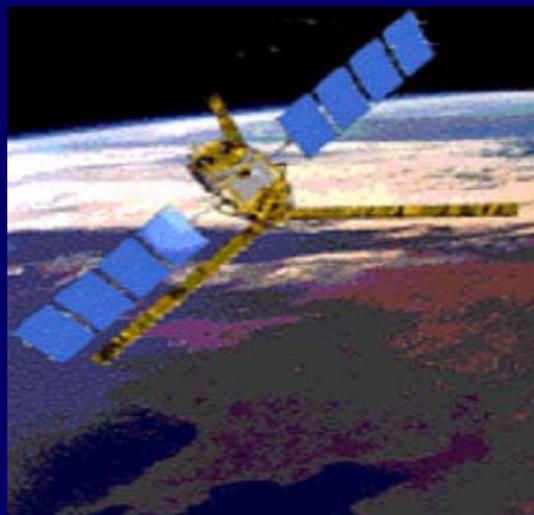




遥感科学国家重点实验室

中国科学院遥感应用研究所·北京师范大学

# 被动微波在植被监测中的研究进展



施建成

中国科学院遥感应用研究所

2012-6-11

# 植被监测的重要性



陆气相互作用：作为气候和水文模拟中的边界条件

- 反照率 – 辐射循环平衡特征；
- 水存储和蒸散 – 水循环和平衡特征；

陆地碳循环的主要信息 (生物地球化学循环)

- 存储和通道

生态 – 净初级生产力等等

# 新发展的微波植被指数



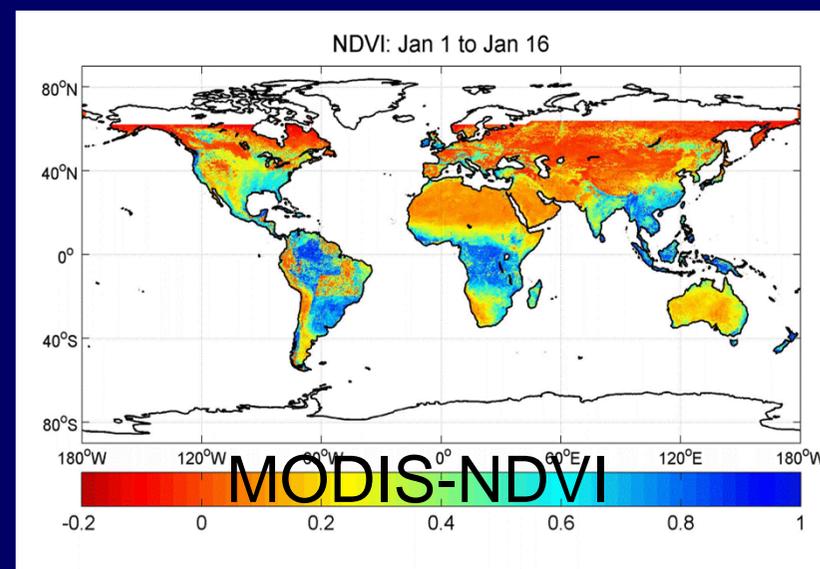
在土壤水分反演算法中植被的影响及校正研究中，发展了消除地表发射率信号，反映植被信号的微波植被指数的新算法，提供了一个监测全球植被的新手段。

目前使用最广泛的由可见光波段获取的植被参数

**NDVI (归一化植被指数)** – 可见光和近红外光谱对绿色植被的度量；

**LAI (叶面积指数)** 单位植被覆盖面积内所有叶子面积的度量 – 一个几何参数

**主要局限** – 受到大气和土壤背景的影响；植被类型影响LAI反演精度



# 已有的被动微波技术



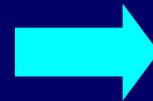
## 当前使用的技术

- 微波极化差异指数 – MPDI:  
 $T_{bv} - T_{bh}$



受土壤表面湿度，粗糙度以及温度影响很大

- 标准化极化指数 – PI:  
 $C * (T_{bv} - T_{bh}) / (T_{bv} + T_{bh})$



受表面土壤湿度和粗糙度的影响

- 森林归一化植被指数 – EDI:  
 $C * (T_{bp}(f1) - T_{bp}(f2)) / (T_{bp}(f1) + T_{bp}(f2))$



仅适用于浓密森林



# 当前存在的问题和概要

## 植被监测中面临的主要问题

- 大气影响 – 光学传感器 > 微波传感器;
- 背景影响 – 微波传感器 > 光学传感器;

## 本研究: 发展新的算法估算微波植被指数

- 算法的理论基础;
- 与全球的NDVI和LAI数据进行对比.

# AMSR-E / AQUA

## AMSR-E: Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System

### AMSR-E传感器主要参数配置

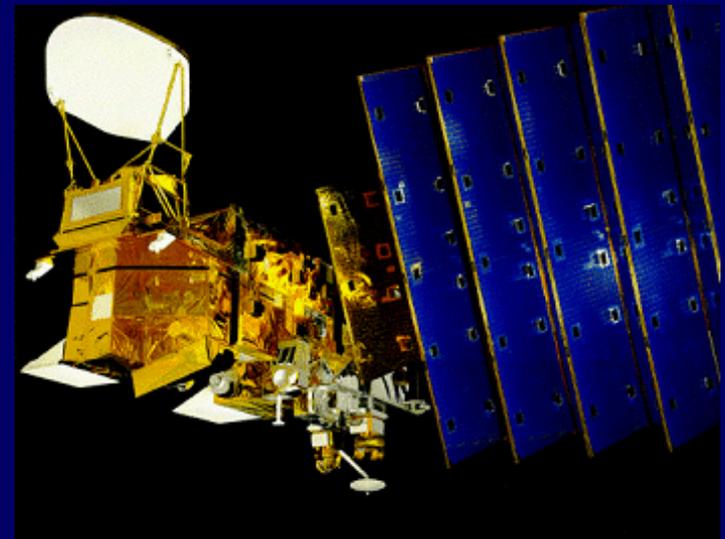
Frequency (GHz)	Polarization	Sensitivity (K)	Mean Spatial Resolution (km)	Swath (km)
6.925	V, H	0.3	56	1445
10.65	V, H	0.6	38	1445
18.7	V, H	0.6	21	1445
23.8	V, H	0.6	24	1445
36.5	V, H	0.6	12	1445
89.0	V, H	1.1	5.4	1445

- 12个通道（6个频率，H&V双极化）圆锥扫描被动微波辐射计
- 观测角度55°
- 由日本宇宙航空研究开发机构 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) 负责研制
- 于2011年10月失效

遥感科学国家重点实验室

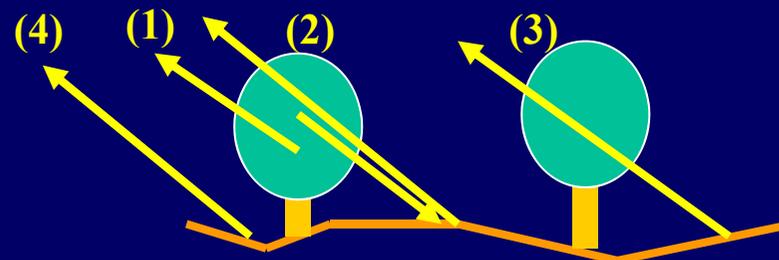
### AQUA 卫星

- 于2002年5月4日发射成功
- 太阳同步轨道
- 赤道地区过境时间：  
当地时间13:30 (升轨)  
当地时间01:30 (降轨)



# 微波辐射传输模型( $\omega$ - $\tau$ 模型)

在像元尺度,需要考虑植被覆盖度



## 四组分发射率模型

$$E_p^t = f_v \cdot E_p^v + f_v \cdot E_p^v \cdot L_p \cdot R_p^e + f_v \cdot L_p \cdot E_p^s + (1 - f_v) \cdot E_p^s$$

对于**Tb**

重新排列

$$T_{Bp}^t = f_v \cdot E_p^v (1 + L_p) \cdot T_v + E_p^s \cdot (1 - f_v + f_v \cdot L_p \cdot (1 - E_p^v)) \cdot T_s$$

$V_e$

$V_{att}$

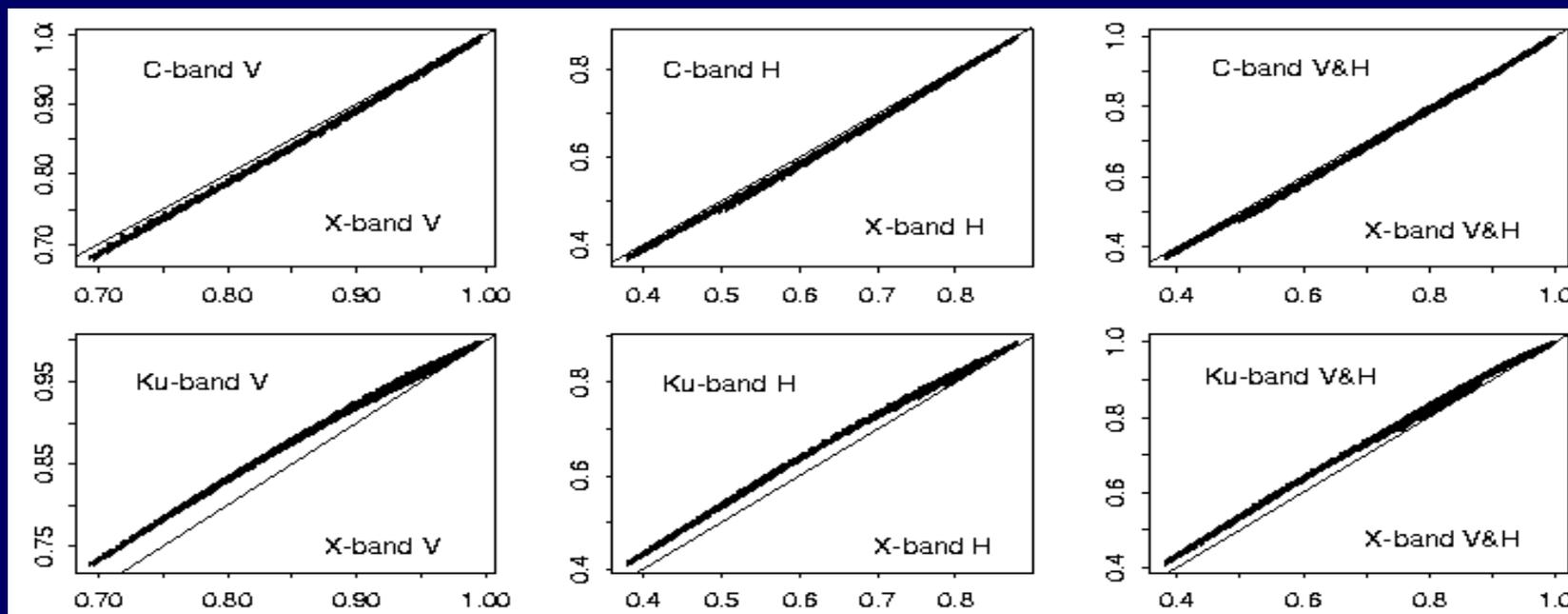
$$T_{Bp}^t = V_e + E_p^s \cdot V_{att}$$

下标**p**: 极化;  $L_p$ : 单向衰减因子;  
 上标**t, v, and s**表示全体,植被,以及表面项;  
 **$T_v$  和  $T_s$**  分别表示植被温度和地表温度;  
 **$f_v$**  是植被覆盖度。

# 不同频率下的地表组分特征



## 基于AIEM模型的较宽土壤水分和粗糙度范围的发射率模拟



### 地表组分特征总结:

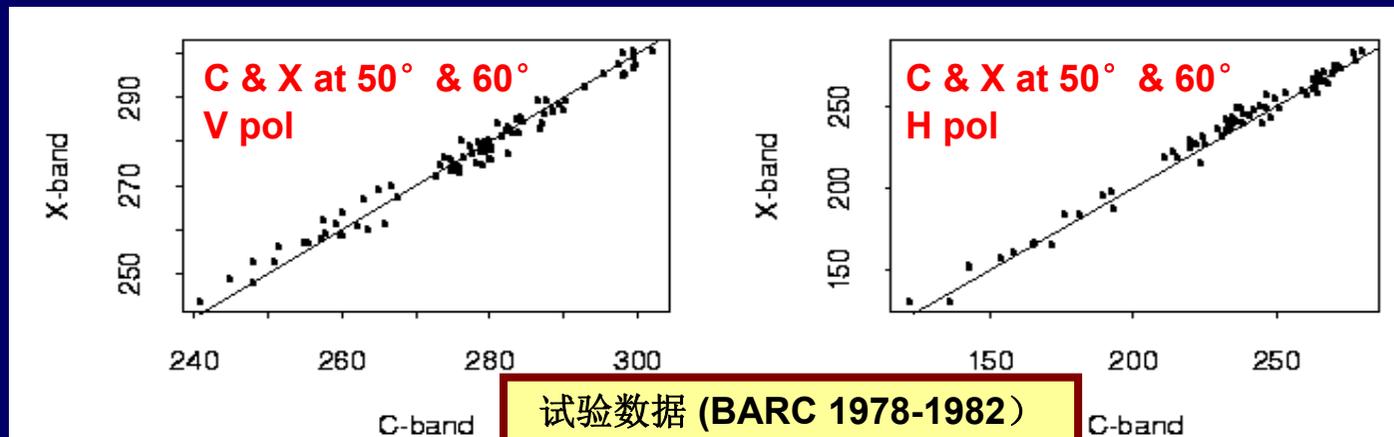
- 土壤发射率随频率增加而增大，是由于土壤中水的介电特性随频率而变化；
- 土壤发射率在AMSR-E邻近的频率间存在很好的相关性，是由土壤水分和地表粗糙度情况决定的；
- 相邻两个频率的土壤发射率的关系可以用线性方程来表示，且系数与极化方式无关。

$$E_p^s(f_1) = a(f_1, f_2) + b(f_1, f_2) \cdot E_p^s(f_2)$$

# 不同频率下土壤发射率关系的验证和描述

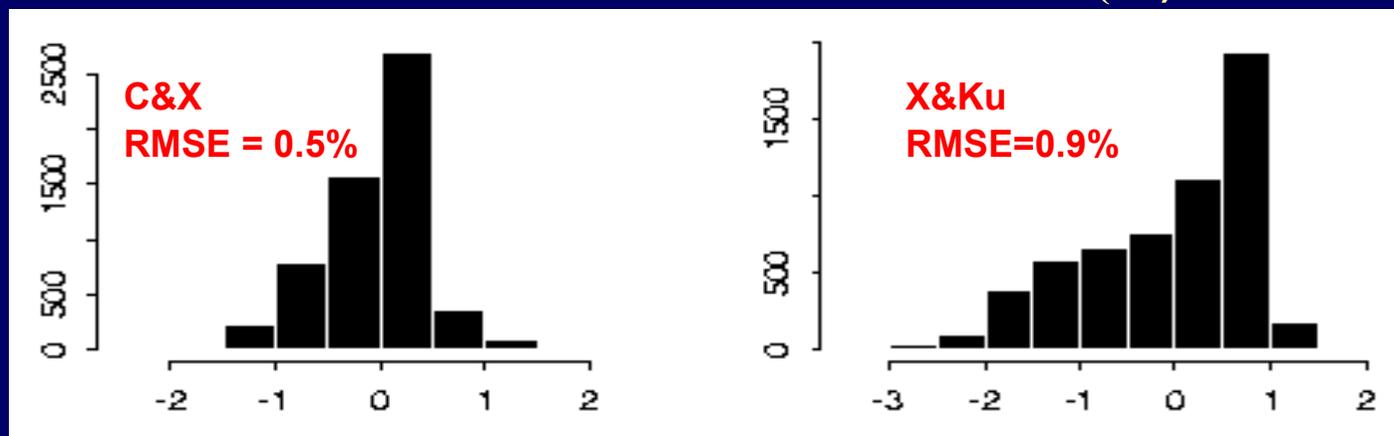


AMSR-E相邻两个频率下的土壤发射率的线性函数:



$$E_p(f_1) \approx a(f_1, f_2) + b(f_1, f_2) * E_p(f_2)$$

基于AIEM模拟数据的上述方程的相对误差(%)



# 不同频率的亮温TBs间的关系

$$T_{Bp}^t = CF_v + E_p^s \cdot CF_{att}$$

不同频率表面发射率间的关系

$$E_p^s(f_1) = a(f_1, f_2) + b(f_1, f_2) \cdot E_p^s(f_2)$$

$$\frac{T_{Bp}^t(f_1) - CF_v(f_1)}{CF_{att}(f_1)} = a(f_1, f_2) + b(f_1, f_2) \cdot \frac{T_{Bp}^t(f_2) - CF_v(f_2)}{CF_{att}(f_2)}$$

$$T_{Bp}^t(f_1) = \underbrace{a(f_1, f_2) \cdot CF_{att}(f_1) + CF_v(f_1)}_{Ap} - \underbrace{b(f_1, f_2) \cdot \frac{CF_{att}(f_1)}{CF_{att}(f_2)} \cdot CF_v(f_2)}_{Bp} + \underbrace{b(f_1, f_2) \cdot \frac{CF_{att}(f_1)}{CF_{att}(f_2)} \cdot T_{Bp}^t(f_2)}_{Bp}$$

**Ap**

**Bp**

邻近频率的 TBs的关系可描述为一个线性函数，斜率和截距仅与植被性质有关。

**A和B 定义为微波植被指数 - MVIs**



# 微波植被指数的提取

假定: 植被组分 $V_e$ 和 $V_{att}$ 之间没有极化的依赖性

在线性方程中通过观测直接求解两个植被相关组分(斜率和截距)

$$B(f_1, f_2) = \frac{T_{Bv}^t(f_1) - T_{Bh}^t(f_1)}{T_{Bv}^t(f_2) - T_{Bh}^t(f_2)}$$

$$A(f_1, f_2) = \frac{1}{2} \left( T_{Bv}^t(f_2) + T_{Bh}^t(f_2) \right) - \frac{1}{2} B(f_1, f_2) \cdot \left( T_{Bv}^t(f_1) + T_{Bh}^t(f_1) \right)$$

利用**AMSR-E**数据共可获得四个微波植被指数,

即: 低频组合 **A(C,X) and B(C,X)**;

高频组合 **A(X,Ku) and B(X,Ku)**

# 微波植被指数中A和B参数的特征



$$A(f_1, f_2) = a(f_1, f_2) \cdot V_{att}(f_1) + V_e(f_1) - b(f_1, f_2) \cdot \frac{V_{att}(f_1)}{V_{att}(f_2)} \cdot V_e(f_2)$$

$$B(f_1, f_2) = b(f_1, f_2) \cdot \frac{V_{att}(f_1)}{V_{att}(f_2)}$$

- A** 是一个植被覆盖度，温度，植被含水量，湿生物量，以及散射体形状和尺寸的函数；
- B** 是一个植被覆盖度，植被含水量，湿生物量，以及散射体形状和尺寸的函数，与温度无关。

对于穿透性植被的表面：

$A > 0$  和  $B < 1$ ；

$A(C, X) < A(X, Ku)$ ：低频组合 < 高频组合；

$B(C, X) > B(X, ku)$ ：低频组合 > 高频组合；

对于裸土：

$A = a (\approx 0)$  and  $B = b (\approx 1)$ ；

对于积雪：

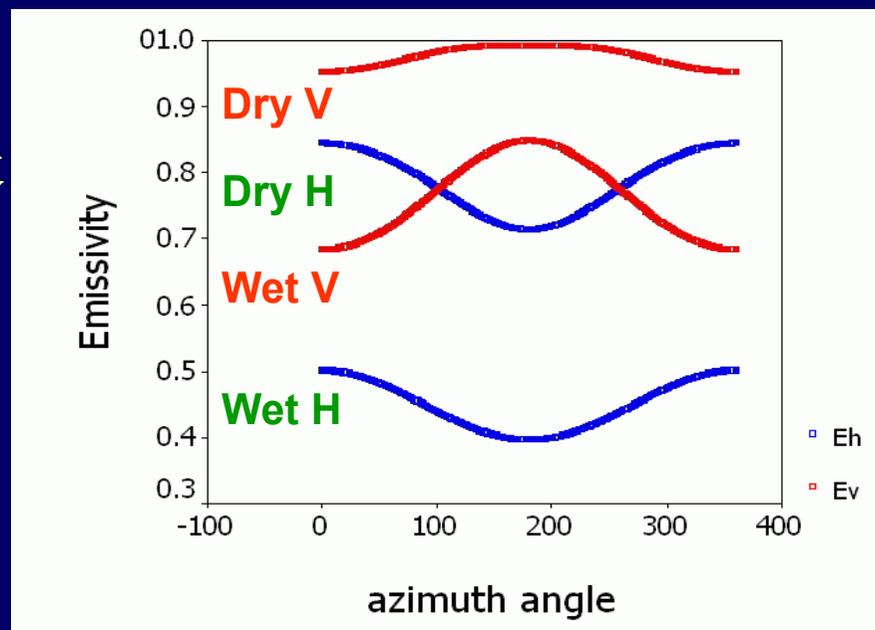
$A < 0$  and  $B < 1$ 。

# 山区地形对辐射的影响

- ① 由于地形起伏会引起局地观测几何与极化旋转变化的影响；
- ② 阴影效应 – 传感器观测不到部分地表；
- ③ 邻近效应 – 同一视场内相邻亚象元的互相影响；
- ④ 不同高程引起的大气穿透路程不同。

给定坡度（ $10^\circ$ ）和地表粗糙度，  
模拟X波段 $52^\circ$ 入射角下地形对裸露  
地表辐射的影响

地形不仅会引起辐射值量值上  
变化而且引起极化变化



# 象元内模拟地形影响

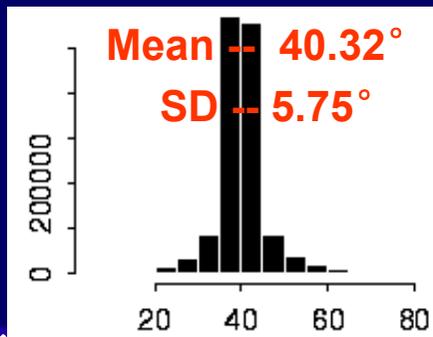
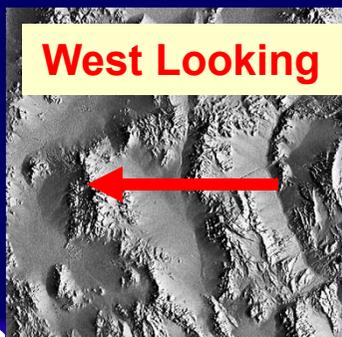
包括地形影响的面模型

$$E_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} E_p(i, \theta_i, \psi_i)$$

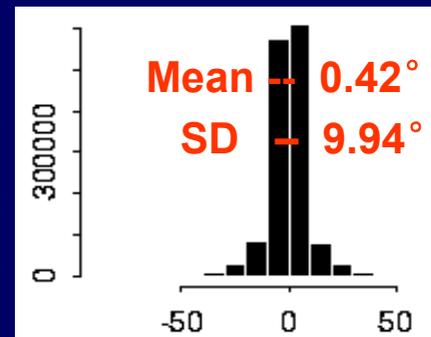
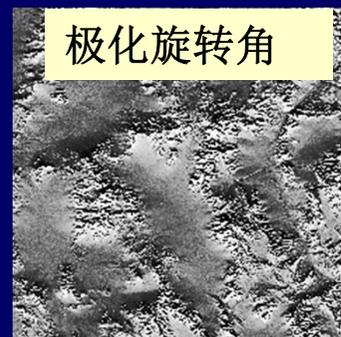
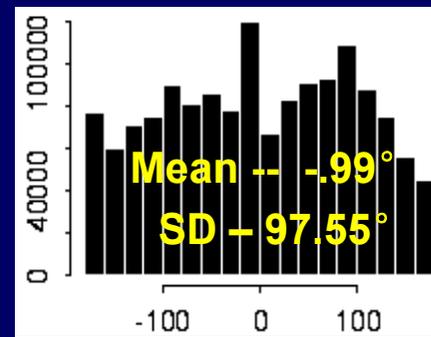
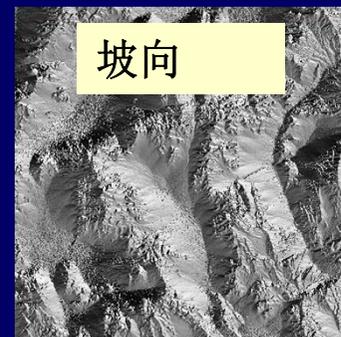
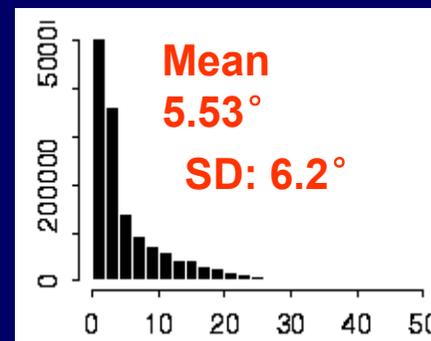
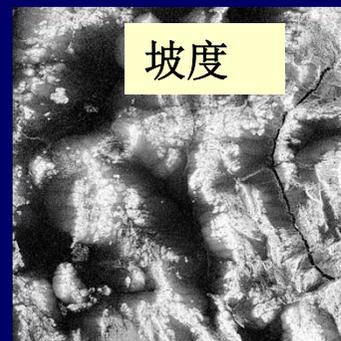
$\theta$  – 入射角;  $\psi$  – 极化旋转角;  $n$  - # facets in footprint;  $p$  – 极化

Global incidence  $40^\circ$

本地角



An example from 100m DEM  
(lat  $36^\circ -37^\circ$ , lon:  $116^\circ -117^\circ$ )

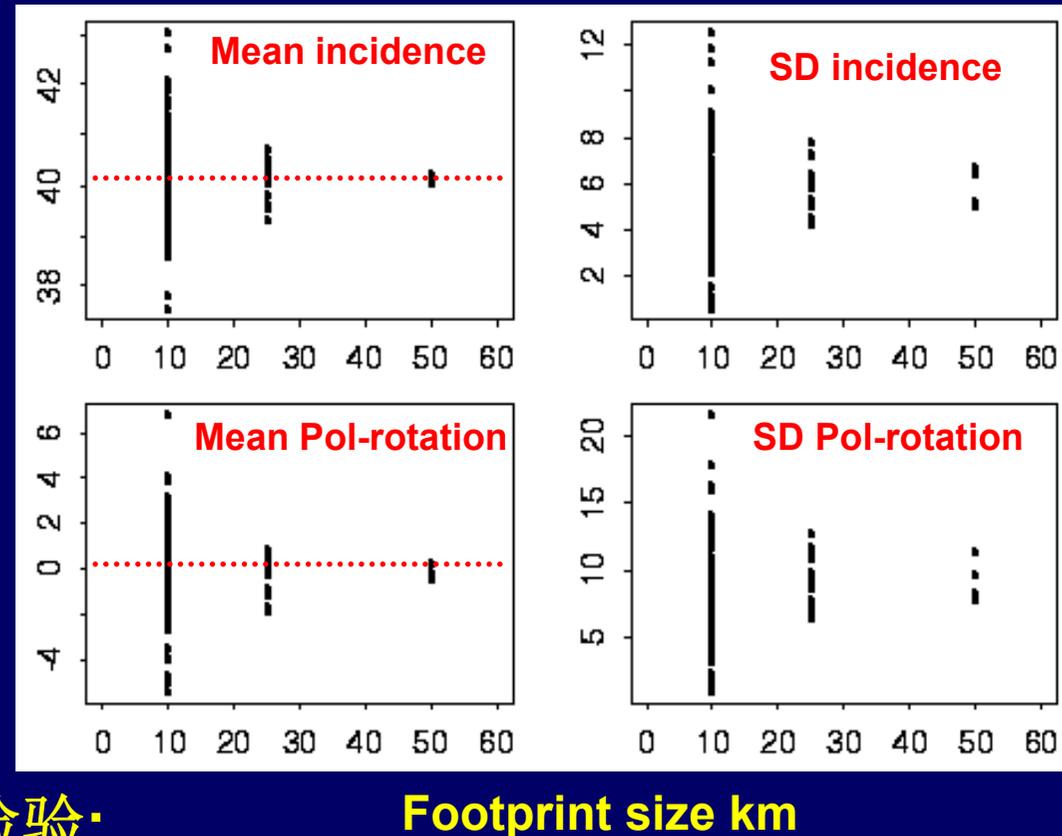


# 地形影响与象元大小的关系



在该例子中:分辨率越粗,平均入射角越接近于卫星观测角,极化旋转角接近于 $0^\circ$

粗分辨率地形影响越弱(小)?



对如下两个假设进行检验:

1. 平均入射角
2. 平均极化旋转角

我们是否可以用这两个概念来代替总的地形影响?

# 地形影响校正技术——对入射角的校正

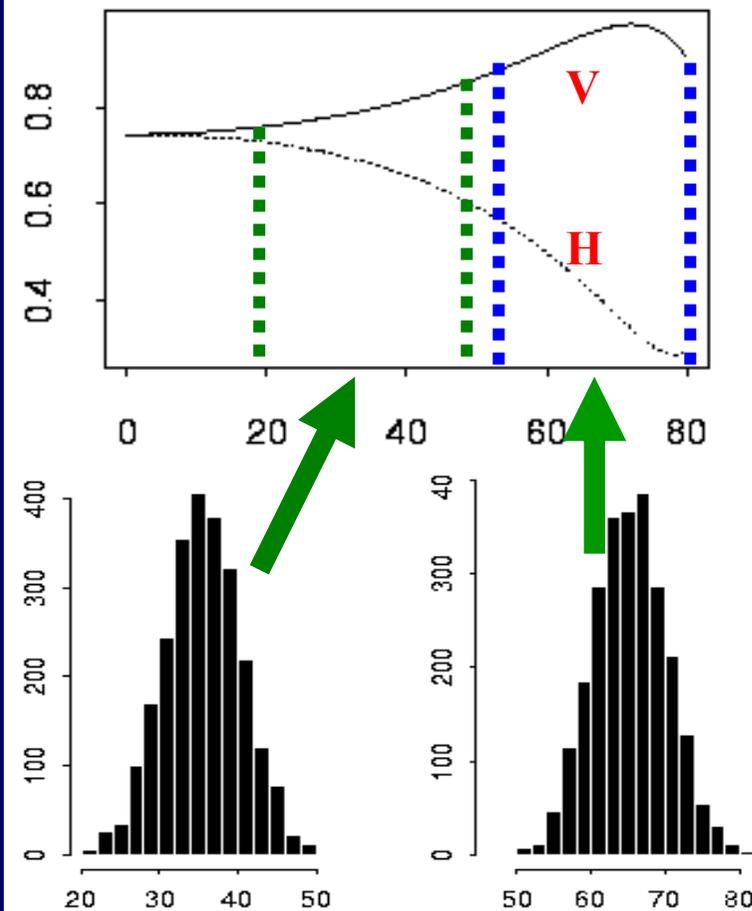


## 入射角假设检验

用象元内每个地形得到的平均入射角来计算发射率

1. 小入射角下地形影响小，角度越大影响越厉害
2. 对于一定入射角分布（ $< 70^\circ$ ），平均入射角的假设是合理的。
3. 当入射角接近于  $70^\circ$ ，V极化用平均入射角代替会带来问题

## Typical bare surface emissivity



角度分布直方图

# 地形影响校正技术——极化旋转校正



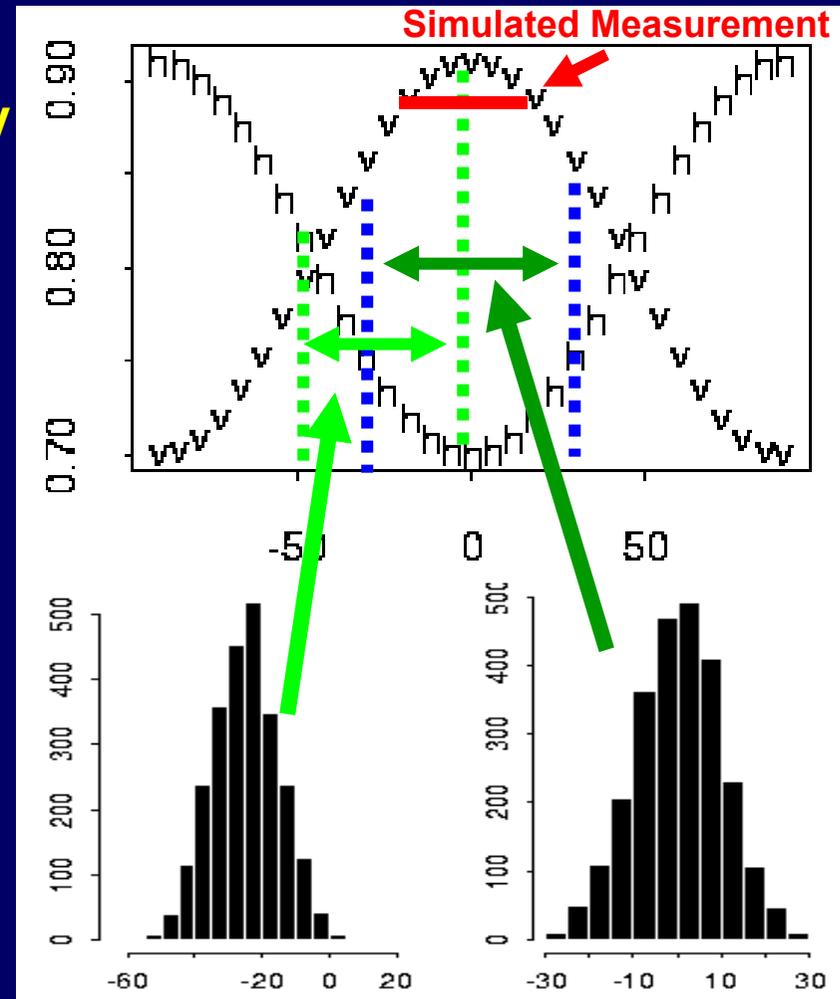
1. 随入射角增大，极化旋转影响增加；
2. 极化旋转角的影响会使H极化偏大而V极化偏小；
3. **Impact of polarization rotation is asymmetric around 0°**

只有在偏离0° 才能使用象元内所有面得到的平均旋转极化角

校正方法为：

平均绝对极化旋转角：

$$\bar{\psi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} |\psi_i|$$



Histogram of polarization rotation angles

# 地形影响校正技术——极化旋转校正

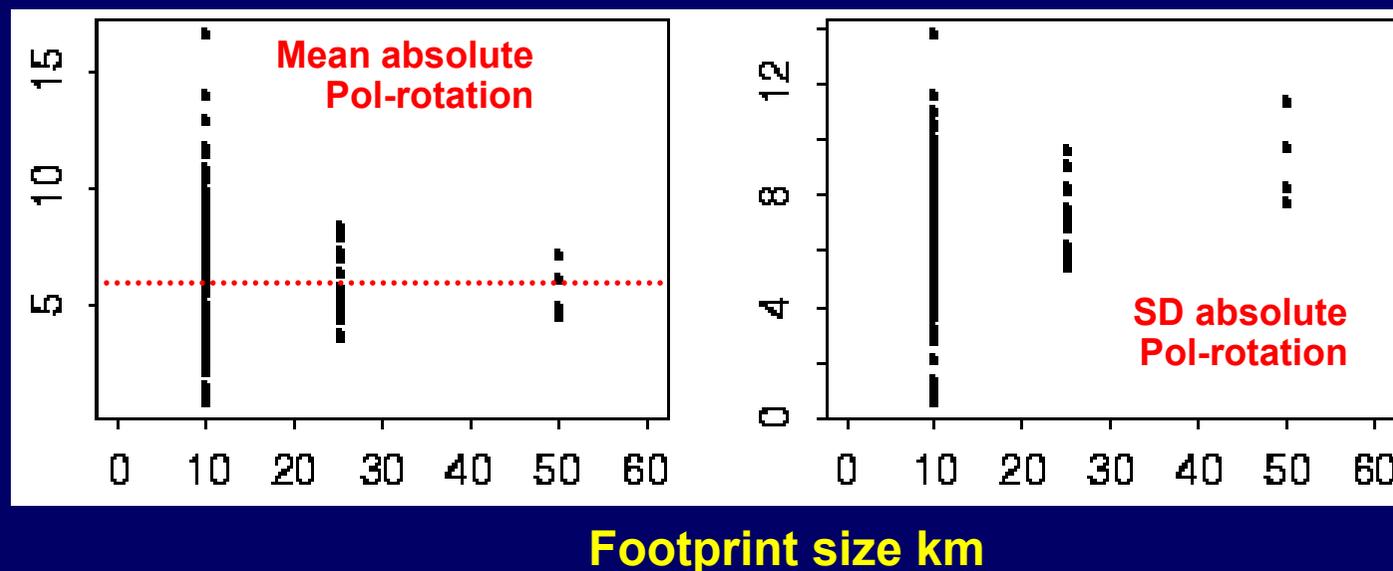


采用的校正技术

平均绝对极化  
旋转角：

$$\bar{\psi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} |\psi_i|$$

地形影响取决于象元大小和极化旋转角



# 检验地形影响校正算法

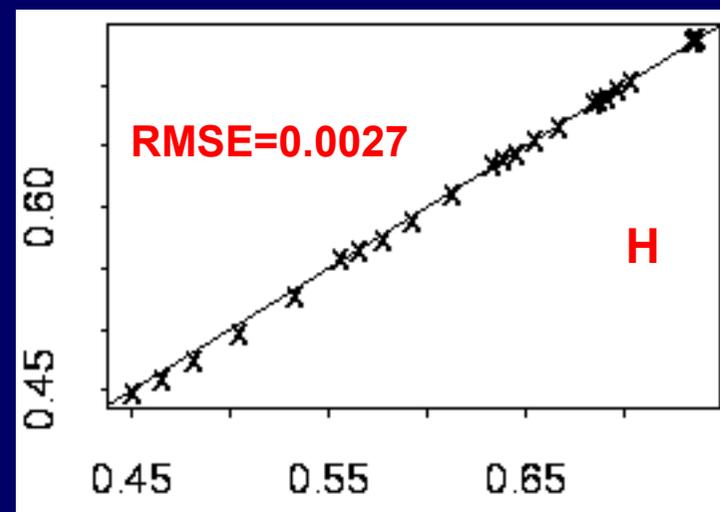
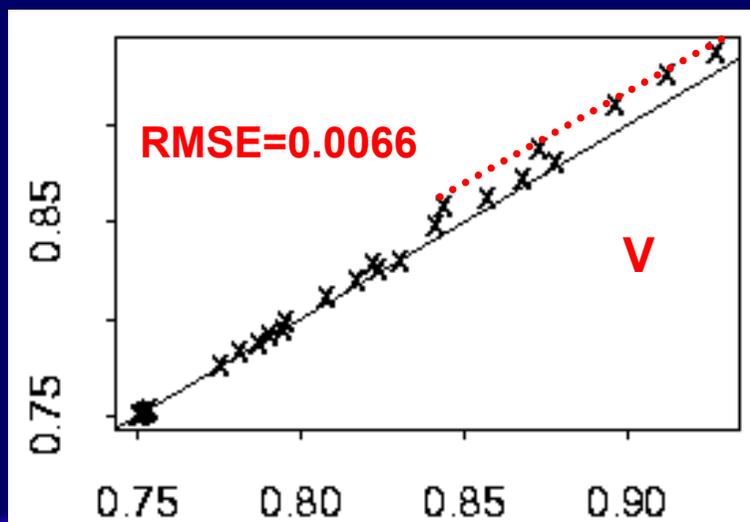
给定裸土地表土壤水分与粗糙度下模拟的地形影响

几何参数

正态分布：均值/均方根误差

入射角	25/5	35/5	45/5	55/5	65/5
极化旋转	-25/10	-15/10	0/10	10/10	20/10

检验校正算法：平均入射角和平均绝对极化旋转角





# 新开发的山区校正算法

- 1) 用高分辨率**DEM**及卫星轨道计算得到的平均入射角
- 2) 用极化旋转角绝对值的平均来校正极化旋转

$$T'_{Bv}(\theta) + T'_{Bh}(\theta) = T_{Bv}(\theta) + T_{Bh}(\theta)$$

$$\frac{T'_{Bv}(\theta) - T'_{Bh}(\theta)}{\cos^2(\psi) - \sin^2(\psi)} = T_{Bv}(\theta) - T_{Bh}(\theta)$$

或

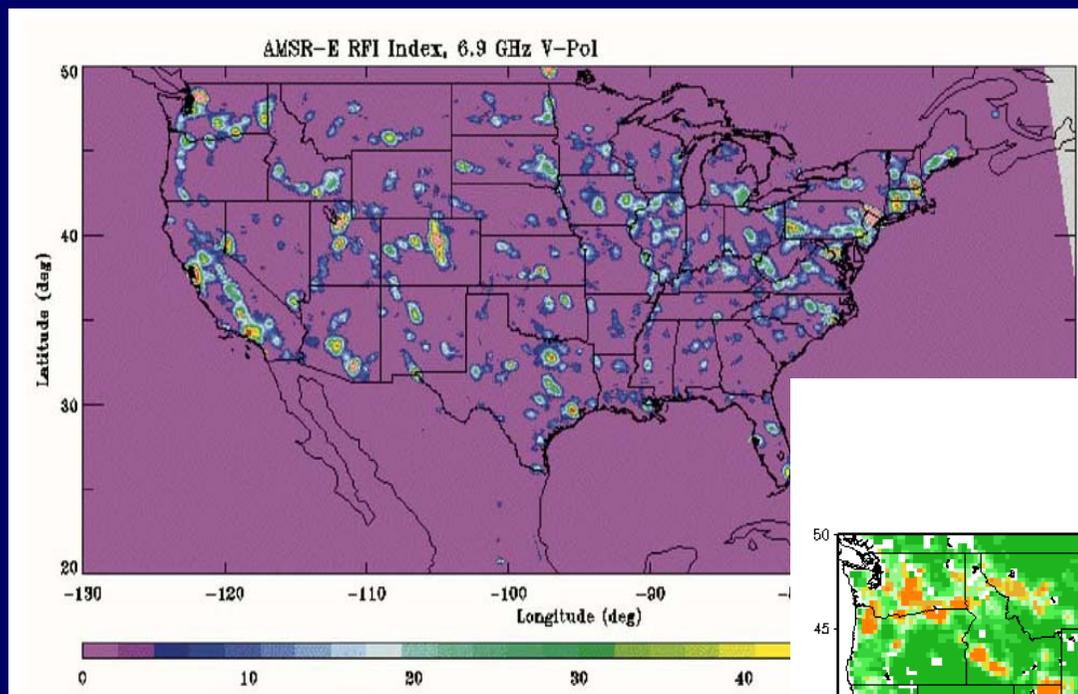
$$T_{Bv}(\theta) = 0.5 \cdot \left[ T'_{Bv}(\theta) + T'_{Bh}(\theta) + \frac{T'_{Bv}(\theta) - T'_{Bh}(\theta)}{\cos^2(\psi) - \sin^2(\psi)} \right] \quad T_{Bh}(\theta) = 0.5 \cdot \left[ T'_{Bv}(\theta) + T'_{Bh}(\theta) - \frac{T'_{Bv}(\theta) - T'_{Bh}(\theta)}{\cos^2(\psi) - \sin^2(\psi)} \right]$$

可见，地形对微波植被指数的获取没有影响，即：

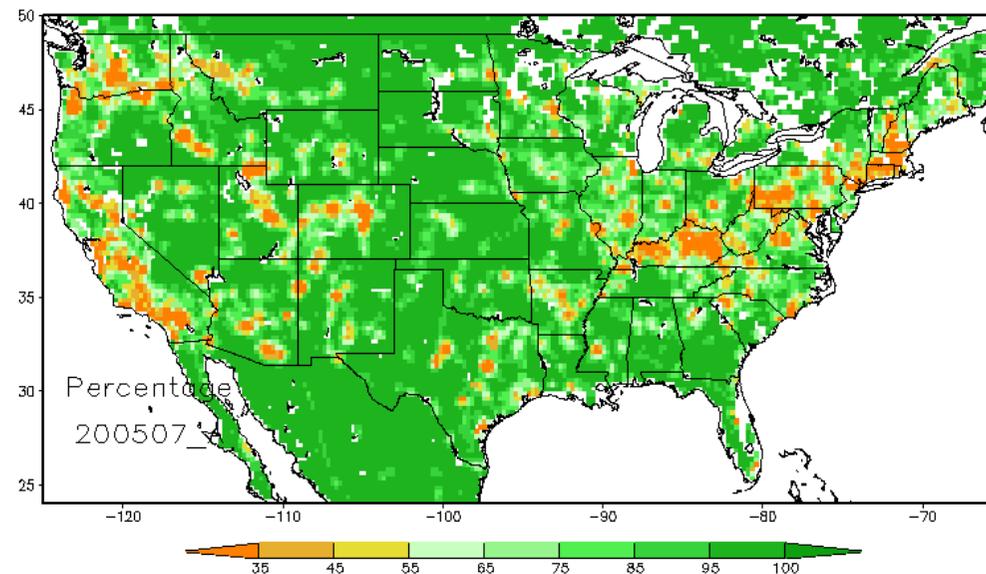
$$B(f_1, f_2) = \frac{T_{Bv}^t(f_1) - T_{Bh}^t(f_1)}{T_{Bv}^t(f_2) - T_{Bh}^t(f_2)}$$

$$A(f_1, f_2) = \frac{1}{2} (T_{Bv}^t(f_2) + T_{Bh}^t(f_2)) - \frac{1}{2} B(f_1, f_2) \cdot (T_{Bv}^t(f_1) + T_{Bh}^t(f_1))$$

# 射频干扰(RFI)的影响



左: Li and Njoku 2003  
右: 升轨MVs(C,X)在2005年7月受RFI影响次数百分比



- MVs受RFI影响百分比分布与RFI的分布格局类似;
- 二者与城市面积和分布匹配较好;
- MVs受RFI影响百分比高的像元可能仍被应用到实际的地表参数监测中。

# 数据处理

强RFI或积雪的影响

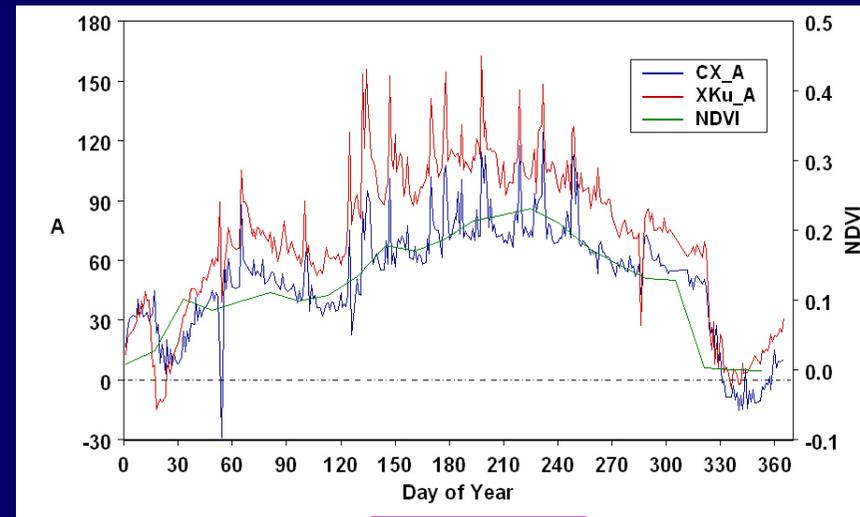
$A < 0$  and/or  $B > 1$

弱RFI和大气影响(包括雨和云)

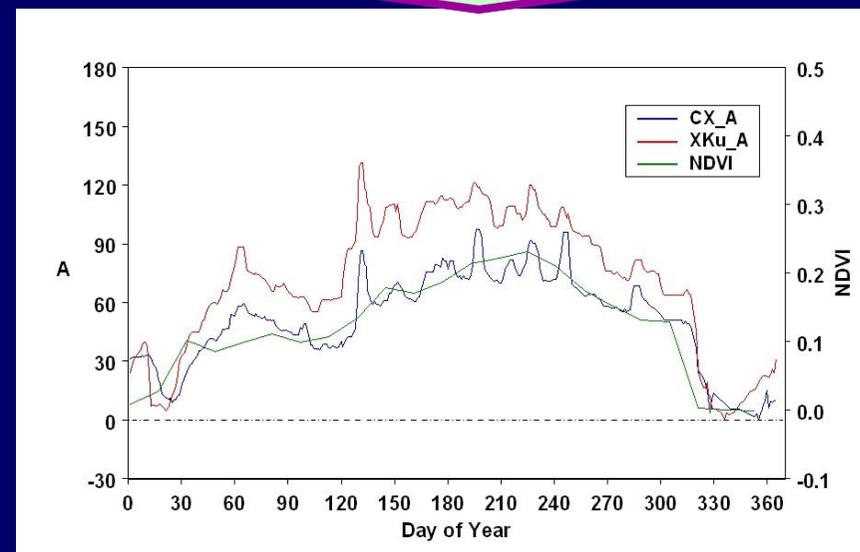
A and B Fluctuations

数据处理:

1. Remove  $A < 0$  or  $B > 1$
2. Run a median filter



Median Filter



# 数据处理

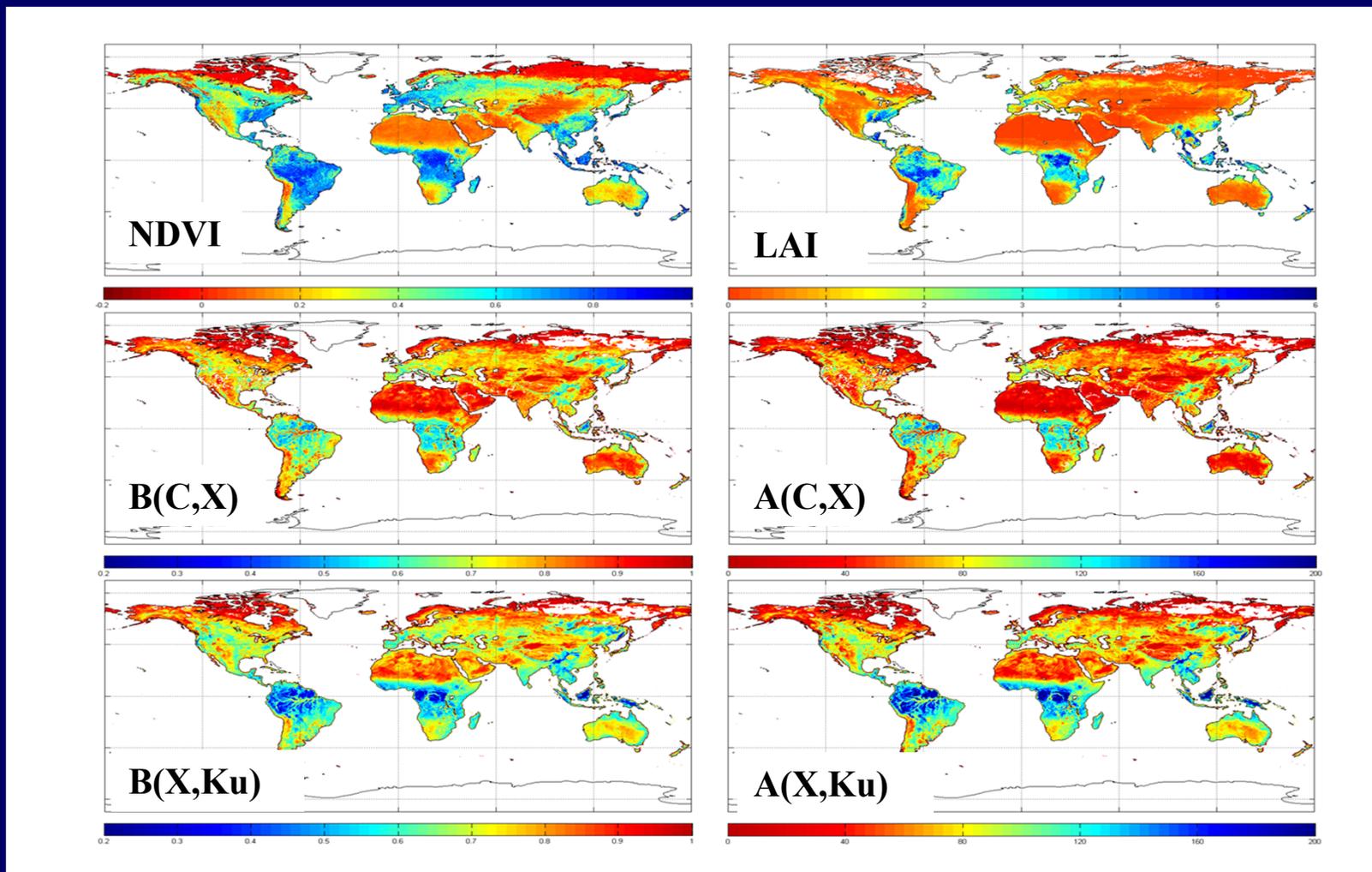
## **MVIs与MODIS 16天合成NDVI和8天合成LAI数据的比较**

1. 在不同季节，**MVIs**与**NDVI**和**LAI**是否具有相同的全球分布格局？
2. **MVIs**是否能够提供植被物候信息，并如何与**NDVI**和**LAI**相比较？
3. 不同类型的**MVIs**与对应的**NDVI**、**LAI**之间的相关关系如何？
4. **MVIs**是否能够提供其他信息，以作为**NDVI**和**LAI**的补充？

# 不同植被指数与微波指数MVI<sub>s</sub>的比较



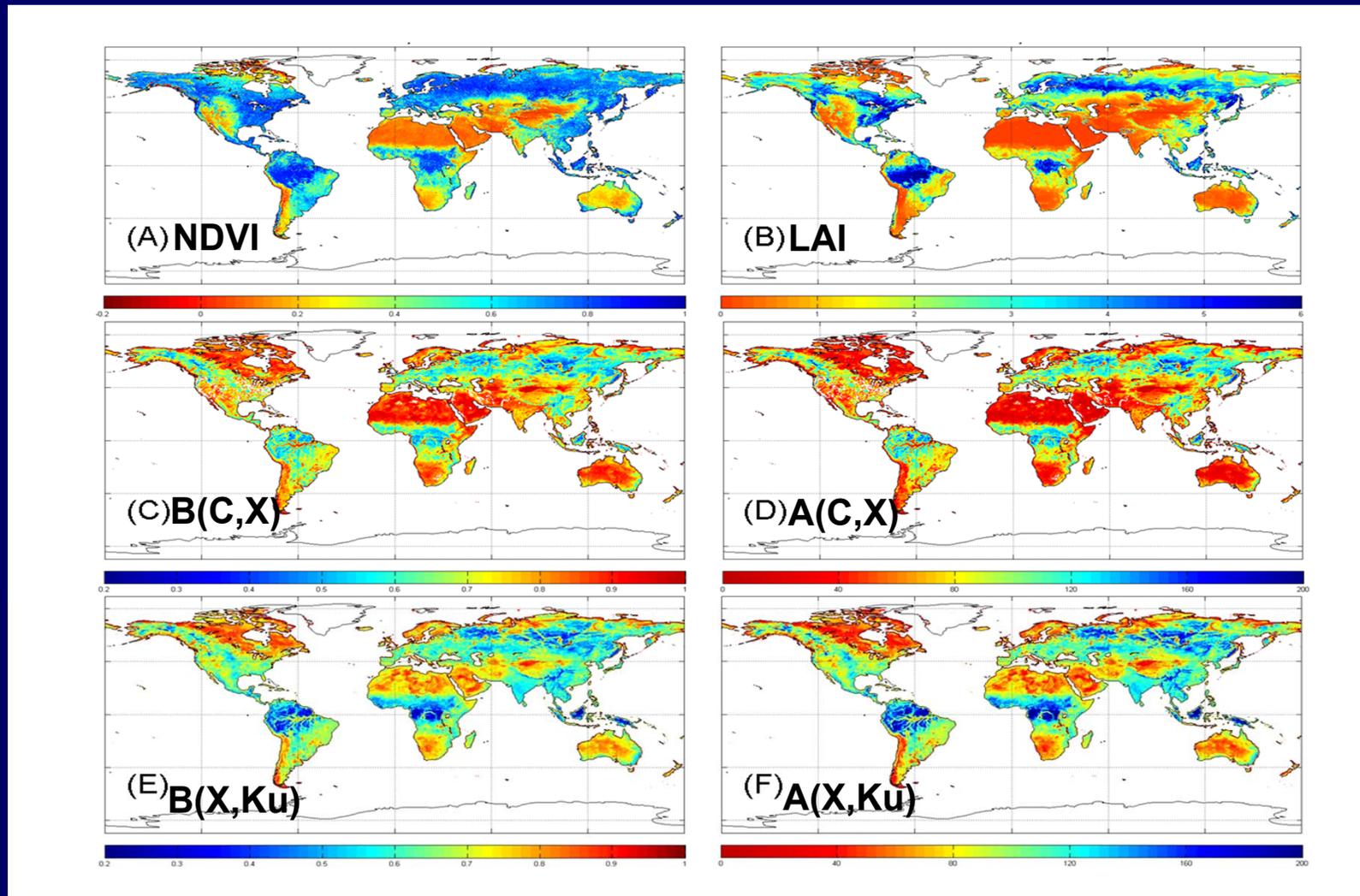
2003年4月平均微波植被指数MVI<sub>s</sub>(AMSR-E)与NDVI&LAI(MODIS)的对比



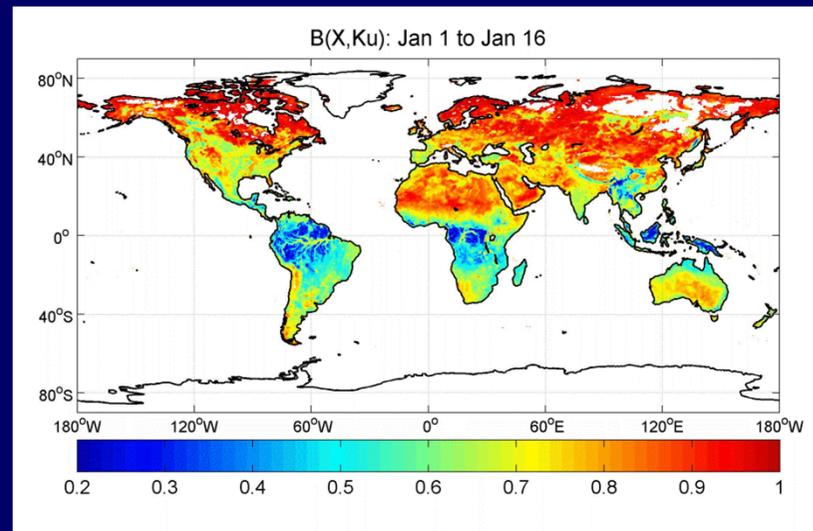
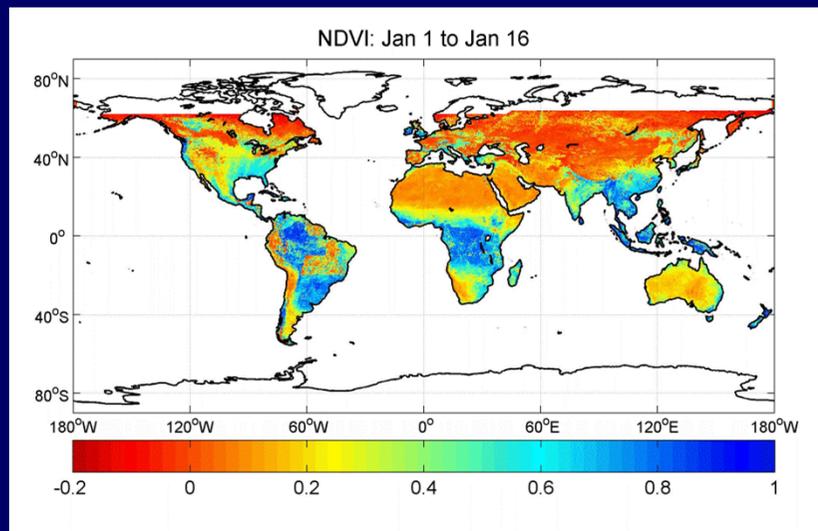
# 不同植被指数与微波指数MVIs的比较



2003年7月平均微波植被指数MVI<sub>s</sub>(AMSR-E)与NDVI&LAI(MODIS)的对比



# NDVI和微波植被指数MVI

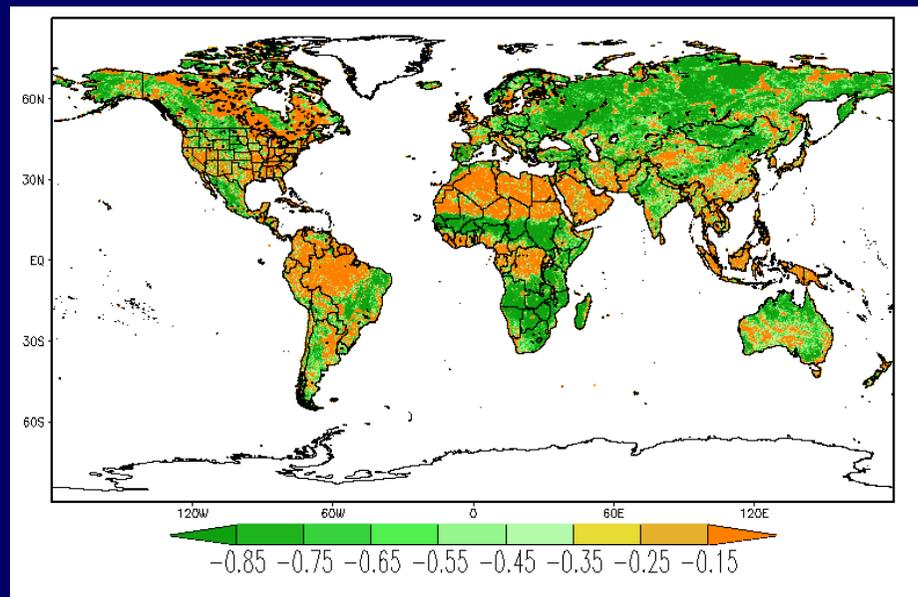


不同季节NDVI和MVI全球分布格局  
总体一致

传感器观测的物理差异导致光学和微波植被指数间的不同:

- NDVI – 主要反映叶质部分的绿色;
- MVI – 除了植被叶质部分, 还和植被木质部分密切相关

遥感科学国家重点实验室



# 光学与微波观测对植被影响的差异

## 植被发射率

$$\varepsilon_p^v = (1 - \omega) \cdot (1 - L_p)$$

## 衰减因子

$$L_p = \exp(-\tau / \cos(\theta))$$

## 植被冠层光学厚度的组成

$$\tau_t = \tau_s(\text{stalks}) + \tau_s(\text{leaves}) + \tau_a(\text{stalks}) + \tau_a(\text{leaves})$$

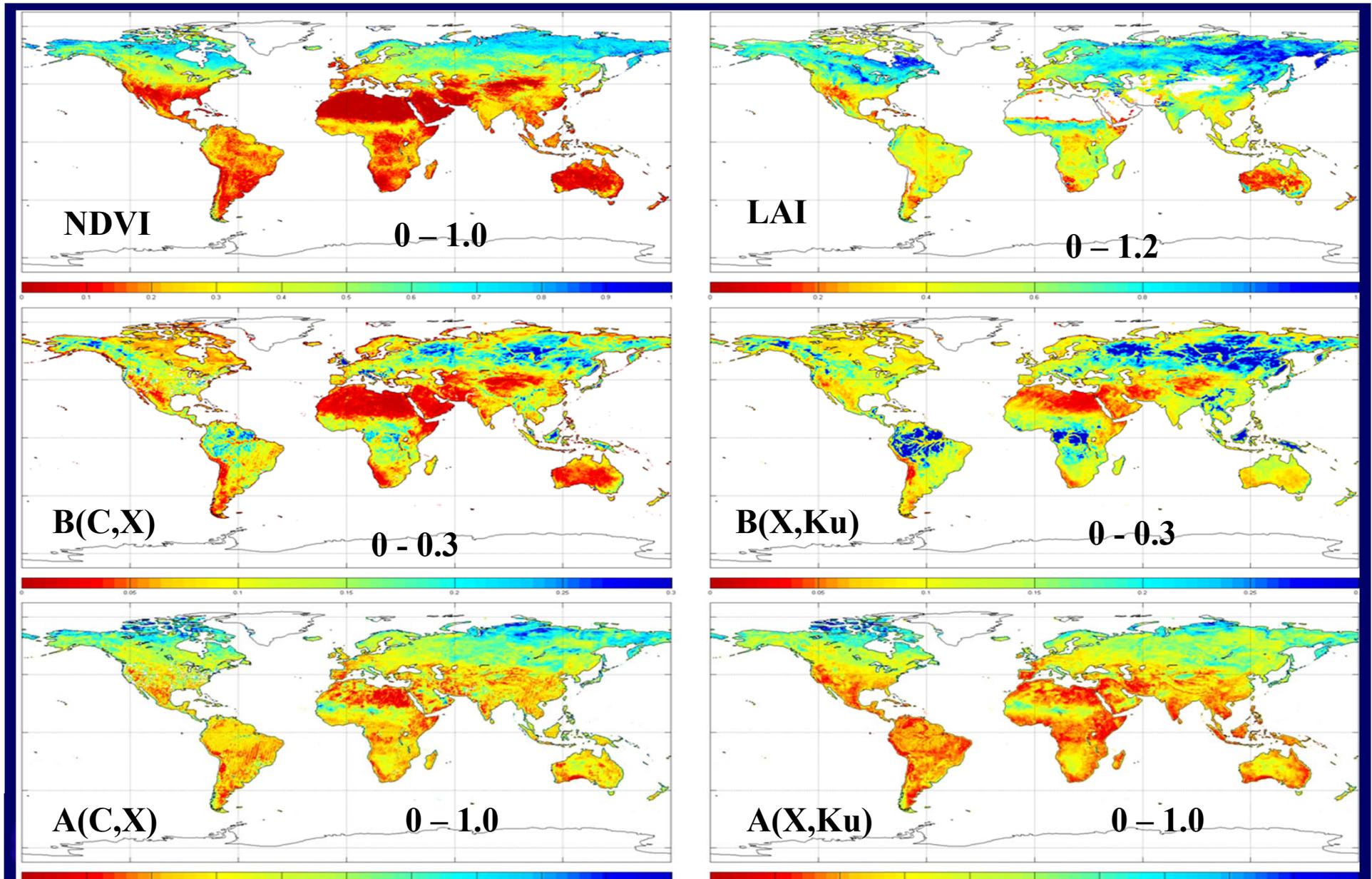
## 植被冠层光学厚度与LAI的关系

$$\tau_a(\text{leaves}) = \frac{4\pi}{3\lambda} \varepsilon_{\text{leaf}}'' \cdot t \cdot \text{LAI}$$

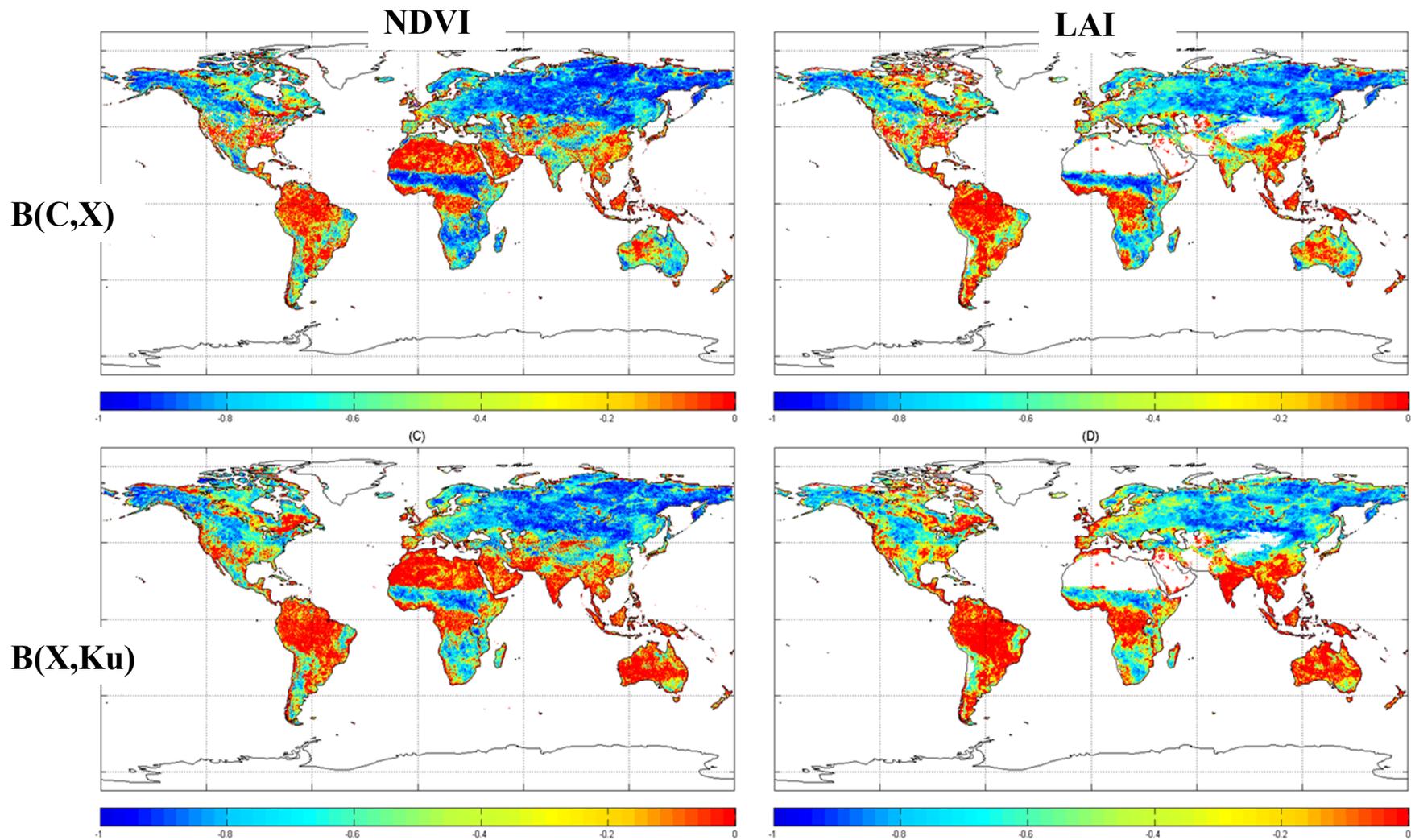
Ulaby, et al., 1986

微波观测的信号不仅与植被冠层的吸收特性有关，而且与其叶片和木质部分的散射特性密切相关。

# MVIs与NDVI相关关系的季节变化



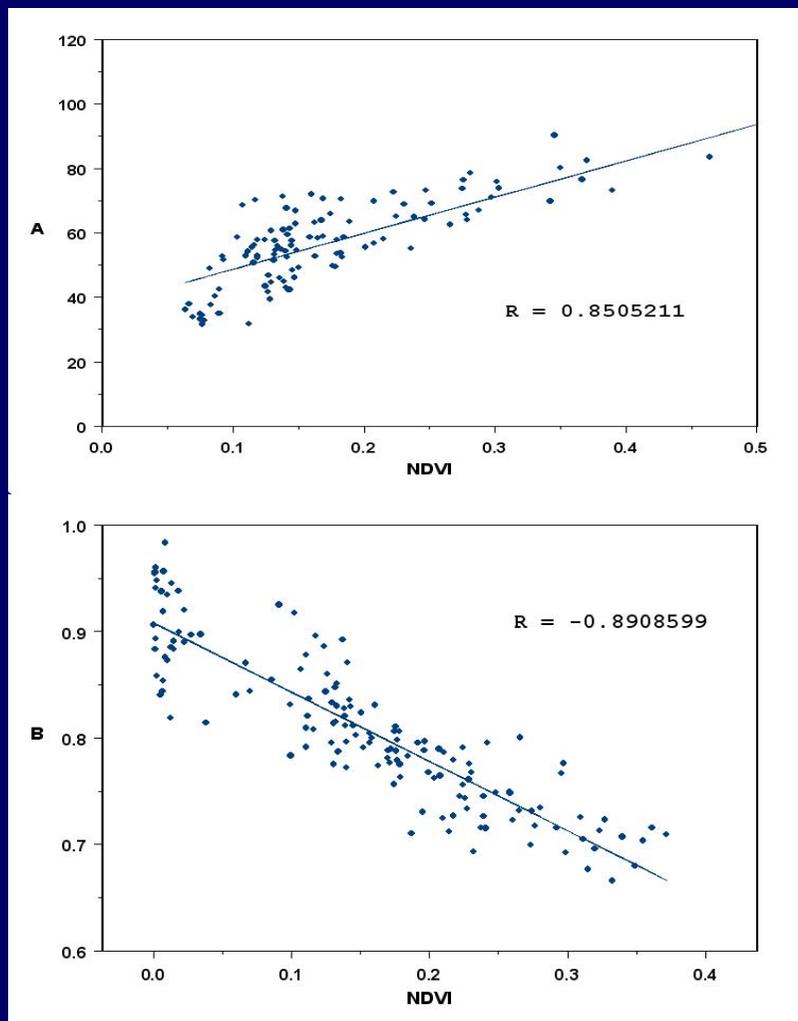
# MVIs与NDVI和LAI的相关性



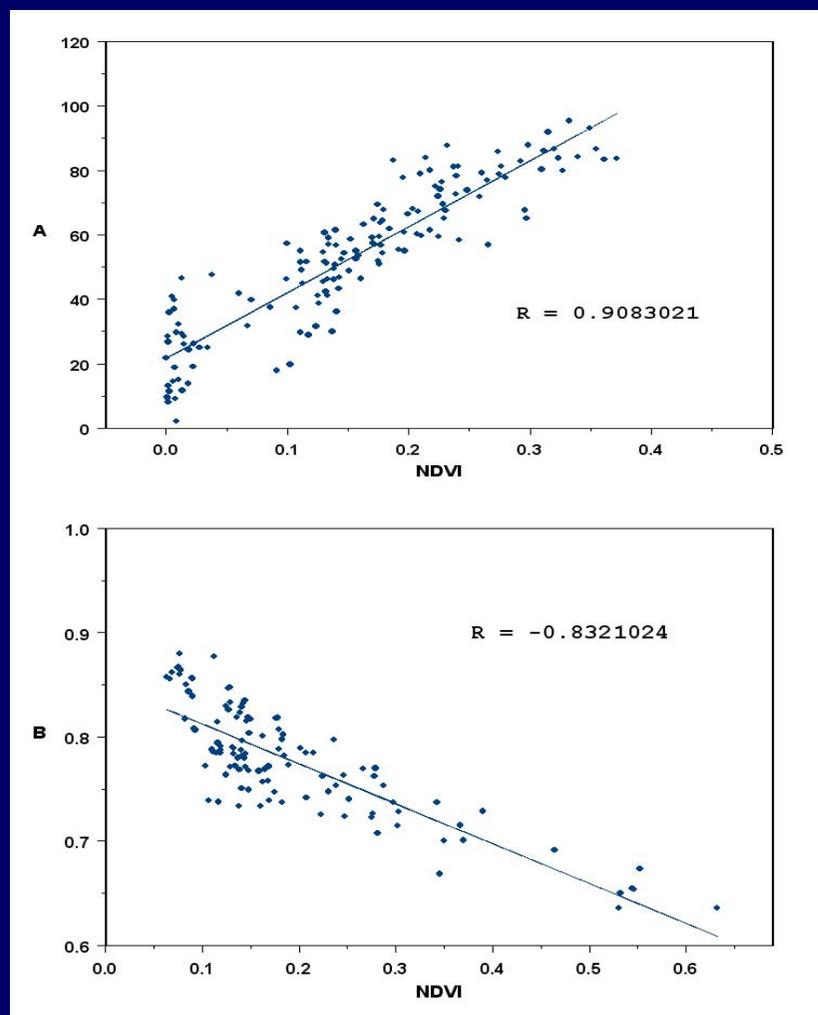
# 植被指数MVI和NDVI的相关性



## 西藏灌木覆盖地表两者的相关性



## 蒙古草地表面两者的相关性

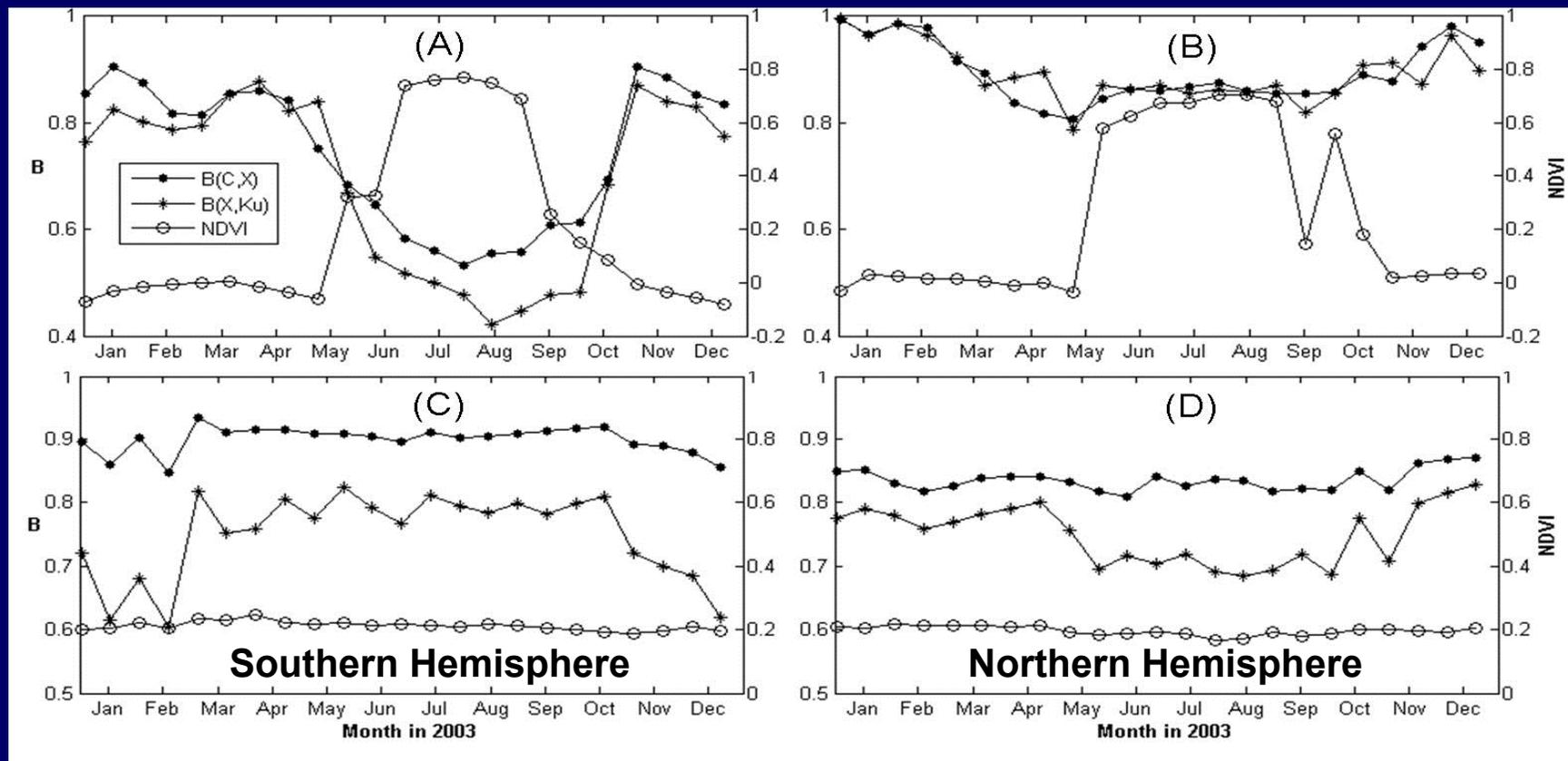


# 全球相关统计



地表类型	B(C,X)	B(X,Ku)	地表覆盖类型	B(C,X)	B(X,Ku)
落叶针叶林	-0.837	-0.772	草地	-0.698	-0.696
常绿针叶林	-0.652	-0.510	灌木	-0.553	-0.367
草原	-0.582	-0.433	农作物	-0.508	-0.427
落叶阔叶林	-0.122	-0.538	混合林	-0.473	-0.441
常绿阔叶林	0.031	0.080	裸地	-0.056	-0.024

# 灌木的时间序列图



上: 样本来自北美: MVI变化趋势与NDVI类似, 但MVI变化更为明显.

下: 木本灌木: 1) MVI和NDVI全年均变化不大, 但B(C,X)的变化具有不同的量级;  
2) B(X,Ku)显示了较好的季节特征.

# 不同植被指数与微波指数MVI<sub>s</sub>的比较

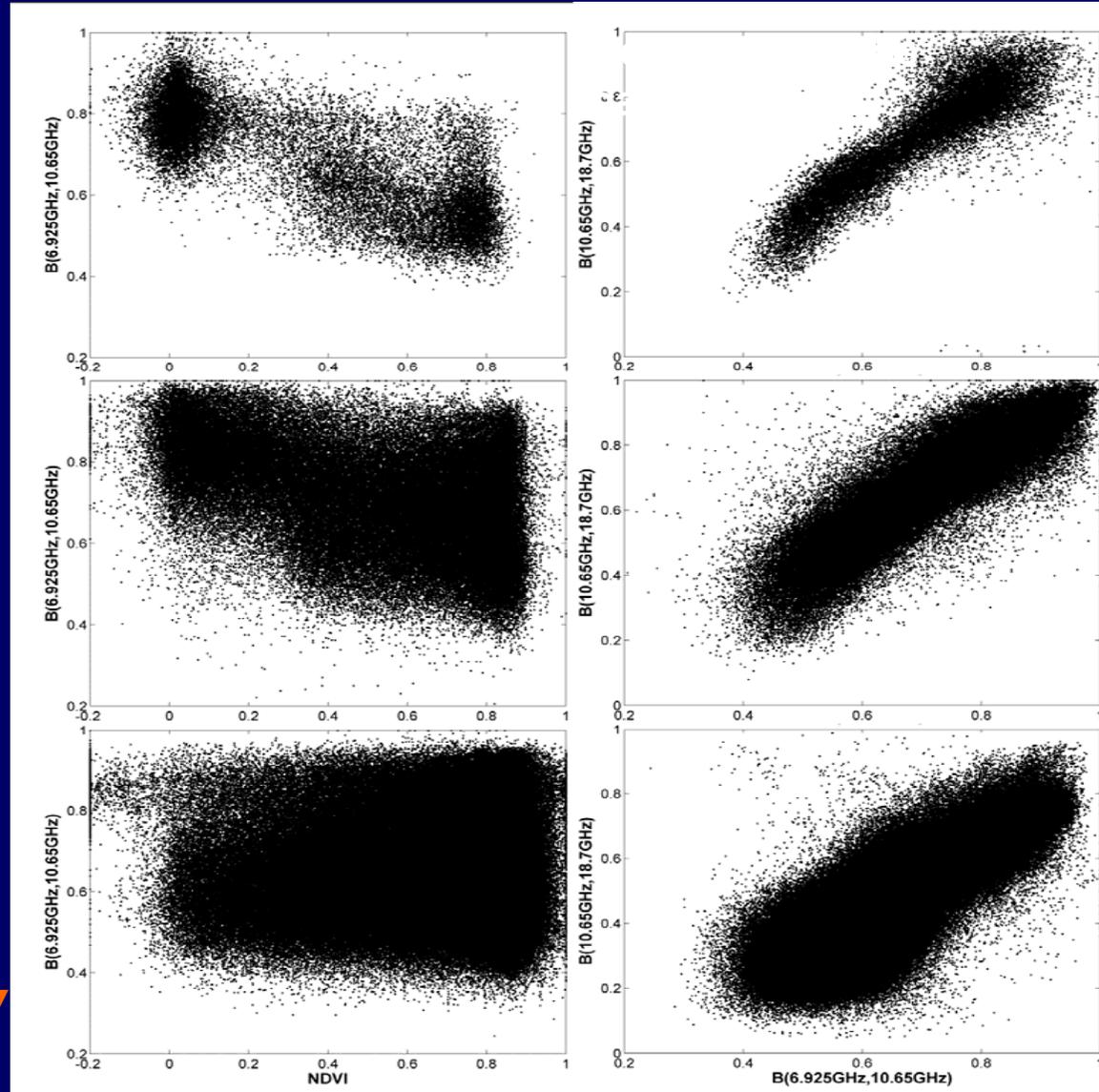
## 全球森林的NDVI与MVI<sub>s</sub>对比实例

左列：NDVI vs. 低频B参数  
 →在给定NDVI情况下，MVI<sub>s</sub>的变化范围要大；

右列：高频 vs. 低频B参数  
 →不同的两个波段的组合提供不同的植被信息

表明：MVI<sub>s</sub> 提供了重要的新的植被信息，特别是对植被的木质部分具有敏感性

遥感科学国家重点实验室





# 针对现有卫星微波植被指数研究小结

根据不同频率地表发射率的特点，发现相邻两个波段的发射率呈线性关系，并且该线性关系的斜率和截距只和植被信息有关——微波植被指数（MVI）。从而发展了提取植被信号的新技术。

- 植被指数是植被覆盖率、含水量、湿生物量、散射体的形状和大小的函数；
- 在不同季节，MVI全球分布格局与NDVI、LAI相似，并能提供植被物候信息；
- 不同地表覆盖类型下，MVI与NDVI具有很好的相关性，特别是草地、灌木等低矮植被。

## 观测不同的植被信息：

微波植被指数既提供了叶子的信息又提供了杆部分的信息，NDVI反映植被的绿度信息而LAI反映叶子的面积信息

## 应用前景：

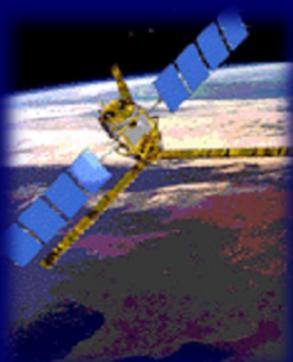
- 微波与光学植被指数具有互补的特性，它填补全球植被监测信息的空缺，为定量反演植被生物量提供了新的可能。
- 该技术可以应用于其他被动微波遥感传感器（如WindSat, TMI/TRMM, SSM/I, SSMR等），获取对应的微波植被指数。



# 遥感科学国家重点实验室

中国科学院遥感应用研究所·北京师范大学

# 谢谢!



地址：北京市朝阳区大屯路甲20号北 北京9718信箱（100101）

电话：86-10-64838048 传真：86-10-64838048

邮箱：jshi@irsa.ac.cn

网址：www.irsa.ac.cn