

文章编号: 1007-4619 (2003)06-0498-06

# SSM/I 微波辐射计数据中国陆地覆盖特征 季节变化分析

潘广东, 王 超, 张卫国, 王红梅, 田国良

(中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101)

**摘 要:** 利用星载微波辐射计 SSM/I 多通道、多时相亮温数据开展了中国陆地覆盖特征的季节变化研究。通过对国内外星载微波辐射应用研究分析, 提出了归一化极化指数(NDPI)的概念。处理了 1997 年 4 月、7 月、10 月和 1998 年 1 月的(每月的 20、24 日各两天)多通道 SSM/I 数据, 在此基础上计算形成了第一幅中国陆地地区的归一化微波极化指数图, 开展了中国陆地区域覆盖特征随季节变化的研究。研究结果表明, 不同的陆地覆盖特征有特征的 NDPI 值, NDPI 随季节而变化, 植被、水分是引起 NDPI 变化的主要因子。

**关键词:** SSM/I; 微波辐射计; 多时相; 归一化极化指数; 陆地覆盖特征与变化

**中图分类号:** TP79 **文献标识码:** A

## 1 引 言

星载微波辐射计始于 20 世纪 70 年代开始的电子扫描微波辐射计(ESMR), Nimbus-6, 7 的扫描多频微波辐射计(SMMR), 主要应用于海洋、大气领域。其后续的于 1987 年发射的防卫气象卫星计划(DM-SP)的特别微波辐射/成像计(SSM/I), 主要应用于环境参数的监测, 如大气水汽的含量、海面风速、海冰分布、陆地及海洋温度反演等<sup>[1]</sup>。已发射的日本的 ADEOS-II、欧空局的 Envisat 和计划中的美国 SSM/I (成像和探测)将会为微波辐射遥感研究提供新的数据。另外, 随着合成孔径和极化微波辐射计的发展, 微波辐射计应用前景也将越来越广阔。

基于微波辐射计数据开展陆地表面的辐射特征分析主要集中在几种典型地表形态<sup>[2-7]</sup>。Choudhury 等应用 SMMR 数据 37GHz 的极化差监测植被变化<sup>[2]</sup>。Becker 等利用归一化差分植被指数(NDVI)和微波极化差分指数(MPDI)监测植被和沙漠化, 且定义的 MPDI 不是一个归一化因子<sup>[3]</sup>; Choudhury 结合 SSM/I 的 19GHz 和 37GHz 数据开展了沙漠和雨林的监测, 发现 SSM/I 数据可以监测植被的季节

和年变化<sup>[5]</sup>; Kerr 等结合 NDVI 和微波极化差分温度(MPDT)开展了植被的变化监测, MPDT 实际上是极化差, 同时作者也定义了一参量-极化率(PR), 该参量消除了温度的影响<sup>[4]</sup>。金亚秋基于 SSM/I 数据利用极化指数(实际是极化差)和散射指数对中国沙漠、农田的辐射特性进行了分布<sup>[6,7]</sup>。对于同一频率 V 和 H 极化数据间的定义有多种<sup>[2-4,6-8]</sup>, 其中 PD 和 MPDT 不能消除温度的影响, 极化指数(PI)<sup>[8]</sup>是基于车载辐射计测量结果提出的概念, 对于其在星载仪器观测数据的适用性方面未见详细讨论。

本文中作者提出了一种处理星载数据的新的极化指数定义(数学式与 PR 相同), 即归一化极化指数(NDPI), NDPI 消除了地表温度差异的影响。另外, 基于 NDPI 的中国陆地区域地表覆盖特征的季节变化分析尚未见报道。

## 2 微波辐射原理

依据 Plank 公式, 地物在微波频率的微波辐射亮温( $T_B$ )与地物的物理温度( $T_0$ )间的关系可表示为式(1):

$$T_{BP}(\theta) = \epsilon_p(\theta) * T_0 \quad (1)$$

收稿日期: 2001-11-14; 修订日期: 2003-05-12

基金项目: 国家 95 攀登项目(编号: 95-预-38), 国家重点基础研究发展规划项目(编号: 20000G77900)。

作者简介: 潘广东(1969-), 男, 1992 年毕业于成都地质学院并获学士学位, 1998 年毕业于中国科学院遥感应用研究所, 获硕士学位, 主要从事微波遥感研究。  
(C) 1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

上式中下标  $p$  表示极化态(V 或 H),  $\theta$  表示观测角,  $\epsilon_p$  为地物的微波发射率。地物的方向微波发射率主要由地物的相对介电常数和地物的表面粗糙度决定,介电常数又与地物的含水量、形态、结构等密切相关<sup>[9]</sup>。

SSM/I 辐射计接收的是扫描视场内的大气和其下垫面的多层介质的综合微波发射。以下重点考虑针对 SSM/I 19.3GHz 数据的情况。基于辐射传输理论,综合考虑地表和大气的微波辐射模型<sup>[10]</sup>可表示为:

$$T_{BP} = T_u + e^{-\tau} [T_{bp} + r_p \{T_d + T_{sky} e^{-\tau}\}] \quad (2)$$

上式中,  $T_{BP}$  为极化亮温,  $e^{-\tau}$  为大气的微波衰减,  $T_{bp}$  代表植被-土壤层贡献的微波辐射亮度温度,  $T_u$ ,  $T_d$ ,  $T_{sky}$  分别代表上行、下行大气辐射和背景天空亮度,在大气微波吸收较低的条件下,  $T_u$ ,  $T_d$  可有如下的近似式:

$$T_u \cong T_d \cong T_a [1 - e^{-\tau}] \quad (3)$$

上式中,  $T_a$  代表大气层微波吸收区域的平均温度。将植被层考虑为处于粗糙土壤上方的一层单次散射层,则植被-土壤层的微波辐射亮度温度可表示为:

$$T_{bp} = T_e \{ (1 - r_{sp}) e^{-\tau} + (1 - \omega_p) \times [1 - e^{-\tau}] [1 + r_{sp} e^{-\tau}] \} \quad (4)$$

其中,  $\tau_c$  冠层的微波不透明度,  $T_e$  为植被和土壤的物理温度,  $\omega_p$  为植被的极化单次散射反照率,当没有植被覆盖时,可设  $\tau_c$  为 0,以计算裸露土壤和沙漠地区的微波辐射亮温。  $r_{sp}$  为裸露土壤的极化反射率。注意到,

$$r_{sp} = 1 - \epsilon_{sp} \quad (5)$$

这里  $\epsilon_{sp}$  为土壤的极化微波发射率。将(3), (4), (5)式代入(2)式,并忽略背景天空辐射亮度的贡献,通过整理可得:

$$T_{BP}(\theta) = T_a (1 - e^{-\tau}) (1 + (1 - \epsilon_p) e^{-\tau}) + T_e e^{-\tau} (\epsilon_{sp}(\theta) e^{-\tau} + (1 - \omega_p) \times (1 - e^{-\tau}) (1 + (1 - \epsilon_{sp}(\theta)) e^{-\tau})) \quad (6)$$

从上式明显看出 SSM/I 辐射计接收的亮温是地表(土壤、植被)和大气的综合贡献。从(6)式计算可知,在标准大气条件下 SSM/I 微波辐射亮温主要是地表的贡献。

### 3 归一化极化指数(NDPI)及其特性

常用的不同极化的数据间的运算有同极化的多种定义<sup>[2-4,7,8]</sup>和不同频率极化数据间的散射指数<sup>[6]</sup>,其中 Paloscia 等的定义是非归一化无量纲量,它消除了温度本身的影响,而金亚秋等的定义实际是极化差(温度单位),受温度的影响。本文借鉴可见光、近红外遥感中归一化植被指数(NDVI)的定义,定义微波辐射中同频率的归一化极化指数(NDPI):

$$NDPI_f = \frac{T_V - T_H}{T_V + T_H} \quad (7)$$

式中,下标  $f$  代表频率, V 相 H 代表极化方式。

图 1 显示了由(7)式结合辐射传输方程(图中各变量意义同前),针对 SSM/I 19.3GHz 数据,在不同大气不透明度情况下, NDPI 对土壤体积含水量( $m_v$ )、植被含水量( $W_e$ )、土壤-植被温度的变化。从图中可以看出,在其它条件不变的情况下,随着下垫面土壤含水量的增加, NDPI 增大;随着下垫面生物量的增加,植被含水量也同时增加, NDPI 减小;随着大气不透明度减小, NDPI 的变化敏感性逐渐增强。图 1 同时显示, NDPI 基本不受地面物理温度变化的影响。

### 4 微波辐射数据特性与 NDPI 成图

#### 4.1 数据特性<sup>[1]</sup>

目前在轨的携带 SSM/I 传感器的 DMSP 卫星有 F13 和 F14 两颗。DMSP 卫星采用太阳同步轨道,近极地运行,轨道高度 860km 左右,轨道倾角 98.8°。卫星每隔 102min 绕地球一圈,每天大约绕地球 14 转。SSM/I 实际是七通道分离的扫描辐射计(19.35GHz, 37GHz, 85.5GHz 的双极化和 22.235GHz 的 V 极化),各通道同步记录地物和大气的微波发射。其中,除 85.5GHz 的数据的地面分辨率为 12.5km,其余频率的数据地面分辨率为 25km。

本文采用 F13 卫星的数据,卫星每天下行通过当地时间为上午 6 点,上行为下午 6 点,扫描宽度 1394km,星下点当地入射角 53.1°。本文处理了 1997 年 4 月、7 月、10 月和 1998 年 1 月每月的 20 和 24 日两天内的数据。

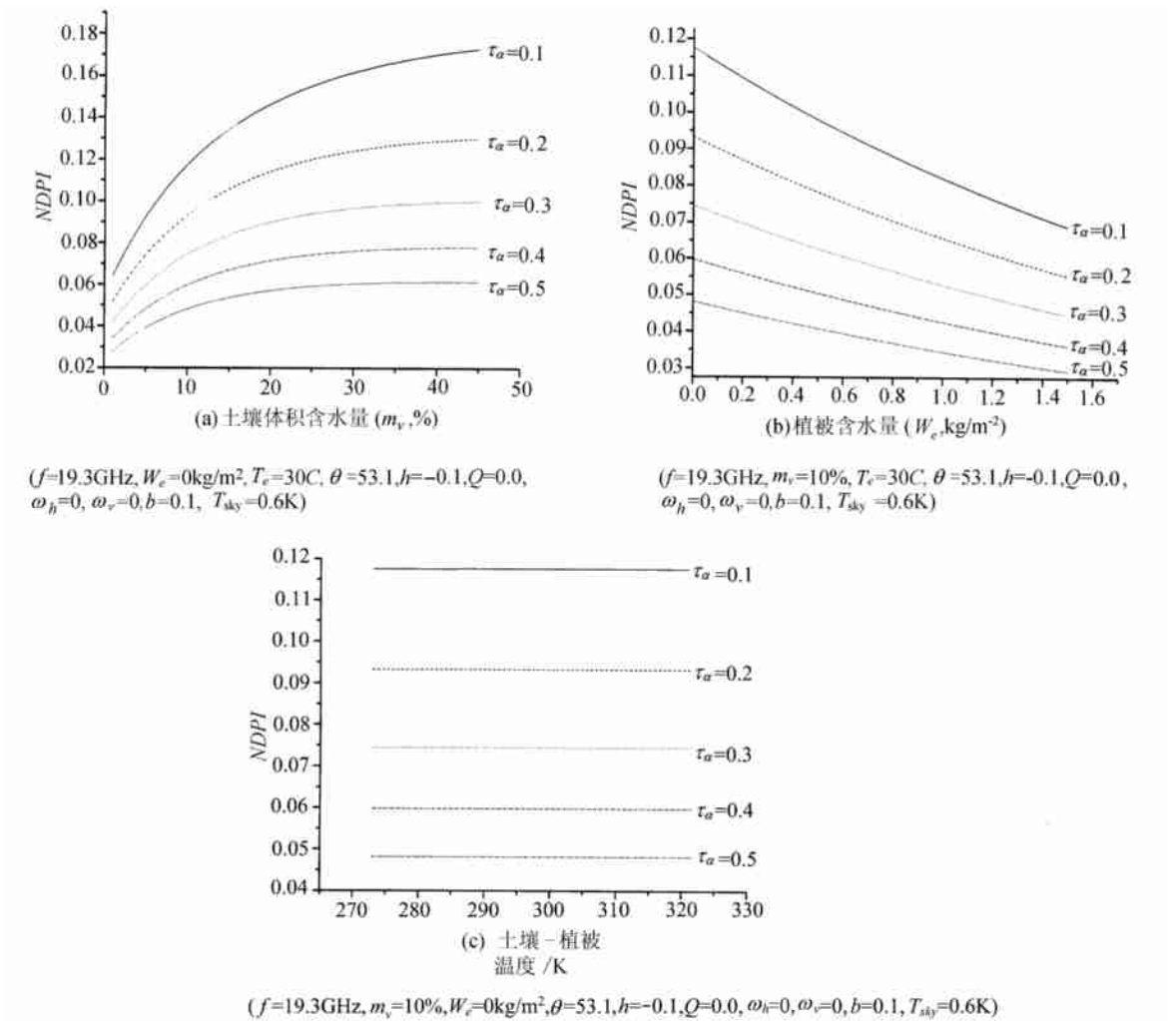


图 1 NDPI 随各要素变化的数值模拟结果

Fig.1 Numerical simulation of NDPI according to various elements conditions

### 4.2 数据处理与成像

首先将 SSM/I 原始数据转换成辐射亮温数据, 对每轨低频各极化亮温数据采用线性插值, 形成 12.5km 的地面分辨率。再采用 Albers(中心经纬度: 37°N, 110°E) 等面积投影成图。然后, 进行图像镶嵌, 形成单频、单极化的中国陆地微波辐射亮温图。

### 4.3 归一化极化指数成图

低频数据对地表水分、植被反映较好。因此, 我们基于式(7) 计算了中国陆地区域的 SSM/I 19GHz 的 1, 4, 7, 10 四个月的 NDPI<sub>19</sub>, 以下简称 NDPI, 结果见图版 I。

## 5 中国陆地区域微波辐射特性随季节变化分析

从 SSM/I 数据处理结果可知, 一般地物的同极化的微波辐射亮温随频率增加而增加, 同时多数地物的同频率 V 极化高于 H 极化亮温。不同频率、极化的微波辐射亮温主要随地物的类型而变化, 其主要影响因素包括: 含水量、地表类型、地表粗糙度、温度及大气。大气影响主要是大气中的水汽分子和氧气分子对电磁波的吸收衰减和大气本身的微波辐射, 大气对 SSM/I 低频亮温影响较小。

从图版 I, 我们可以明显看出不同的地表覆盖类型有特征的 *NDPI*, 一般 *NDPI* 值由高到低的变化趋势是: 沙漠、戈壁、戈壁-半沙漠化地表、草原、农业区、森林。通过前述模型分析, 可以解释随生物量的

增加, *NDPI* 减小; 随地表水分增加, *NDPI* 增大。我们选择了特征的地表覆盖类型区域<sup>[11]</sup>, 并统计了它们随季节的变化(表 1)。图 3 显示了统计区示意图。

表 1 中国陆地区域不同地表覆盖类型的统计区四季 *NDPI*(19GHz) 的平均值

Table 1 Average *NDPI* (19GHz) values of statistical regions characterized by various types of land covers in China

类型	统计区名称	1998 年 1 月	1997 年 4 月	1997 年 7 月	1997 年 10 月
森林	大兴安岭	0.0133	0.0067	0.0025	0.0059
	长白山	0.0107	0.0089	0.0045	0.0088
	武夷山-戴云山	0.0080	0.0079	0.0045	0.0045
	藏东南森林	0.0032	0.0023	0.0027	0.0024
	天山南麓	0.0156	0.0087	0.0065	0.0091
农业区	东北平原	0.0257	0.0376	0.0217	0.0294
	华北平原	0.0155	0.0088	0.0174	0.0091
	四川盆地	0.0168	0.0211	0.0060	0.0126
	长江中游平原	0.0401	0.0382	0.0265	0.0204
	长江下游平原	0.0407	0.0266	0.0242	0.0311
草原	青藏高原(高寒草原)	0.0448	0.0413	0.0424	0.0418
	内蒙古草原(荒漠草原)	0.0470	0.0423	0.0347	0.0444
荒漠	塔克拉玛干沙漠	0.0689	0.0721	0.0635	0.0710
	古尔班通古特沙漠	0.0424	0.0483	0.0441	0.0487
	巴丹吉林-腾格里沙漠	0.0710	0.0693	0.0542	0.0696

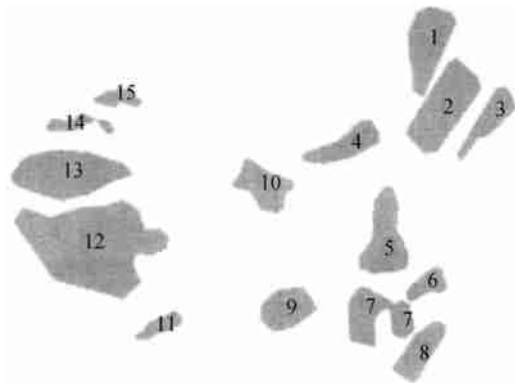


图 3 统计区示意图

Fig. 3 The sketch map of statistical region

1. 大兴安岭, 2. 东北平原, 3. 长白山, 4. 内蒙古高原, 5. 华北平原, 6. 长江下游平原, 7. 长江中游平原, 8. 武夷山-戴云山, 9. 四川盆地, 10. 巴丹吉林-腾格里沙漠, 11. 藏东南森林, 12. 青藏高原, 13. 塔克拉玛干沙漠, 14. 天山南麓森林, 15. 古尔班通古特沙漠

综合上述图表, 具体分析中国陆地覆盖特征随季节变化 *NDPI* 的分布特征。

**森林** 从图版 I 中可以知道, 森林的 *NDPI* 最小, 一般变化范围小于 0—0.009。其中 1 月份的天

山、大兴安岭、长白山森林的 *NDPI* 大于 0.01, 这主要是由于 1 月份这些区域地表覆盖了积雪, 主要反映了积雪的 *NDPI*。森林的生物量与 *NDPI* 之间存在明显的负相关, 森林区的 7 月份的 *NDPI* 值较其它 3 个月份小, 这是由于 7 月份森林处于生长期, 生物量较其它 3 个月份多。另外, 天山南麓的森林的生物量较其它几个统计区相对少, 因而其 *NDPI* 相对大一些。藏东南森林主要由雨林、季雨林、常绿阔叶林和部分亚高山针叶林组成, 其生物量、温度随季节变化不大, 因此其 *NDPI* 随季节变化不明显。

**农业区** 这里农业区主要指大部分有农作物覆盖的地区, 其覆盖情况视季节变化。农业区的 *NDPI* 一般变化范围在 0.006—0.04 之间。四川盆地由于植被覆盖较其它平原多, 因此其 *NDPI* 较小, 但仍大于森林; 尤其在 7 月份, 盆地中主要农作物仍处于生长期, 因此 *NDPI* 与森林类似。而长江中下游平原的 *NDPI* 由于受水体(长江、洞庭湖、鄱阳湖、太湖、巢湖等)的影响其值较大, 主要反映了水分的信息。东北平原分布有很多沼泽, 同时包括科尔沁沙地, 因此, 其 *NDPI* 也较华北平原大。华北平原 4、10 月份

NDPI 较 1、7 月小,这是由于在 4 月底,华北平原的小麦处于灌浆期,生物量较多;而 10 月份,可能是由于玉米收割期,生物量较少,另外,气候也较为干燥。

**草原** 草原的 NDPI 值变化范围在 0.034—0.045。青藏高原地表主要由高原灌木、苔草等较矮的植被覆盖,为高寒草原。内蒙古草原地区主要为荒漠草原,另外还有部分灌丛和草甸等覆盖。从图版 I 看出,青藏高原的 NDPI 随季节变化不明显,而内蒙古高原的 7 月的 NDPI 较其它月份明显小,这是由于 7 月份,覆盖高原的草长得相对茂盛。

**荒漠** 这里指的荒漠包括沙漠、戈壁及半沙漠化土地。一般荒漠的 NDPI 值变化范围在 0.044—0.073。古尔班通古特沙漠的 NDPI 明显小于塔克拉玛干、巴丹吉林-腾格里沙漠,这里由于古尔班通古特沙漠地区地表覆盖有灌木,而另两个沙漠地表大部分为流沙覆盖。另外,塔克拉玛干、巴丹吉林-腾格里沙漠在 7 月份 NDPI 小于其它 3 个月份,这是由于 7 月份沙漠地区地表比较其它月份干燥,同时有零星分布的植被覆盖,降低了不同极化的微波发射率差异(因为地表随含水量的增加,极化发射率差异增大)。

## 6 结 论

本文提出了归一化极化指数概念,它消除了温度的影响,从而消除了不同地区由于数据获取时间不同而造成的差异。NDPI 实际是极化发射率的归一化,主要影响因素为植被生物量和地表土壤水分。生物量增大,NDPI 减小;土壤水分增加,NDPI 增大。

SSM/I 辐射计数据得出的 NDPI 对中国陆地区域的地表覆盖特征具有很强的监测能力。一般 NDPI 值由高到低的变化趋势是:沙漠、戈壁-半沙漠化地表、(草原)高原、农业区、森林。NDPI 清楚地展示了陆地覆盖类型随季节变化的特征变化。研究结果表明,19GHz 的 NDPI 能很好地作为地表覆盖特征的季节变化监测依据。

本文只用间隔 3 天的两天数据即可对中国陆地区域成图,同时微波辐射数据具有受云的影响较小的特点。因此,本研究为大面积的快速全球变化研

究(重点植被、水分等)提供了新的方法。

**致谢** 感谢中国科学院和意大利国家科学委员会(CNR)间合作协议项目“Microwave Remote Sensing for Soil and Vegetation Monitoring”及意方 P·Pampaloni 和 S·Paloscia 教授的支持。SSM/I 数据由美国 NASA 提供。感谢孙国清教授提出的很多有益意见。

## 参 考 文 献 (References)

- [1] Holliger J. DMS Special Sensor Microwave/image Calibration/Validation[C]. Space Sensing Branch, Naval Research Laboratory, Washington, D. C. 20375—5000, Final Report, 1989, 1.
- [2] Choudhury B J, Tucker C J, Golus R E et al. Monitoring Vegetation Using Nimbus-7 Scanning Multichannel Microwave Radiometer's Data [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1987, **8**(3), 533—538.
- [3] Becker F, Choudhury B J. Relative Sensitivity of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Microwave Polarization Difference Index (MPDI) for Vegetation and Desertification Monitoring [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, **23**, 297—311.
- [4] Kerr Y H, E G Njoku. On the Use of Passive Microwaves at 37 GHz in Remote Sensing of Vegetation [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1993, **14**(10), 1931—1943.
- [5] Choudhury B J. Reflectivities of Selected Land Surface Types at 19 and 37 GHz from SSM/I Observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, **46**, 1—17.
- [6] Jin Yaqui. Analysis of SSM/I Data over the Desert Areas of China [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, **1**(3), 192—197 [金亚秋. 星载微波 SSM/I 遥感对中国西北沙漠地区的遥感数据辐射特性分析 [J]. 遥感学报, 1997, **1**(3), 192—197.]
- [7] Jin Yaqui. Data Analysis of the Spaceborne SSM/I over Crop Areas of the Northern China [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1998, **2**(1), 19—25. [金亚秋. 星载微波 SSM/I 遥感在中国东北华北农田的辐射特性分析 [J]. 遥感学报, 1998, **2**(1), 19—25.]
- [8] Paloscia S, Pampaloni P. Microwave Polarization Index for Monitoring Vegetation Growth [J]. *IEEE Trans. on Geos. and. Remote Sensing*, 1988, **26**(5), 617—621.
- [9] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive* [M]. Artech House, Inc., Washington, 1986, 3.
- [10] Njoku E G, Li Li. Retrieval of Land Surface Parameters Using Passive Microwave Measurements at 6—18GHz [J]. *IEEE Trans. on Geos and Remote Sensing*, 1999, **37**(1), 79—93.
- [11] Changchun Institute of Geography, CAS. Natural Protecting Alas in China [M]. Beijing: Science Press, 1989. [中国科学院长春地理研究所. 中国自然保护区图集 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.]

## Analysis of Seasonal Change of Land Cover Characteristics with SSM/I Data in China

PAN Guang-dong, WANG Chao, ZHANG Wei-guo, WANG Hong-mei, TIAN Guo-liang

(Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China)

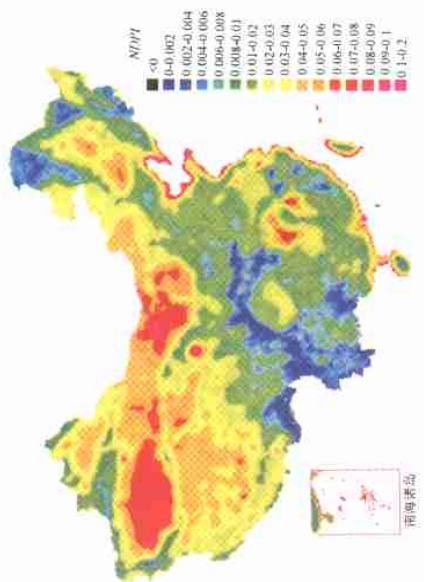
**Abstract:** By processing and analyzing space borne multi-frequency microwave radiometry data acquired by SSM/I in different time, we aim at carrying out research on seasonal change of land cover characteristics in China.

Through a short review on passive microwave remote sensing applications, we choose Normalized polarization index (*NDPI*) to describe land cover characteristics. Because *NDPI* is independent of surface temperature, it diminishes difference caused by acquiring time in data in various regions. It is also shown that *NDPI* is actually a normalized emissivity of different polarization. Its main influence factors are vegetation biomass and soil surface moisture. With biomass increasing, *NDPI* becomes smaller; with soil moisture increasing, *NDPI* increases also.

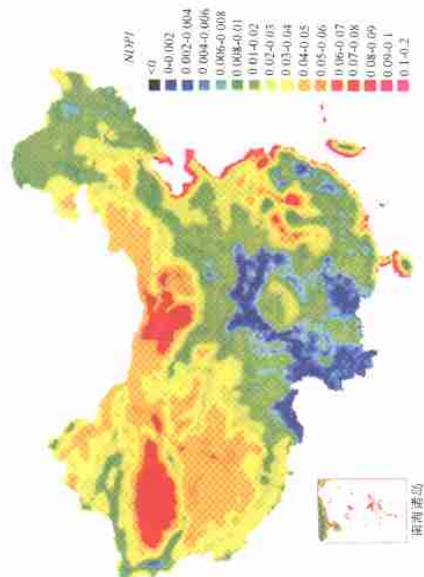
Multi-frequency SSM/I data acquired in April, July, October of 1997 and January of 1998 (20<sup>th</sup> and 24<sup>th</sup> of every month) were processed and analyzed. Then the SSM/I *NDPI* maps over land in China were put forward for the first time. These maps express seasonal change of land cover characteristics in China. By analyzing all of these data and maps, we found that specific land cover has specific *NDPI* value and *NDPI* value changes with season. It is concluded that the *NDPI* maps has great potential to monitor land cover characteristics. The general trend of *NDPI* is (from high to low): desert, semi-desert, plateau (grassland), agricultural region and forest. The research illustrates that 19GHz *NDPI* is a good indicator of seasonal change of land cover characteristics.

This paper also provides a new method to research on global change (such as vegetation and soil moisture change) because we have demonstrated in the paper that a *NDPI* map covering all of China can be formed by using only two day's SSM/I data, and furthermore, this map is affected little by cloud and is independent of surface temperature.

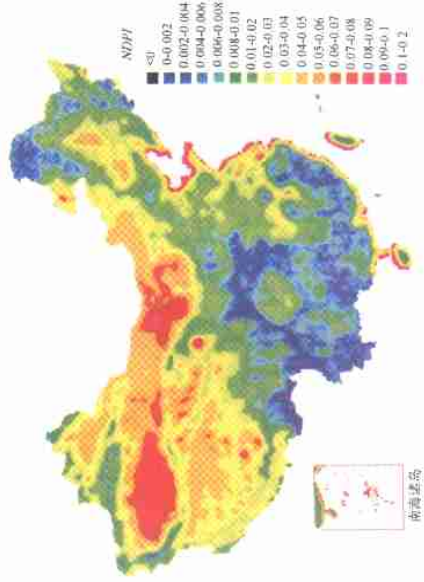
**Key words:** SSM/I; microwave radiometer; multi-temporal; *NDPI*; land cover characteristics; land cover change



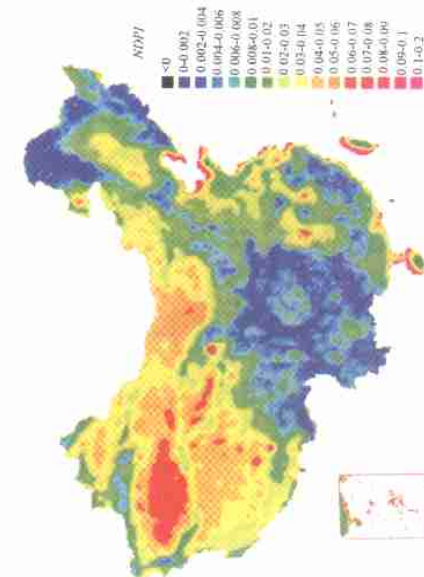
(a) 1998年1月20日、24日SSM/I 19GHz 极化指数图



(b) 1997年4月20日、24日SSM/I 19GHz 极化指数图



(c) 1997年7月20日、24日SSM/I 19GHz 极化指数图



(d) 1997年10月20日、24日SSM/I 19GHz 极化指数图

图2 中国大陆地区微波辐射归一化指数 (NDPI) 图