equiv T_{19V} - T_{19H}$ 。从图 2 可以

看出,冬季积雪土壤的 PI_{19} 保持在 10K 左右。随地面湿度 M 的增加, PI_{19} 甚至可达 20K 之多。开春之后农作物的生长应能部分遮蔽土壤地面的极化反射,而使 PI_{19} 减小。但若地面湿度有更明显的变化,农作物减小 PI_{19} 的影响就会被抵消。平原地区的 PI_{19} 比山区有灵敏得多的变化。当然,我们还可以定义 PI_{35}, PI_{37} , 但它们更易受大气水汽的影响,其变化的幅度比较小,不如 PI_{19} 更能反映地表和农作物覆盖的变化。

由于地面湿度增大,含水量增加了土壤的介电常数,明显地增强了水平极化反射率 r_H 。在 SSM / I 54° 观察角上,垂直极化反射率 r_V 总是很小的。因此用水平极化 T_B 能更明显地反映出地面湿度的变化。由于 SSM / I 各通道的频率都比较高,对潮湿土

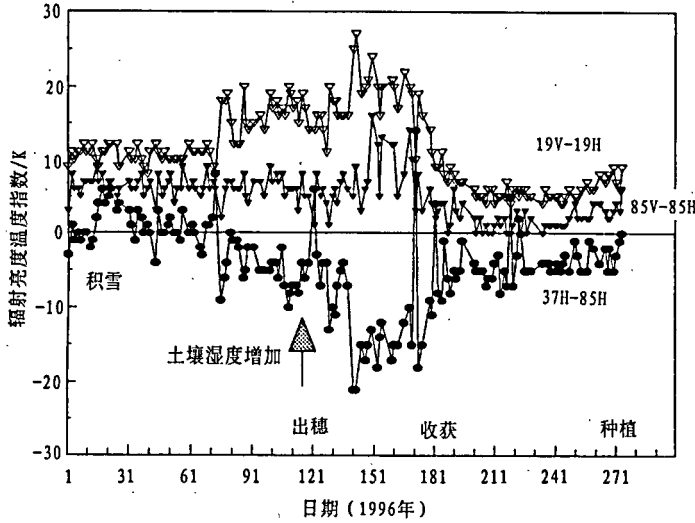


图3 3种 T_B 指数的比较

Fig.3 Comparison of three indices during January—September 1996

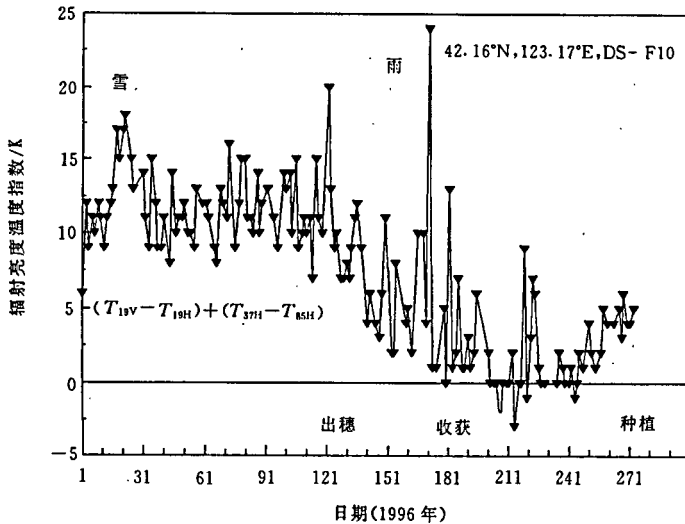


图4 农作物指数 CI 的变化

Fig.4 Variation of crop index CI during January—September 1996

壤的渗透深度都很小,我们这里指的地面湿度即是指地表面的湿度。我们采用 37 和 85GHz 的水平极化散射指数 $SI_H = T_{37H} - T_{85H}$ 来表征地面湿度的变化。图 3 给出 PI_{19} , PI_{85} 和 SI_H 的时间变化。冬小麦耕种生长和收获的时间标志在图中。可以看出,自 2 月份之后,由于地面湿度增加, PI_{19} 上升,而 $SI_H \ll 0$ 。在收获季节,地面湿度不大,长成的农作物和裸露的粗糙地面会减小 PI_{19} 和 PI_{85} 。此时 PI_{19} 约 5K 左右,而 PI_{85} 可接近于 0。

为表现出 T_B 随农作物生长状态的变化,我们定义农作物指数 $CI \equiv PI_{19} + SI_H$ 。二个指数的相加可能减小地面湿度增大而产生的影响。图 4 给出 CI 随

生长季节时间的变化。可以看出,除了积雪和降水事件 CI 有峰值以外, CI 表现了随农作物生长而逐步单调减小的特征性表现,这与农作物生长会遮蔽地表极化反射的估计是一致的。 CI 可以作为农作物生长状态的一个特征指数。

作为另一个例子,我们选华北平原山东 ($N35.16^\circ$, $E116.17^\circ$) 的农田。图 5 给出 SSM/I DS-F10 的 19, 37, 85GHz 垂直极化 T_B 。比较东北地区的图 1,可以看出两地区特别在冬季有明显的不同,此地 1 月份没有积雪,而有较高的 T_B 。图 6 给出 PI_{19} , PI_{85} 和 SI_H ,可与东北地区的图 3 作对照。在春小麦耕种之后, PI_{19} 下降,直至 6 月份有多次降水发生。此后有 PI_{19} 上升和 $SI_H \ll 0$ 。这些变化特征与图 3 是类同的,只是在时间上稍后一个月,且土壤湿度在几个月时间里均能维持比较高的值。图 7 给出农作物指数 CI 。与图 4 相同,除降水事件外,图 7 的 CI 随农作物的生长而有单调下降的特征表现。

图 8 给出 1996 年 5 月下旬 (5 月 20 日—5 月 30 日) 的 $-SI_H (\equiv T_{85H} - T_{37H})$ 平均值与 1 月下旬 (1 月 20 日—1 月 30 日) 的 $-SI_H$ 平均值之差的空间分布。可以看出,在东北辽宁吉林平原地区 5 月份 SI_H 明显增强,而华北平原变化不大。图 9 给出 1996 年 8 月下旬 (8 月 20 日—8 月 30 日) 的 $-SI_H$ 平均值与 1 月下旬 (1 月 20 日—1 月 30 日) 的 $-SI_H$ 平均值之差的空间分布。可以看出,此时华北平原的 SI_H 明显增强。可用 SI_H 来识别水涝灾害的研究¹⁾。

在 5—8 月的降水使华北平原和长江流域以北的华东地区的土壤湿度有明显的增强。在长江流域以南,如江西、浙江、福建、湖南、广东、广西等,由于地形多有山陵起伏或植被茂密,各个 T_B 指数的变化不像东北华北平原那样明显。这里的分析方法不完全适用这些南方地区。而对图 8, 9 中也有明显的 T_B 指数变化的西北沙漠地区的研究,可参见文献 [3]。

3 农田 T_B 及其指数的辐射传输模拟

为使前述分析更为简明,我们用无降水时大气辐射传输方程来作进一步的说明。由 SSM/I 观察

1) 金亚秋. 星载微波 SSM/I 对我国 1996 年 7 月暴雨水灾遥感数据的辐射特征分析. 水科学进展, 1998, (1).

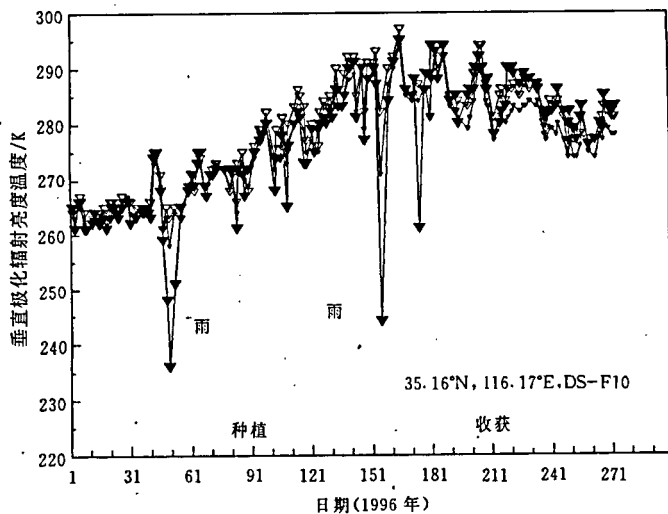


图5 华北平原农田1996年1—9月垂直极化 T_B 的SSM/I数据

Fig.5 SSM/I data of T_{Bv} over the north China during January—September 1996

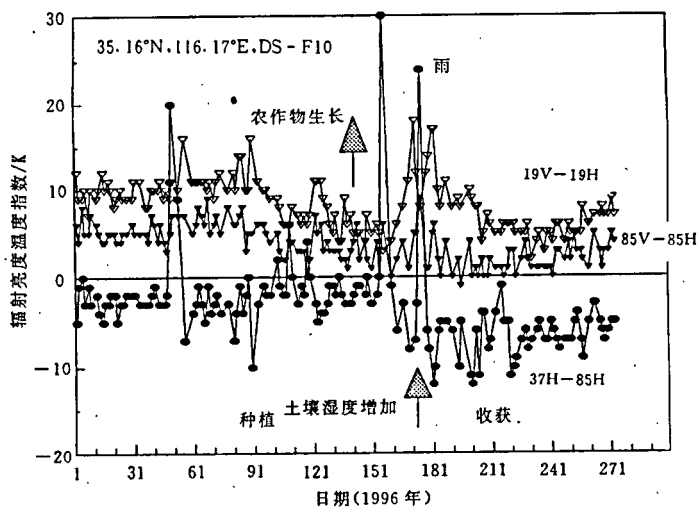


图6 散射指数和极化指数 PI_{19} , PI_{85} , SI_{11}

Fig.6 Scattering and polarization indices during January—September 1996

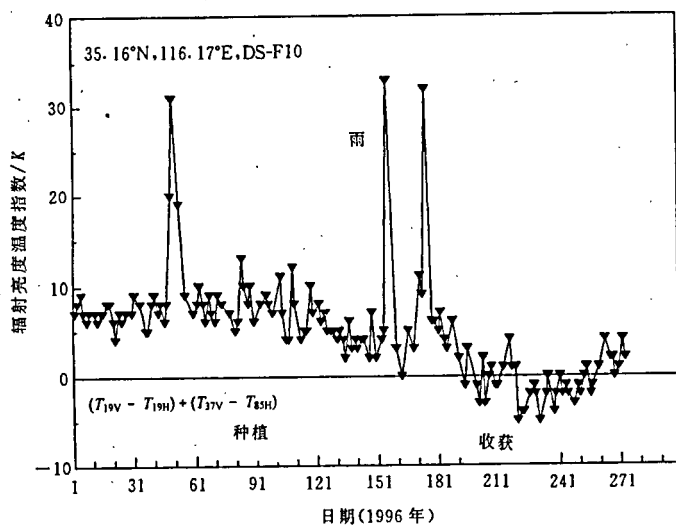


图7 农作物指数 C 的变化

Fig.7 Comparison of three indices during January—September 1996

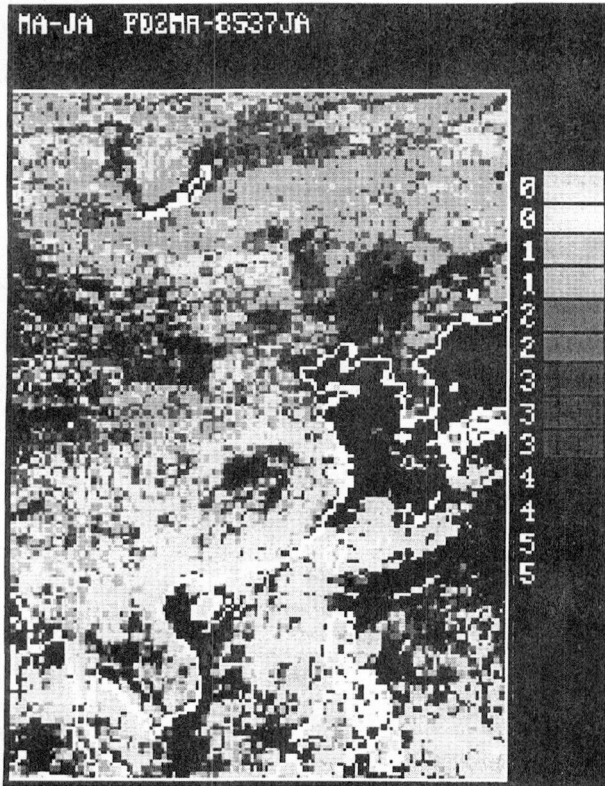


图8 1996年5月下旬与1月下旬 $-SI_H$ 平均值之差的空间分布

Fig.8 Spatial variation of the index $-SI_H$ difference between May 20—30 and January 20—30

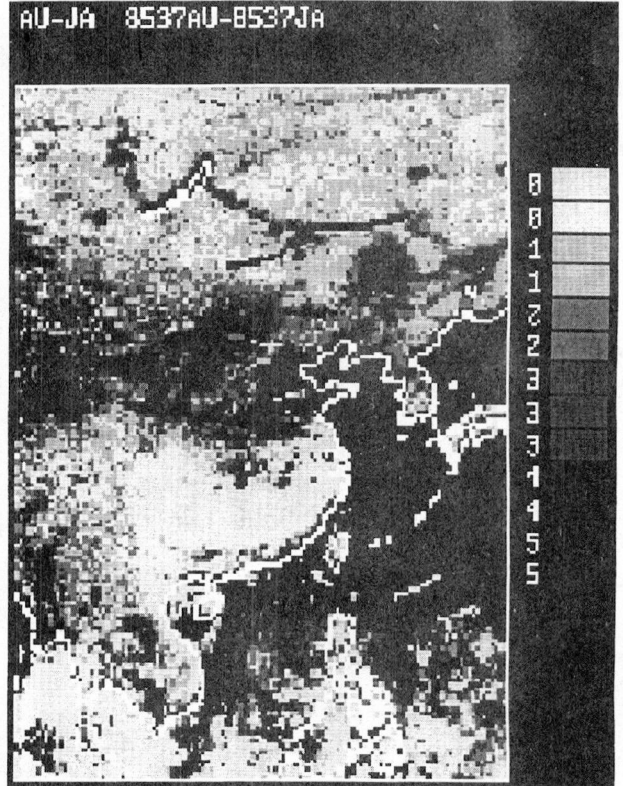


图9 1996年8月下旬与1月下旬 $-SI_H$ 平均值之差的空间分布

Fig.9 Spatial variation of the index $-SI_H$ difference between August 20—30 and January 20—30

到的 T_B 为

$$T_{vp}(\theta) = e_{vp}(\theta)T_s e^{-\tau_v} + T_a(1 - e^{-\tau_v})(1 + r_{vp}e^{-\tau_v}) \quad (1)$$

其中下标 ν 表示频率, p 表示极化 V, H; T_s, T_a 分别为地面和大气物理温度, τ_v 为大气不透明度, 由大气积分水汽含量来确定; e_{vp} 为 ν GHz 的地面 p 极化热发射率, r_{vp} 为地面 p 极化反射率, 且有 $r_{vp} = 1 - e_{vp}$ 。(1)式右边第一项为地面的热辐射, 第二项是大气热辐射。若我们近似地用一个大气有效温度 T_0 来取代 T_s, T_a , 即 $T_0 \equiv T_s = T_a$, 则从(1)式不难得到

$$PI_{19} \equiv T_{19V} - T_{19H} = (r_{19H} - r_{19V})e^{-2\tau_{19}}T_0 \quad (2a)$$

$$SI_H \equiv T_{37H} - T_{85H} = (r_{85H}e^{-2\tau_{85}} - r_{37H}e^{-2\tau_{37}})T_0 \quad (2b)$$

当地面湿度 M 增加, r_{19H} 远比 r_{19V} 更明显地增大, 即有极化反射率的差别 $r_{19H} - r_{19V}$ 增大, 而使(2a)的 PI_{19} 增加。大气的 τ_{19} 和 T_0 会使 PI_{19} 起伏。

对于(2b), r_{85H} 一般总小于 r_{37H} , 且有 $\tau_{85} > \tau_{37}$ 。当地面湿度 M 增大时, r_{37H} 远比 r_{85H} 明显地增强, 而使 $SI_H \ll 0$ 。只有在裸露地面相当粗糙, 使 r_{37H} 与 r_{85H} 差别不大时, SI_H 才能接近于 0。 τ_{85}, τ_{37} 和 T_0 的变化会使 SI_H 起伏。

为数值模拟在 SSM / I 通道上有植被覆盖地表的 T_B , 我们还发展了包括多次散射的矢量辐射传输 (VRT) 方程的求解。由于植被农作物的散射元总是非球形的, 且在 SSM / I 通道上散射元的电尺寸一般总大于 1, 因此我们用物理光学近似推导 VRT 方程中非球形粒子的散射和消光系数, 以及相矩阵, 从而得到物理光学近似下的 VRT-POA 方程。地面的积雪模拟成一层密集的球形粒子, 用密集介质 VRT 即 DMRT 方程求解。VRT-POA 和 DMRT 二个方程联合求解的数值结果, 可以给出在 19—85GHz SSM / I 通道上植被 / 积雪层的 T_B 数值模拟, 及其与各物理参数(如农作物高度、密度、含水量, 地面湿度, 地面粗糙度, 积雪厚度、密度、冰粒子大小等)之间的定量关系。有关理论可参见文献 [4], 这里不作重复。

作为一个数值例子, 图 10 给出 4 种情况: 积雪地面, 地面体积湿度 $M_v = 0.1$ 时生长中的农作物, $M_v = 0.3$ 时生长中的农作物, 和 $M_v = 0.1$ 时长成待收的农作物。其中虚线为地面积雪 10cm 时的 T_B , 空心点细线为 $M_v = 0.1$ 和农作物 40cm 高时的 T_B , 实心点细线为 $M_v = 0.3$ 和农作物 40cm 高时的 T_B , 粗黑

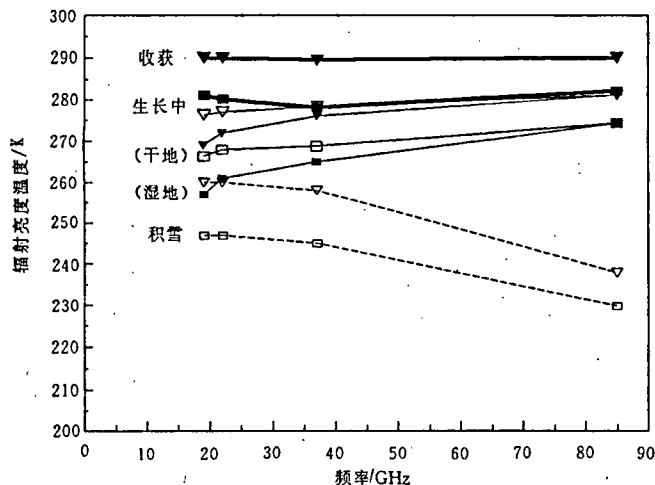


图10 农田热辐射的 VRT 数值模拟

Fig. 10 Numerical simulation of microwave thermal emission from crop fields

大气: 积分水汽含量均设为 $1\text{g}/\text{cm}^2$, 由此 τ 的计算参见文献 [2];

积雪: 冰粒子半径 $a=0.3\text{mm}$, 体积占空比 $f=0.3$, 地面温度 T_2 = 积雪层温度 $T_1=263\text{K}$, $M_v=0.1$, 大气温度 $T_a=273\text{K}$;

生长中的农作物: 散射元截面积 $A=5\text{cm}^2$, 厚度 $=0.1\text{cm}$, 体积占空比 $=0.01$, 高度 $=40\text{cm}$, $T_2=T_1=288\text{K}$, $T_a=288\text{K}$, 地面粗糙度 $\sigma=0.1\text{cm}$;

长成的农作物: 体积占空比 $=0.015$, 高度 $=120\text{cm}$, $T_2=T_1=T_a=293\text{K}$, 其余与生长中农作物的参数相同;

农作物散射元的介电常数, 土壤的介电常数, 均由经验公式计算, 参见文献 [2].

线为 $M_v=0.1$ 和长成的农作物 120cm 高时的 T_b 。在计算时采用的一些参数均列在图 10 的标题之下。数值模拟的结果与 SSM / I T_b 数据在农作物生长过程中的表现特征是一致的。

4 结 论

本文研究了星载微波 SSM / I 在我国东北华北平原农田上 1996 年 1—9 月 T_b 遥感数据的辐射特征。提出用散射指数 SI_v 识别积雪和降水, 极化指数 PI_{19} 识别地表极化辐射特征, 用 37 和 85GHz 水平极化的散射指数 SI_H 判断地面的湿度, 用组合性的农作物参数 CI 可以表征农作物的生长过程。并分析了由 SSM / I 数据构成的这些特征性指数在时间上的变化和空间上的分布。本文还用辐射传输方程解释了这些特征性的变化, 并用严格的 VRT—POA 和 DMRT 联立方程数值模拟了农作物生长过程中极化 T_b 热辐射的谱特征。

本文提出的方法结合农田地面实况测量, 可以为星载微波遥感在农作物生长监视和评估应用中提供理论依据。

致谢: 文中 SSM / I 数据的部分工作是作者由美国国家研究委员会 (NRC) 授于高级研究客座在 NOAA / NESDIS / SRL 访问研究时完成的。

参 考 文 献

- 1 F.T. Ulaby, R.K. Moore, A.K. Fung. *Microwave Remote Sensing*, 3, Artech House, Mass. 1986.
- 2 金亚秋. 电磁散射和热辐射的遥感理论. 北京: 科学出版社, 1993.
- 3 金亚秋. 星载微波 SSM / I 对我国西北沙漠地区遥感数据的辐射特征分析. 遥感学报, 1997, 1(3): 192—197.
- 4 Y. Q. Jin, Radiative transfer of snowpack / vegetation canopy at SSM / I channels and satellite data analysis. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 61: 55—64.

Data Analysis of the Spaceborne SSM / I over Crop Areas of the Northern China

Jin Yaqiu

(Wave Scattering and Remote Sensing Center, Fudan University, Shanghai, 200433)

Abstract Polarized brightness temperature(T_B) data of the DMSP SSM / I over crop areas of the northern China in 1996 is studied. Some T_B indexes, such as scattering, polarization and crop monitoring indexes, are defined and applied to the analysis of temporal variation of thermal emission from crop areas. This paper provides a novel approach to analyze the functional dependence of polarized microwave T_B data on atmospheric and surface conditions during crop growth. It also presents a numerical simulation of vector radiative transfer equations with multiple scattering for a vegetation / snow model at SSM / I channels.

Key words Spaceborne remote sensing, SSM / I, Crop area