

# 卫星遥感多通道微波比辐射率植被指数(EDVI) 在不同类型植被区的特点分析研究

胡继恒, 李锐, 王雨, 王恽璞, 符玉云

(中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026)

**摘要:** 地表微波比辐射率植被指数(emissivity difference vegetation index, EDVI)可以很好地指示地表植被含水量,并且可以应用于有云情况和浓密植被区域. 以往的研究仅限于使用19GHz和37GHz微波信号,仅能反映植被某单层的含水情况,而Aqua卫星的Advanced Microwave Radiometer-Earth Observing System(AMSR-E)微波辐射计观测可为植被含水量遥感提供更多的通道选择. 本研究利用多源卫星遥感产品,包括AMSR-E亮温、Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS)云参数和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的再分析资料等,反演了东亚及东南亚地区6.925、10.65、18.7、36.5GHz垂直极化微波通道的陆地表微波比辐射率,并以此建立了三组多通道微波比辐射率植被指数EDVI(6v, 37v)、EDVI(10v, 37v)和EDVI(18v, 37v),研究了该三组EDVI指数在森林和农田两类植被类型区的特点. 结果表明,在森林区域,EDVI(6v, 37v)和EDVI(10v, 37v)普遍大于EDVI(18v, 37v),这很可能是由于前两者对于浓密植被的穿透更深,能反映更多的植被含水量,而EDVI(18v, 37v)的穿透性相对较弱,主要反映冠层顶部、相对浅薄植被层的植被含水量. 综合利用这三组EDVI指数之间的差异,在高大浓密植被区域,可以实现对植被含水量在上、中、下三层的垂直分布的估计. 对于低矮植被,其垂直结构不丰富,此三者的差异不明显.

**关键词:** 卫星遥感; 地表微波比辐射率; 比辐射率差分植被指数; 植被含水量; 植被垂直结构

**中图分类号:** P412.27      **文献标识码:** A      doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2020.04.016

**引用格式:** 胡继恒, 李锐, 王雨, 等. 卫星遥感多通道微波比辐射率植被指数(EDVI)在不同类型植被区的特点分析研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2020, 50(4): 528-541.

HU Jiheng, LI Rui, WANG Yu, et al. Analysis of the characteristics of satellite-derived multiple channel microwave Emissivity Difference Vegetation Index (EDVI) over different vegetation types[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2020, 50(4): 528-541.

## Analysis of the characteristics of satellite-derived multiple channel microwave emissivity difference vegetation index (EDVI) over different vegetation types

HU Jiheng, LI Rui, WANG Yu, WANG Yipu, FU Yuyun

(School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** The satellite-derived microwave land surface Emissivity Difference Vegetation Index (EDVI) is a good indicator of vegetation water content (VWC). And it can be used under a cloudy sky and over dense

**收稿日期:** 2019-02-08; **修回日期:** 2019-03-15

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFC1501402), 国家自然科学基金(41820104, 41675022, 41375148), 贝尔蒙特论坛(Belmont Forum and JPI-Climate Collaborative Research Action)和国家自然科学基金委员会合作项目(41661144007), 江苏省2011气候变化协同创新中心项目资助.

**作者简介:** 胡继恒, 男, 1992年生, 硕士生. 研究方向: 星载微波遥感及其应用. E-mail: hjh18305@mail.ustc.edu.cn

**通讯作者:** 李锐, 博士/教授. E-mail: rli7@ustc.edu.cn

vegetation areas where satellite optical vegetation index can be easily saturated. Previous studies on EDVI used the two frequencies of 19 and 37 GHz only. The associated EDVI can only represent VWC in one single layer of the canopy. Measurements from Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System (AMSR-E) onboard NASA's Aqua satellite provided multiple choices of satellite remote sensing VWC with EDVI. In this study, multiple source measurements, including microwave brightness temperature from AMSR-E, cloud parameters from Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), and reanalysis of atmosphere states from ECMWF were synergized, to retrieve the microwave land surface emissivity at 6.925, 10.65, 18.7 and 36.5 GHz in eastern and southeastern Asia from 2003 to 2010. The retrievals were then used to define multiple channel EDVIs of EDVI(6v, 37v), EDVI(10v, 37v) and EDVI(18v, 37v) and the characteristics of those EDVIs over forest and cropland areas were studied. The results showed that, EDVI(6v, 37v) and EDVI(10v, 37v) are greater than EDVI(18v, 37v) in forest dominated areas. This is most likely due to the fact that the penetration depth of EDVI(6v, 37v) and EDVI(10v, 37v) are deeper than that of EDVI(18v, 37v), thus indicating relatively more VWC in thicker canopy layer of the forest. The differences among the three EDVIs can be used to represent the vertical distribution of VWC in upper, middle and lower layers of high and dense vegetation. However, for the shallow and sparse vegetation without significant vertical variation of VWC, the differences among the three EDVIs are too small to be used.

**Key words:** satellite remote sensing; microwave land surface emissivity; emissivity difference vegetation index(EDVI); vegetation water content; vertical structure of vegetation

## 0 引言

植被作为一种重要的地表类型一直是全球碳、水循环,陆地-大气辐射收支和生态学的研究重点.随着卫星遥感技术和相关遥感理论模型的发展,卫星遥感已经被广泛地应用于植被绿度<sup>[1]</sup>、植被含水量<sup>[2]</sup>、光合作用强度<sup>[3]</sup>、地表生物量变化<sup>[4]</sup>等诸多特征的监测.

一系列对植被生长状态有着表征作用的遥感指标被发展出来,其中最有代表性的是基于可见光和近红外波段植被辐射特征的归一化植被指数 NDVI (normalized difference vegetation index). NDVI 对植被表层的叶绿素含量十分敏感<sup>[5]</sup>,因此被用来表征一系列的植被特性指标,如叶面积指数 LAI (leaf area index)、叶绿素含量和植被含水量等<sup>[6-8]</sup>.但是, NDVI 具有一定的局限性:由于可见光、近红外电磁波对植被层的穿透性较差, NDVI 在浓密的植被区非常容易达到饱和,难以提供更多关于植被内部结构和生物量等方面的信息<sup>[9]</sup>.另外,它受大气中的云、水汽、气溶胶的影响也十分显著,在夜晚、有云的区域无法进行 NDVI 的遥感反演<sup>[10]</sup>.

相对而言,微波对云具有优秀的穿透能力、受到大气影响较小并且不需要太阳光作为光源.有关被动微波地表辐射和植被关系的研究由来已久,植被

的存在对地表微波比辐射率的影响受到了广泛的关注<sup>[11-12]</sup>.由于植被本身的热辐射发射,和对下层土壤热辐射的散射和衰减作用,植被的存在可以显著地改变地表出射微波辐射特征<sup>[13-14]</sup>,并且显著地改变对土壤湿度观测的敏感性<sup>[15]</sup>.早期的众多理论模型和试验指出,在高于 6 GHz 的微波段,下垫面的微波辐射大部分来自于植被的热辐射发射,并且取决于植被的热力学状态、植物的生物统计学参数和含水量等<sup>[16-19]</sup>.这些研究一般利用简单的两层模型将地表以上的植被层简化成散射和吸收特性均一的介质,并且系统地对玉米、小麦、豌豆和苜蓿等作物在 X-band 和 Ka-band 的散射和吸收特性进行了辐射传输的理论和场地试验研究. Kirdiashev 等<sup>[11]</sup>和 Mo 等<sup>[14]</sup>的研究指出,在微波波段,植被冠层的光学厚度和植被含水量成正比,而单次散射反照率则和植被类型密切相关.诸多的研究为使用植被的微波辐射来标定其生长状况提供了理论基础. Choudhury 等<sup>[20]</sup>提出 37 GHz 亮温的极化差可以很好地表征干旱和半干旱区域稀疏植被的变化,并进一步提出 MPDT (microwave polarization difference temperatures) 的概念<sup>[21]</sup>,指出该指数可以表征草地和树木对干旱不同的响应特征. Palosia 等<sup>[22-23]</sup>在研究 10 和 37 GHz 微波信号对不同植被类型和土壤的响应差异时提出了 MPDI (microwave polarization

difference index), 该指数可以有效避免物理温度的影响. Shi 等<sup>[10]</sup>利用 AMSR-E 低频通道对于裸土和低矮植被的准线性响应特征发展出了 MVI (microwave vegetation index).

为了解决 NDVI 在浓密植被区域的易饱和问题, 一种新型的微波植被指数——比辐射率差分植被指数 (emissivity difference vegetation index, EDVI) 被提出<sup>[24-25]</sup>. 该指数利用 19 GHz 和 37 GHz 两个通道微波比辐射率的差值来指示浓密森林类型的植被含水量. 在北美中纬度林区和亚马逊雨林地区的一系列应用也揭示了 EDVI 在地表蒸散发、植被生长季的界定、植被含水量、地表微波比辐射率与降水、土壤湿度等的动态相互作用等相关研究中具有极大的应用价值<sup>[24-28]</sup>. 但是, 这些研究仅仅利用了 19 GHz 和 37 GHz 两个频率, 而对其他频率未做探讨.

随着 Aqua 卫星的 AMSR-E 微波辐射计的升空, 我们可以在 6.925、10.65、18.7 GHz 等更长的波段观测地表的微波辐射, 这也为 EDVI 提供了更多的通道选择. 微波辐射理论表明, 长波对植被和云的穿透能力更强, 这使得较低频的微波遥感可以探测到浓密植被的更深层. 本研究沿袭了 EDVI 的理论模型, 基于对 AMSR-E 卫星在 2003~2010 年东亚及东南亚地区地表微波比辐射率的观测反演结果, 得到不同通道组合 (如 6.925 和 37 GHz, 10.65 和 37 GHz, 18.7 和 37 GHz) 的 EDVI 指数, 并就多通道 EDVI 指数在浓密森林和稀疏植被区的特点以及其和植被垂直结构的潜在关系进行了探究.

## 1 数据和方法

### 1.1 地表微波比辐射率数据

为了构建研究所需的 EDVI 植被指数, 首先要获得地表微波比辐射率 MLSE (microwave land surface emissivity) 数据. 本研究综合利用 AMSR-E 亮温观测、MODIS 云参数观测数据, 欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF) 大气廓线和地表温度数据集作为输入, 利用微波辐射传输模式 MWRT<sup>[29]</sup> 计算大气和云对地表上行微波辐射的贡献, 由天顶微波亮温反推得到 MLSE, 该方法的细节参见文献<sup>[26, 28]</sup>. 此方法综合考虑了大气水汽吸收、云水吸收等效应, 可得到晴空和非降水云条件下 MLSE 数据集.

AMSR-E AE\_L2A 升轨轨道亮温数据产品<sup>[30]</sup>

具有五个不同的分辨率, 本研究采用的是包含 6.925、10.65、18.7、23.8、36.5 GHz 五个频率的观测结果, 其对应的卫星像斑直径约为地表 56 km, 地表采样距离约 10 km. 采用的 AE\_Rain 降水数据是利用 GPROF 算法产生的降水估计<sup>[31]</sup>. 由于 Aqua/MODIS 与 AMSR-E 安装在同一卫星上, MYD06\_L2 轨道云产品<sup>[32]</sup>数据和前两种数据具有高度的时间、空间同步性, 提供了 5 km 分辨率的云面积 (cloud fraction)、云相态 (cloud phase infrared)、云顶温度 (cloud top temperature) 和云水路径 (cloud water path) 等参数. 使用的来自 ECMWF 的高时空分辨率再分析数据 ERA-20C<sup>[33]</sup>, 提供了 12.5 km、3 h 分辨率的大气温度、压强、湿度廓线和地表温度数据.

数据反演的基本过程 (参见图 1) 是: ① 利用 AMSR-E AE\_Rain 降水数据对 AE\_L2A 亮温数据进行降水扣除, 陆地标记; ② 结合 MYD06\_L2 和 ERA-20C 进行云高定位, 云水含量计算; ③ 将大气廓线和云参数输入 MWRT 计算大气和云的辐射贡献, 并从天顶辐射中扣除, 得到地表的微波辐射估计 (地表亮温); ④ 结合地表温度计算 MLSE. 本研究除了所使用的微波辐射传输模式以及再分析资料不同之外, 所使用的方法与文献<sup>[26]</sup>完全相同, 故不再赘述.

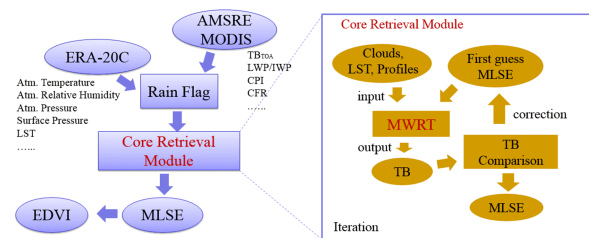


图 1 MLSE 和 EDVI 反演概念流程

Fig. 1 Conceptual flow chart of MLSE and EDVI retrieval

通过以上方法, 我们最终建立了东亚地区 (70~145 E°, 10~45 N°) 的 2003~2010 年 MLSE 日值轨道数据集, 由此推算的 EDVI 数据集具有相同的时间和空间属性.

### 1.2 微波植被指数 EDVI

微波植被指数 EDVI 相较于其他类型的植被指数, 实现了在有云条件下的数据覆盖, 具有在植被茂密地区不易饱和的特点<sup>[26]</sup>.

在微波波段, 辐射的光学厚度和植被的含水量 (vegetation water content, VWC) 以及微波波长之间存在一种半经验关系, 并且随着波长和植被垂直结构的不同而存在系统性的差异<sup>[34]</sup>. 对于具有丰富垂直结构的植被 (树), 其冠层的微波辐射是垂直方

向上不同高度植被层及地表产生微波辐射的总和. 不同的波长对于植被冠层的透射传输效果各有不同. 相较而言, 较长波长(较低频率)的微波辐射受到冠层的衰减作用较弱而很容易到达顶部, 能够较好地反映出底层结构的辐射特性. 相反, 低层的短波(高频)微波辐射较难穿过浓密的树木冠层到达顶部, 所以, 上行高频微波辐射一般反映的是冠层顶部的辐射特性. 相关研究也试图利用不同通道地表微波辐射亮温的差值来进行森林的辐射特征表征和植被类型分类<sup>[23]</sup>. 有鉴于此, Min 等<sup>[24-25]</sup>引入了基于地表微波比辐射率的 EDVI 植被指数(emissivity difference vegetation index)概念, 其定义如下:

$$EDVI_P(A, B) = \frac{MLSE_P^A - MLSE_P^B}{0.5(MLSE_P^A + MLSE_P^B)} \quad (1)$$

式中, 下标  $P$  表示微波极化通道, 一般使用垂直极化, 故在后面的表述中统一略去;  $A$ 、 $B$  表示不同的微波频率;  $MLSE$  为地表微波比辐射率(microwave land surface emissivity). 在 Min 等<sup>[24-28]</sup>的系列研究中, 始终只使用了 19GHz 和 37GHz (或接近频率) 这一对频率.

通过对 EDVI 植被指数的理解, 我们认为, 如果在式(1)中固定  $B$  频率为 37 GHz 不变, 而令  $A$  频率分别等于 6.9、10.6 和 19 GHz, 则得到的  $EDVI_P(A, B)$  应该响应于植被的不同层次, 其中  $A$  频率越低, 相应  $EDVI_P(A, B)$  对应更深的植被层、更多的植被含水量, 这种效应应该对高大的树木较为明显, 而对低矮的植被(草地、农作物等), 由于植被层本身很薄, 这种效应应该不明显. 为验证这一猜想, 本研究所采用的 EDVI 一共有三组, 分别为  $EDVI(6.925, 36.5)$ 、 $EDVI(10.65, 36.5)$  和  $EDVI(18.7, 36.5)$ , 为简便起见, 下文中分别表示为  $EDVI_6$ 、 $EDVI_{10}$  和  $EDVI_{18}$ . 我们将对这三个 EDVI 指数就植被生长状况的探测能力进行探究.

### 1.3 归一化植被指数 NDVI

NDVI 是一种被广泛接受的可见光和近红外植

被指数, 它可以反映出下垫面植被的叶绿素含量, 具有较高的空间分辨率(约 500 m), 但是, 因为红外和光学波段对云的存在比较敏感, 所以 NDVI 数据集一般采用较低时间分辨率(8 d 或更长)以弥补大量的空间缺测. 本研究中, 我们采用月平均 NDVI 产品 MYD13C2<sup>[35]</sup> 来提供地表植被绿度信息, 并对 NDVI 和 EDVI 的时空特征进行比较研究. MYD13C2 数据集的空间分辨率是 0.05°.

### 1.4 研究区域的植被类型

为了探究微波植被指数 EDVI 在不同类型植被区域植被含水量的表征效果以及不同微波通道之间的差异, 本研究选取了东亚和东南亚部分地区的五个区域作为研究对象. 图 2 展示了该区域植被类型的空间分布, 数据来源于 MODIS/MCD12C1 产品<sup>[36]</sup>. 该产品提供了 0.05°分辨率下的地表主导覆盖类型的年平均数据, 其植被分类遵循了国际地圈-生物圈计划(International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP)的地表覆盖类型分类方案. 本次选取的五个研究区域的相关地理信息见表 1. 从植被分类上来看, A、B、C、D 四个区域均为常绿阔叶林类型主导, 其中 D 区域植被单一性最好, A、B、C 都是由常绿阔叶林、混交林、热带草原和农田组成的混合类型. E 区为单一农田类型主导.

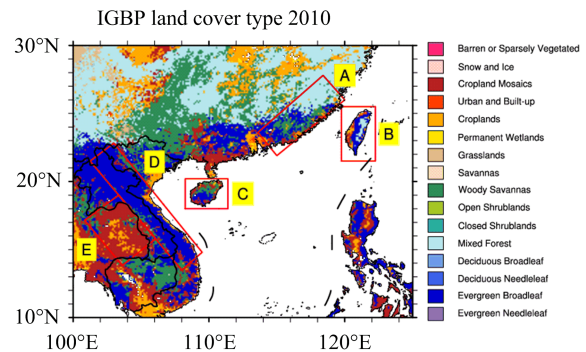


图 2 本研究选取的五个区域 IGBP 植被覆盖类型(2010)  
Fig. 2 IGBP vegetation types (2010) in five selected regions in the study

表 1 研究选取的五个研究区域的地理信息和植被覆盖情况

Tab. 1 Geographical information and vegetation types of the 5 selected research regions

区域	经度(E°)	纬度(N°)	位置	植被类型
A	113.6~120	21.9~27.8	闽东南地区	常绿阔叶林*
B	119.75~122.25	21.5~25.5	台湾岛	常绿阔叶林*
C	108.25~111.4	18~20.2	海南岛	常绿阔叶林*
D	101.25~108	13.5~22.82	越南, 老挝	常绿阔叶林
E	100.85~106.08	13.83~19	泰国	农田作物

[注] \* 表示由常绿阔叶林主导的混合植被类型.

## 2 结果分析

### 2.1 个例分析

图 3 展示的是 2008 年 7 月 20 日研究区域内三种 EDVI(EDVI6、EDVI10、EDVI18)的卫星单轨反演结果. 在老挝和越南边境地区大面积的常绿阔叶

林区见图 2 中 D 区域, 三个 EDVI 的值均表现为比较高的水平, 其中高值可以达到 0.03 以上, 并且存在明显的低频 EDVI(即 EDVI6 和 EDVI10)大于高频 EDVI(EDVI18)的特点. 相同的现象还可以在海南岛这类森林类型区域中找到.

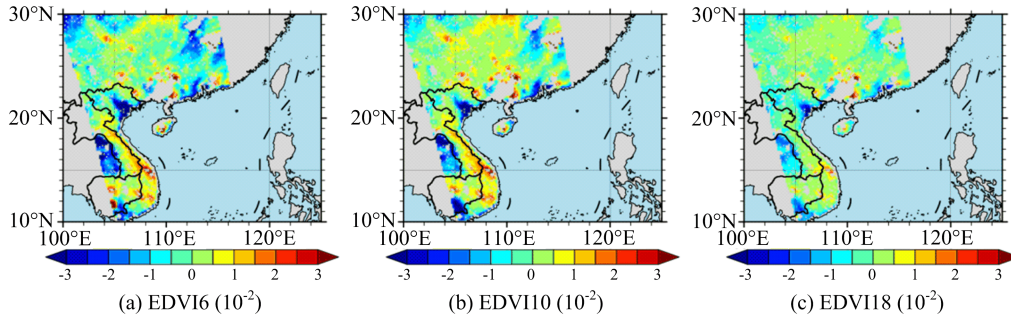


图 3 2008 年 7 月 20 日东亚、南亚地区个例, 三种 EDVI 指数的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of satellite retrieved EDVIs in eastern Asia and southern Asia on July 20<sup>th</sup>, 2008

而对于泰国东部和越南北部沿海的农田类型区域, EDVI 普遍则低于  $-0.01$ , 并且有低频 EDVI(即 EDVI6 和 EDVI10)小于高频 EDVI(EDVI18)的特点.

EDVI 在森林类型区域和农田类型区域的迥异表现必然和植被类型差异有着紧密的联系, 本研究就这一点进行进一步探究.

### 2.2 多年平均 EDVI 空间分布

植被状况的气候平均态对研究气候变化与生态圈的相互作用具有重要意义. 因此, 我们对 2003~2010 年的所有 EDVI 有效样本和月平均的 NDVI 数据分别进行了多年平均, 得到的 EDVI 和 NDVI 空间分布见图 4, 图像的分辨率统一到 10 km.

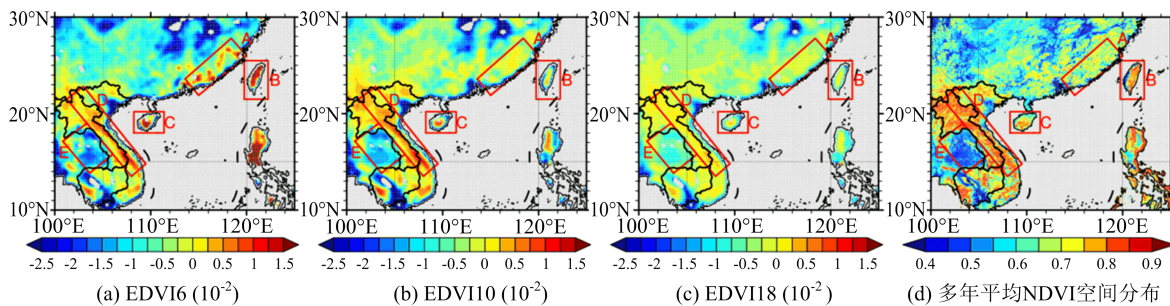


图 4 多通道 EDVI 和 NDVI 的多年(2003~2010)平均空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of multi-year (2003~2010) mean multiple channel EDVIs and NDVI

EDVI 的多年平均空间分布和 NDVI 基本吻合, 证明了 EDVI6、EDVI10 和 EDVI18 作为一种“含水量”植被指数, 可以有效反映植被的生理状况, 和“绿度”植被指数 NDVI 在气候平均尺度上有较好的一致性, 这是因为植被的光合作用和呼吸作用中, 碳和水的代谢过程是高度联系在一起的<sup>[37]</sup>.

EDVI 的空间分布显示出显著的地区差异. 对于植被类型较为单一且树木相对高大的常绿阔叶林区域 D, 低频微波信号对森林的穿透能力显著强于高频微波信号, 因此植被中的液态水的微波发射效应更强, 导致低频 EDVI 大于高频 EDVI, 即 EDVI6

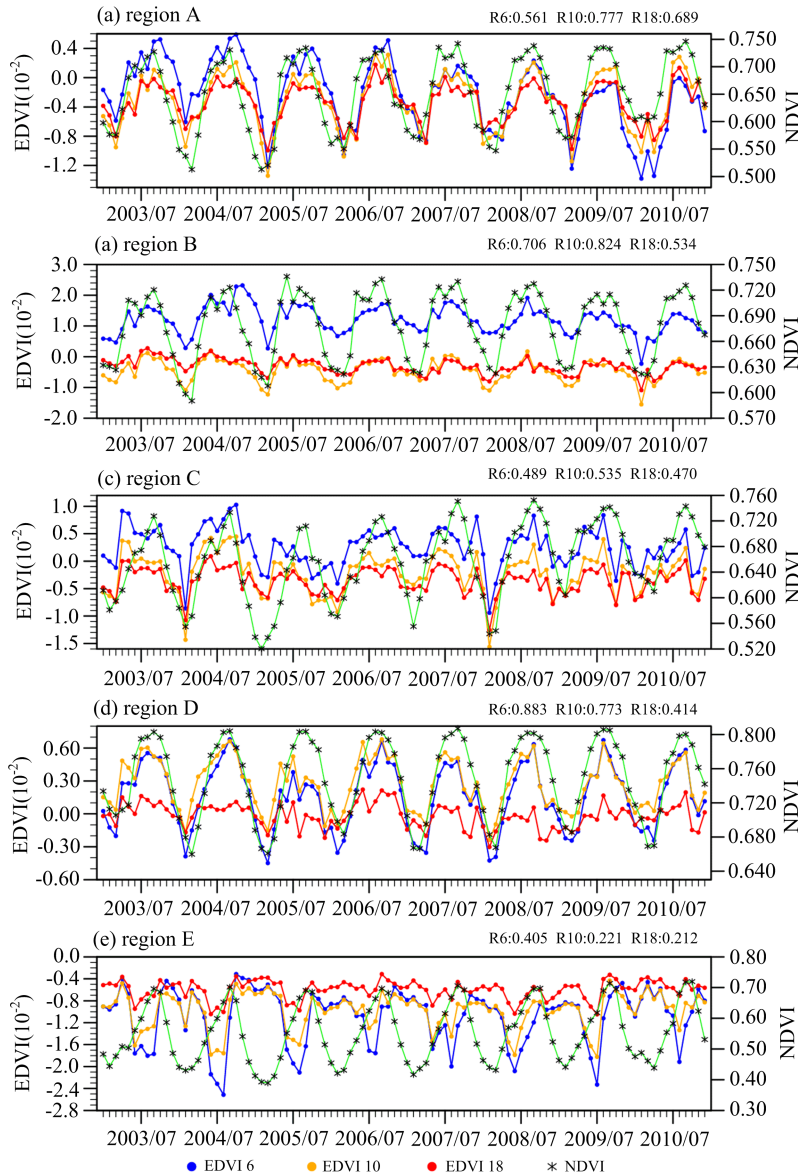
> EDVI10 > EDVI18. 同样的, 在 A、B、C 三个森林类型主导的混合植被区域, 也出现了较为明显的 EDVI6 > EDVI10 > EDVI18 的通道差异特征(其中, A 区域中零散分布的 EDVI 高值区上述特征较明显, 而 B、C 两个海岛这种特征则大面积存在).

相反, 对于 E 区域相对低矮的农作物来说, 植被本身就很浅薄, 不同通道的微波信号都能较好的穿透整个植被层, 导致 EDVI6、EDVI10 和 EDVI18 的差异不再显著. 再加上低频微波对土壤的穿透性更好, 在土壤内部温度较低、土壤湿度较大的情况

下,低频的微波比辐射率也随之降低.因此,在本区域内,低频 EDVI 反而小于高频 EDVI:  $EDVI_6 < EDVI_{10} < EDVI_{18}$ . 相对而言,影响 E 区域 EDVI 的主导因素不再是植被高度和植被含水量而是土壤状态,强烈的负值来源于较高的土壤湿度和低矮作物类型的综合作用.

### 2.3 季节变化特征分析

植被的含水量和绿度随着时间有显著的季节变化.为了探究多通道 EDVI 所反映的植被生长状况随时间演化的不同特点,我们选取了五个区域的多通道 EDVI 时间序列进行了研究,并和 NDVI 时间序列进行了比较,结果如图 5 所示.



EDVI<sub>6</sub>、EDVI<sub>10</sub>、EDVI<sub>18</sub> 和 NDVI 的相关系数分别为 R<sub>6</sub>、R<sub>10</sub>、R<sub>18</sub>.  
 图 5 A、B、C、D、E 五个区域 2003~2010 年的月平均 EDVI<sub>6</sub> (蓝实线), EDVI<sub>10</sub> (橙实线), EDVI<sub>18</sub> (红实线) 和 NDVI (绿实线) 的时间序列

Fig. 5 Time series (2003~2010) of monthly mean EDVI<sub>6</sub> (blue solid), EDVI<sub>10</sub> (orange solid), EDVI<sub>18</sub> (red solid) and NDVI (green solid) in five regions

A 区(图 5(a))的三个通道 EDVI 均显示出在每年的 3 月左右开始急剧增长,在 10 月附近达到最大值,在 7~12 月均维持在较高的水平,在落叶期显

著减小.这种季节演化特点基本与 NDVI 一致(相关系数均在 0.6 左右),但是 EDVI 的最小值、最大值的月份比 NDVI 分别提前或落后一个月.这提示

我们,植被内部水含量和叶绿素的季节变化很可能存在“相位差”,这在研究植被对气候系统“水循环”和“碳循环”的影响时很可能有重要意义.另外,图 5 (a)也明显显示出,在植被浓密的季节,存在  $EDVI6 > EDVI10 > EDVI18$  现象,而在植被枯叶期间(3月),三者之间的差异最小,甚至趋同.

B区(图 5(b))台湾岛大部分地区为常绿阔叶林所主导,可以看出该地区 NDVI 的大小、时间序列等都和 A 区很接近,B 区域的  $EDVI10$  和  $EDVI18$  也和 A 区接近.但是该地区的  $EDVI6$  (蓝色曲线)显著地大于 A 区,峰值约为 A 区的 3 倍,且在各个季节都显著大于同区域的  $EDVI10$  和  $EDVI18$ .这暗示着该区域的植被层很可能比较深厚,因此低频微波所响应的植被含水量远远大于高频信号,这一现象还需要结合新的数据进一步分析.

C 区(图 5(c))的情形比较接近 A 区域.

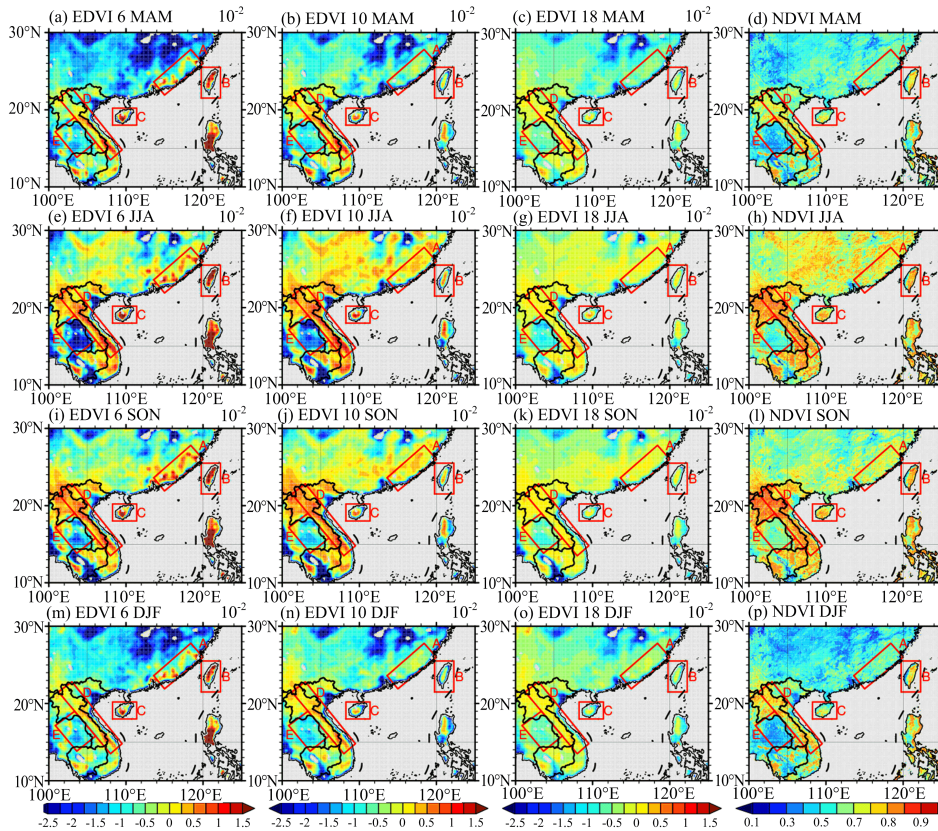
D 区域(图 5(d))是一个  $EDVI$  季节性变化很强的区域,并且  $EDVI6$  和  $EDVI10$  的时间序列和  $NDVI$  有更强的相关性( $R6 = 0.88, R10 = 0.77$ ),

相较而言, $EDVI18$  与  $NDVI$  相关性略差,也就是说在该区域,低频的  $EDVI$  可以更好地反映出该区域的植被生长状态.而以前的研究常用的  $EDVI18$  不是 D 区最理想的微波植被指数.

E 区(图 5(e))植被较为矮小和稀疏,微波受到地表土壤湿度的影响较为严重, $EDVI$  表现为较显著的负值.三个通道均可能掺杂了很多非植被因素引起的信号干扰,如每年夏季的雨季和一年三季的水稻收割导致的土壤水暴露,进而导致了土壤含水量和植被含水量的混淆.因此, $EDVI$  在这一区域的表现较不理想,其季节变化规律与  $NDVI$  差异很大.

综合来看, $EDVI$ ,尤其是  $EDVI6$  和  $EDVI10$ ,更加适合用来表征高大浓密植被区的植被生长和含水量状况.对于低矮的植被区,不同通道  $EDVI$  的差异不大,并且往往受地表特性的影响较为明显,使得对植被含水量的估计产生偏差.

为了方便读者详细观察各种植被指数在不同区域的季节变化,2003~2010 年间  $EDVI6$ 、 $EDVI10$ 、 $EDVI18$  和  $NDVI$  季节平均空间分布如图 6 所示.



自上而下:春(MAM),夏(JJA),秋(SON),冬(DJF).从左向右: $EDVI6 (10^{-2})$ , $EDVI10 (10^{-2})$ , $EDVI18 (10^{-2})$ , $NDVI$

图 6 三种  $EDVI$  指数和  $NDVI$  的多年(2003~2010)季节平均空间分布

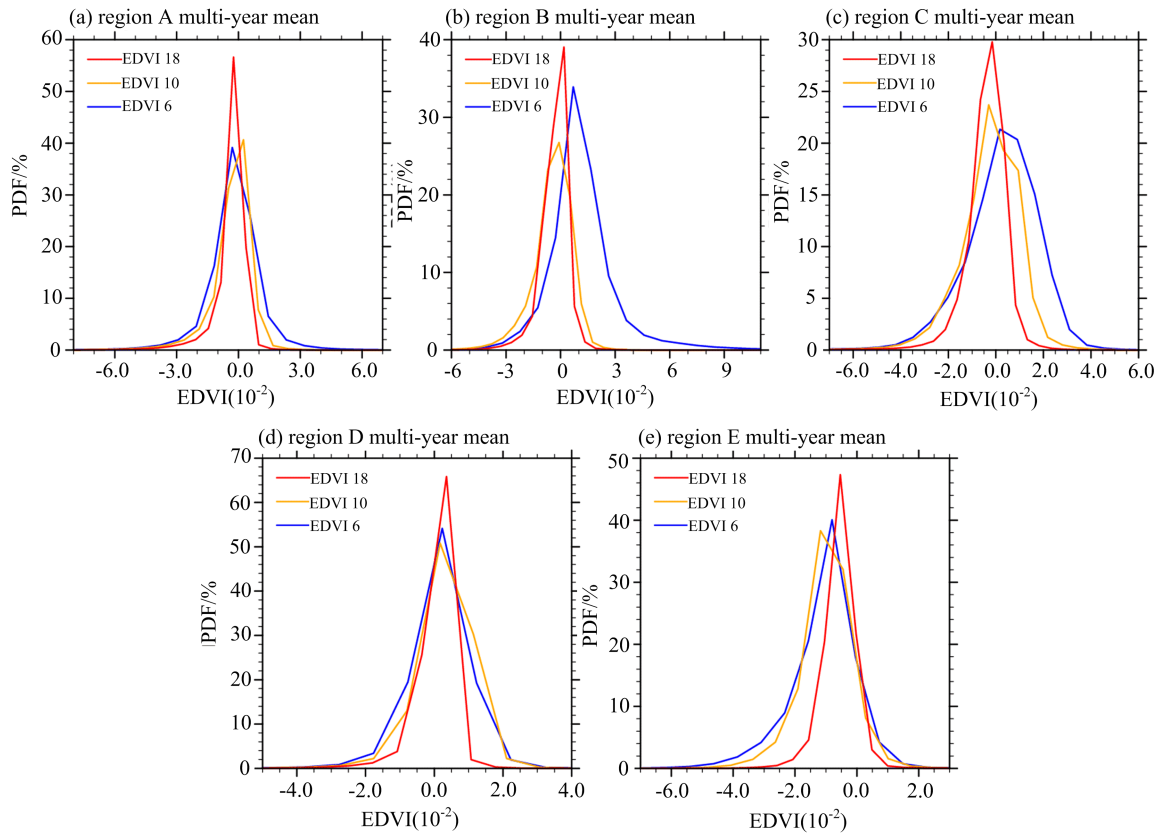
Fig. 6 Spatial distributions of seasonal mean(2003~2010)  $EDVIs$  and  $NDVI$

从季节平均而言,三种 EDVI 指数差异最明显的是夏、秋两季,尤其对于 D 区域这种高大的乔木类型.事实上,这是一个植被状态变化季节性很强的区域,这可以从 NDVI 的季节平均空间分布得到印证.这也是 D 区域虽然在年平均中 EDVI6、EDVI10、EDVI18 差异不大,但是在夏季和秋季 EDVI6、EDVI10 高于 EDVI18 尤为明显的原因.相反,对于 E 区域来说,四季都有 EDVI6 < EDVI10 < EDVI18 的特点,但是在夏季最明显,中部 EDVI6 和 EDVI10 最低可以达到  $-3 \times 10^{-2}$  以下,而 EDVI18 最低只有  $-2 \times 10^{-2}$ .这很可能与该地区夏季频繁的降水有关. A 区域,在夏季,零散的高值区

相较于其他季节开始更加明显并且面积更大.从空间分布上来看,这些点与 NDVI 高值较为吻合.这得益于夏季植被的生长使得高大植物在更大面积上占据了主导地位. B、C 情况与 D 类似,但是这两个海岛全年的 EDVI 通道差异都很显著,只是在夏季差异更大.

### 2.4 概率分布分析

随着大数据技术在地球科学的应用普及,某一地物参数的条件概率分布函数(probability distribution function, PDF)成为研究者感兴趣的特征.我们分析了前述五个区域八年间多年、分季节的 PDF,结果见图 7 和图 8.



蓝色线:EDVI6,橙色线:EDVI10,红色线:EDVI18

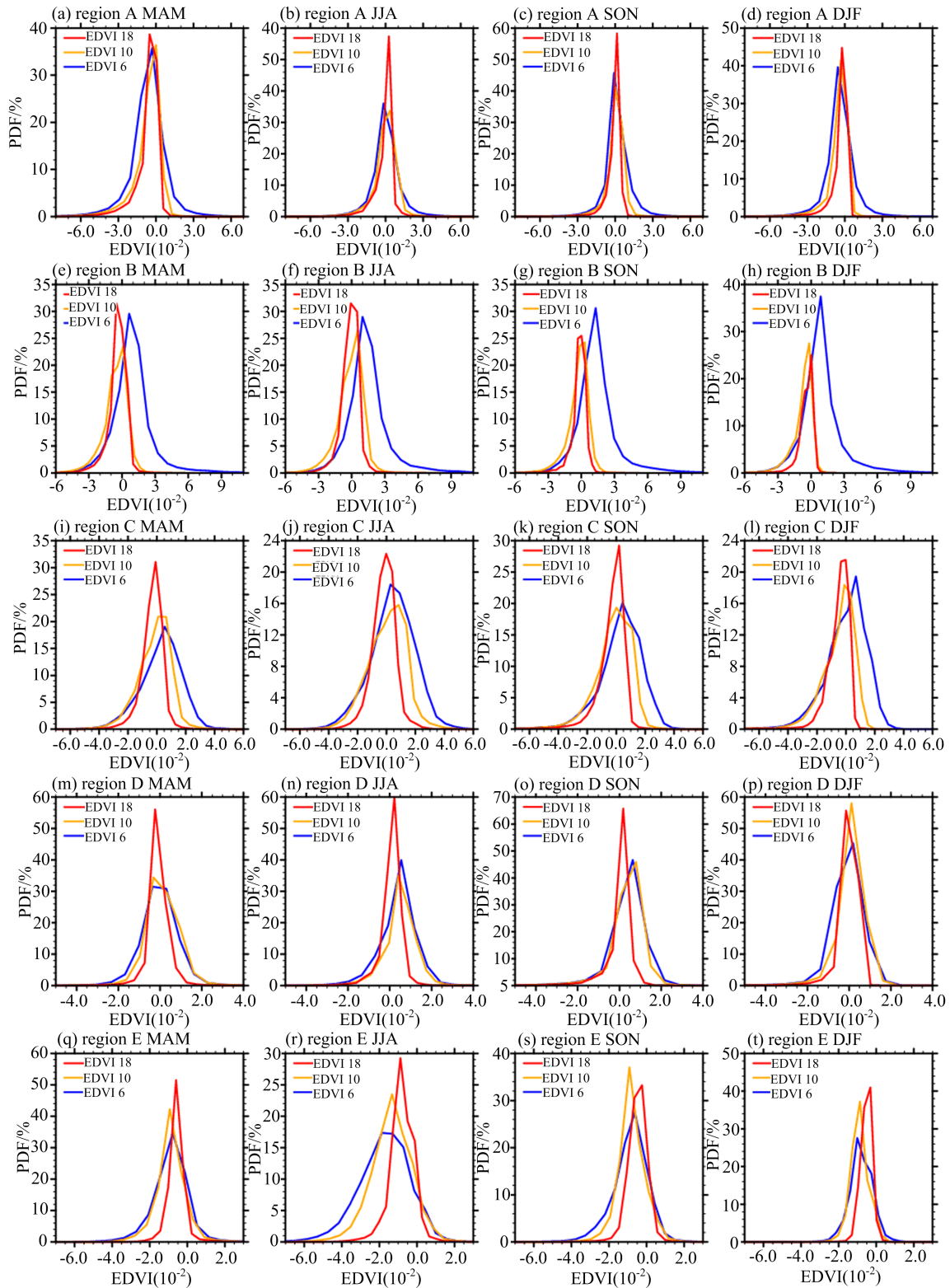
图 7 2003~2010 年五个选定区域的多通道 EDVI 概率分布函数(PDF)

Fig. 7 Multi-year (2003~2010) probability distribution functions (PDF) of multiple channel EDVIs over the selected five regions

A 区域由于地表类型较多,并且面积较大,无论从分季节还是全年分析,多通道 EDVI 的 PDF 差异较不明显,但是仍然能看出,处于 EDVI 高值区的样本量:EDVI6 多于 EDVI18. 相较而言,B、C 两个海岛和 D 区森林主导地区,无论是全年的样本还是分季节样本,多通道 EDVI 的 PDF 显著分离:EDVI6(蓝线)分布偏右. 对于 D 区域来说,由于强

烈的季节性,EDVI6 和 EDVI10 的 PDF 分布在夏秋两季会显著大于 EDVI18,但是冬春季这种特征较弱. B、C 岛屿区域多通道 EDVI 的 PDF 分布在一年四季中变化不大,并且 EDVI10 和 EDVI18 在分布上较为接近,而 D 区域 EDVI10 和 EDVI6 则更为接近. 这种区域间的差别很可能是由于 B、C、D 的地表植被平均垂直结构不同所致. 特别地,对于 E 区





从左向右: 春季(MAM), 夏季(JJA), 秋季(SON) 和冬季(DJF)。自上而下: A、B、C、D、E 和 F 区域。蓝色实线: EDVI6, 橙色实线: EDVI10, 红色实线: EDVI18

图 8 2003~2010 年间五个选定区域的各季节多通道 EDVI 概率分布函数 (PDF)

Fig. 8 Seasonal probability distribution functions (PDF) of multiple channel EDVIs in 2003~2010 over the selected five regions

域,由农作物主导的地区,三种 EDVI 在一年四季中均比较接近,而 EDVI6 和 EDVI10 由于对土壤湿度更加敏感,其在数值上稍低于 EDVI18. 这一点在夏季和秋季最为明显,5~10 月份的雨季使得土壤湿度异常地高.

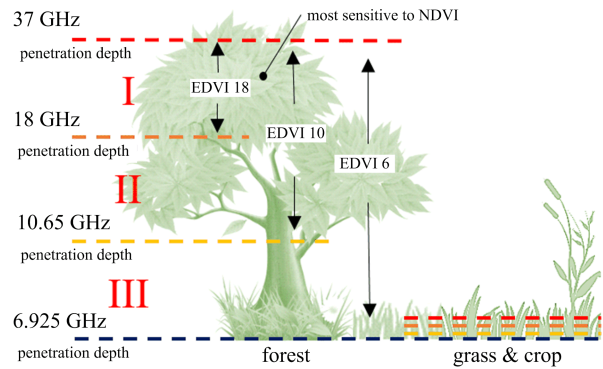
以上的分析表明,EDVI6、EDVI10 和 EDVI18 在森林主导的高大植被区以及农田类型的植被区表现出显著的差异. 主要表现在:①EDVI 在高大植被区通道差异明显,而在低矮植被区差别较小;②EDVI 随季节的变化决定于该区域的植被季节变化特征. 对于高大植被区,EDVI 主要取决于植被含水量的季节变化;③在低矮植被区,除了植被含水量,EDVI 很可能还取决于土壤是否裸露和土壤湿度的变化.

## 2.5 多通道 EDVI 彼此的差值与 NDVI 的相关性

植被作为一个不均一的介质层,其辐射的整体贡献取决于各个分层的辐射特性. Ulaby 等<sup>[38]</sup> 在开发密歇根植被冠层微波散射模型(MIMICS)时将植被自上而下分成了树冠层(crown layer),树干层(trunk layer)和地表层(underlying surface)三层,并分别对冠层的平均直径、形状、叶片和枝杈的介电常数分布,树干的几何参数、介电常数和地表粗糙度以及土壤介电常数进行参数化. Karam 等<sup>[39]</sup> 的研究同样使用了三层植被模型(实际上是两层植被层和地表层),并且考虑了新的参数:叶片、枝杈和树干的取向分布. 对于作物而言,其组分则应该分为谷物(grain)、茎秆(stalk)和叶片(leaf),采用非垂直分层模型<sup>[40]</sup>. 可见,森林植被具有明显的分层结构,其作为一个有层次的介质层,对辐射的作用也必须要分层来处理.

EDVI 指数正是建立在对植被垂直结构的理解之上的. 如图 9 所示,对于一个垂直结构发达的植被体系如森林型,虚线代表了能够到达冠层顶部的相应频率微波辐射的有效探测深度,而 EDVI 则表征了不同有效探测深度之间的植被含水量总和. 显然地,EDVI18 表现的是相对植被最上层的含水量,EDVI10 表现的是中层到冠层顶部的含水量,EDVI6 表现的是下层甚至土壤到冠层顶部的含水量. 进一步地,EDVI6-EDVI10、EDVI10-EDVI18、EDVI18 等多通道 EDVI 彼此的差异则对应了图 9 中 III、II、I 层的植被含水量. 但是,对于较为低矮的植被(如 crop)来说,讨论透射深度意义不大,上述分层模型将不再适用. 这种情况下 EDVI6、EDVI10

和 EDVI18 三者近似相等.



虚线为对应频率微波的透射深度. EDVI18 表现的是中上层的植被含水量, EDVI10 表现的是中层到冠层顶部的植被含水量, EDVI6 表现的是最下层甚至土壤层到冠层顶部的植被含水量.

图 9 植被垂直结构和 EDVI 概念模型示意图

Fig. 9 Conceptual model of the relation between canopy vertical extent and EDVIs

为了进一步探究三种 EDVI 指数在高大植被和低矮植被间的表现差别,我们分别选取了 A、D 和 E 三个面积较大且植被高度具有代表性的区域,制作了 2003~2010 年所有月平均样本的 EDVI 三组差值(EDVI6-EDVI10, EDVI10-EDVI18, EDVI18)和 NDVI 的散点图,如图 10 所示. 自上而下三组 EDVI 差值的物理含义分别对应于图 9 中植被上中下三层的植被含水量特征,我们借此来研究 A、D、E 三个区域植被垂直结构的异同点.

A 区和 D 区的结果较为类似,为高大的常绿阔叶林类型,NDVI 集中在 0.5 以上. 对这两个区域来说,EDVI18、EDVI10-EDVI18 和 NDVI 的相关性相当高,都在 0.5 以上. 而对于 EDVI6-EDVI10 来说,其与 NDVI 的相关性相对较差(均在 0.4 以下),究其原因树木底层生物量较少而且微波难以实际穿透.

从 EDVI 的变化对 NDVI 的敏感性来看, A、D 两个区域 EDVI18 和 EDVI10-EDVI18 随 NDVI 的变化斜率更大,尤其对于 A 区的上层( $Slope = 3.142 \times 10^{-2}$ )和 D 区的中层( $Slope = 2.444 \times 10^{-2}$ ). 相较而言, EDVI6-EDVI10 斜率则不是很高. 实际上, NDVI 作为可见光和近红外植被指数,其透射深度也主要局限于冠层顶层,对最上层的植被叶绿素含量最为敏感. 这也是为何 EDVI18 和 NDVI 的相关性更好,而且更敏感的原因.

E 区为低矮作物, NDVI 分布较为宽广. EDVI18、EDVI10-EDVI18、EDVI6-EDVI10 三者和

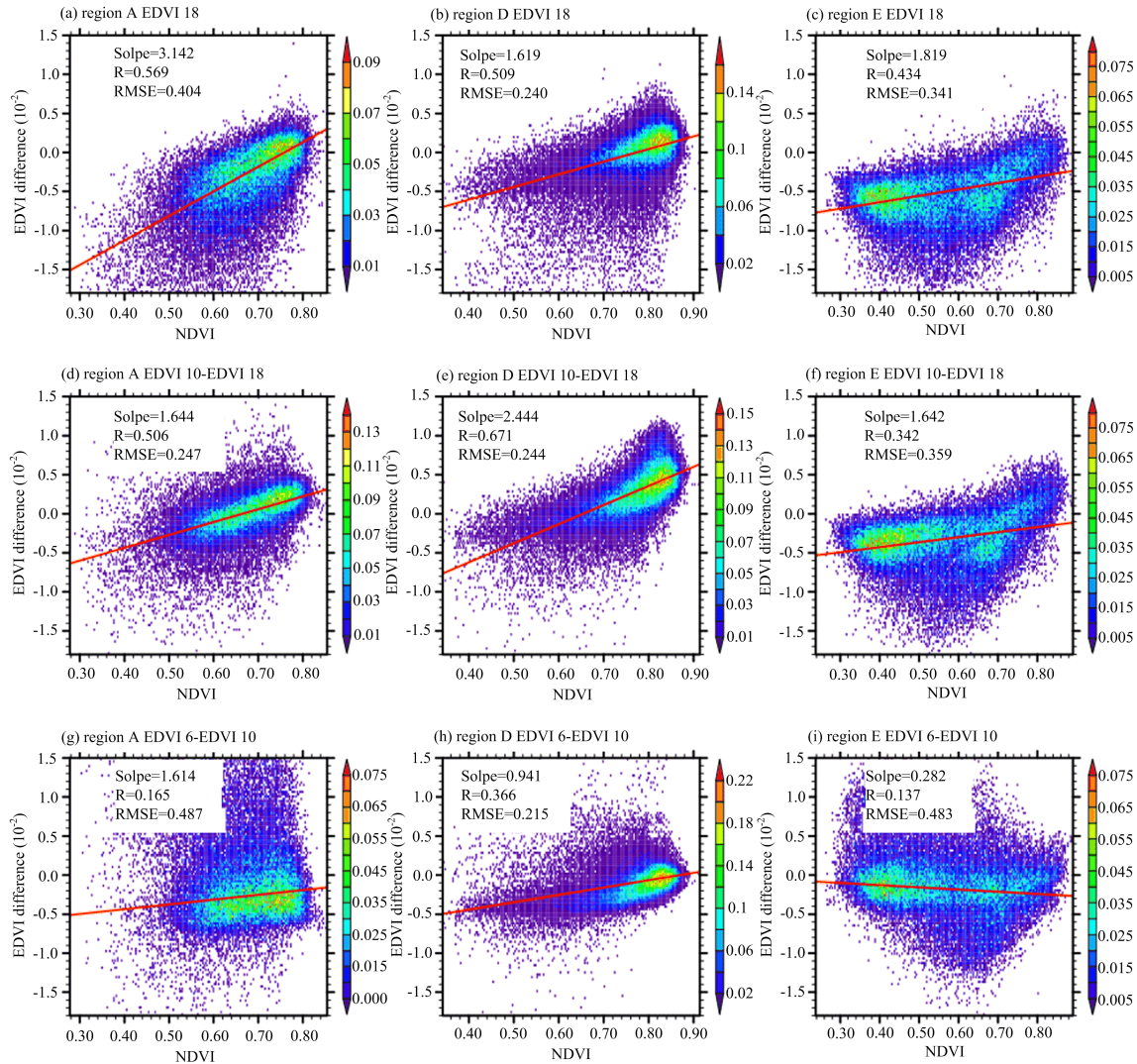


图 10 A、D、E 三个区域三组 EDVI 差值和 NDVI 的关系散点图

Fig. 10 Scatter plots between NDVI, EDVI and their differences in region A, D and E

NDVI 相关性差别不大,均在 0.44 以下,并且 EDVI 对 NDVI 的敏感性也最小(Slope 仅有  $0.2 \times 10^{-2} \sim 0.9 \times 10^{-2}$ ).这是因为对于低矮的植被来说,6.925、10.65 和 18.7 GHz 的透射深度相较于低矮的植被来说差异不大,导致 EDVI6、EDVI10 和 EDVI18 的表征效果极为近似.由于其有限的植被垂直结构,EDVI 各通道的差值也较小,和 NDVI 的相关性也较弱,所以,EDVI 植被分层模型对低矮植被来说并不适用.

### 3 结论

本文围绕着卫星遥感多通道 EDVI 植被指数的特点展开研究.结合多种卫星遥感产品(AE\_L2A,

AE\_Rain 和 MYD06\_L2)和再分析资料 ERA-20C 实现了在全天气况下对 AMSR-E 多个微波通道的地表微波比辐射率的轨道级反演,并建立了 2003~2010 年的逐轨的 EDVI6、EDVI10、EDVI18 数据库.

本研究针对东亚南部和东南亚地区的浓密森林和农田作物两种典型植被类型,探究了 EDVI6、EDVI10、EDVI18 在高大和稀疏植被区域对植被含水量和不同高度生物量的表征效果的异同点,结果显示:

(I) EDVI 的多年平均空间分布和 NDVI 基本吻合,证明了 EDVI6、EDVI10 和 EDVI18 作为一种“含水量”植被指数可以有效反映植被的生理状况,和“绿度”植被指数 NDVI 在气候平均尺度上有较

好的一致性。

(II)对于常绿阔叶林区域,低频微波信号对森林的穿透能力显著大于高频微波信号,因此植被中液态水的微波发射效应对低频信号的增强作用更强,导致低频 EDVI 大于高频 EDVI,即  $EDVI_6 > EDVI_{10} > EDVI_{18}$ 。而对于农田低矮植被区域,不同通道的微波信号都能较好地穿透整个植被层,且低频信号对土壤的温度和湿度表征性更强,导致多通道 EDVI 差异较小,甚至低频 EDVI 反而小于高频 EDVI。以上现象在多年平均、季节平均、月平均时间序列以及概率分布函数中具有一致的体现。

(III)不同通道 EDVI 之间的差异一定程度上指示了植被的垂直结构。对于高大的植被(如森林)来说,EDVI<sub>18</sub>、EDVI<sub>10</sub>-EDVI<sub>18</sub> 和 EDVI<sub>6</sub>-EDVI<sub>10</sub> 分别表征了顶层、中层和下层植被含水量。从和 NDVI 的相关性来看,EDVI<sub>18</sub> 对 NDVI 最为敏感,斜率可以达到  $3.142 \times 10^{-2}$  (每单位 NDVI)。这是因为在透射深度上 18 GHz 和 NDVI 所采用的光学和近红外波段更加接近。另外,利用 EDVI<sub>6</sub>、EDVI<sub>10</sub> 和 EDVI<sub>18</sub> 的差异可以相对地解析高大植被的含水量(生物量)大致的垂直结构。而对低矮农田植被而言,多通道 EDVI 不能解释其垂直结构。

AMSR-E 的多通道微波遥感为我们提供了利用透射深度差异来解析植被冠层含水量结构的方法,这对于森林这种高大、浓密的介质类型来说尤为重要。广义的 EDVI 植被指数可以有更多的通道选择,对于不同的植被类型,一定有一组 EDVI 最能代表其植被生长状况。未来将多通道的 EDVI 和站点植被垂直结构实测结合,构建植被模型数据库,可以利用被动微波遥感对植被结构、病害高度、干旱和霜降等变化做更加细致的解析。

多通道的 EDVI 指数提供的植被含水量垂直结构信息还具有一定潜在的应用价值。比如,在与植被含水量关系密切的植被蒸散发估算研究中,可用它来反映不同植被层的蒸腾阻抗,从而对森林不同高度处的蒸腾速率给出更详细的估算。另外,多通道 EDVI 还可以反映出森林不同高度层的植被含水量,可能在森林火灾的风险评估、林火传输模拟中发挥作用。

目前,多通道 EDVI 和植被含水量的关系还需要较为系统的定量研究。下一步,我们计划借助微波多层植被模型对多通道 EDVI 进行敏感性测试,进而建立起 EDVI 的和植被含水量的定量关系。这有

望从根本上赋予 EDVI 定量遥感植被含水量的能力。未来,多通道 EDVI 将被推广到更多的应用场景,包括用于表征地表蒸散发、植被总初级生产力、为林火火险和烈度模型提供植被生物量和湿度等信息。另外,针对 EDVI 的降分辨率研究也是一个重点研究方向。EDVI 作为一种微波植被指数,其较粗的分辨率是制约其应用的重要因素。除使用传统的降分辨率方法外,我们希望将机器学习方法和多偏振多角度的遥感手段相结合,在一定程度上缓解 EDVI 指数分辨率较低的问题。

#### 参考文献(References)

- [1] BANNARI A, MORIN D, BONN F, et al. A review of vegetation indices[J]. *Remote Sensing Reviews*, 1995, 13(1/2): 95-120.
- [2] JACKSON T J, CHEN D, COSH M, et al. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(4): 475-482.
- [3] TUCKER C J, SELLERS P J. Satellite remote sensing of primary production[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1395-1416.
- [4] STOW D A, HOPE A, MCGUIRE D, et al. Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(3): 281-308.
- [5] TUCKER C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8(2): 127-150.
- [6] TUCKER C J. Remote sensing of leaf water content in the near infrared[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1980, 10(1): 23-32.
- [7] CHEN J M, CIHLAR J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55(2): 153-162.
- [8] SIMS D A, GAMON J A. Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: A comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(4): 526-537.
- [9] LI R, MIN Q. Dynamic response of microwave land surface properties to precipitation in Amazon rainforest [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 133: 183-192.
- [10] SHI J, JACKSON T, TAO J, et al. Microwave

- vegetation indices for short vegetation covers from satellite passive microwave sensor AMSR-E [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112 (12): 4285-4300.
- [11] KIRDIASHEV K P, CHUKHLANTSEV A A, SHUTKO A M. Microwave radiation of the Earth's surface in the presence of vegetation cover [J]. *Radiotekhnika i Elektronika*, 1979, 24: 256-264.
- [12] JACKSON T J, SCHMUGGE T J, WANG J R. Passive microwave sensing of soil moisture under vegetation canopies [J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(4): 1137-1142.
- [13] WANG J R, MCMURTREY III J E, ENGMAN E T, et al. Radiometric measurements over bare and vegetated fields at 1.4-GHz and 5-GHz frequencies [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1982, 12 (4): 295-311.
- [14] MO T, CHOUDHURY B J, SCHMUGGE T J, et al. A model for microwave emission from vegetation-covered fields [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1982, 87(C13): 11229-11237.
- [15] ULABY F T, RAZANI M, DOBSON M C. Effects of vegetation cover on the microwave radiometric sensitivity to soil moisture [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1983 (1): 51-61.
- [16] BURKE H H K, SCHMUGGE T J. Effects of varying soil moisture contents and vegetation canopies on microwave emissions [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1982 (3): 268-274.
- [17] BRUNFELDT D R, ULABY F T. Measured microwave emission and scattering in vegetation canopies [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1984 (6): 520-524.
- [18] PAMPALONI P, PALOSCIA S. Experimental relationships between microwave emission and vegetation features [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1985, 6(2): 315-323.
- [19] 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(6): 900-905.
- [20] CHOUDHURY B J, TUCKER C J. Monitoring global vegetation using Nimbus-7 37GHz data; Some empirical relations [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1987, 8(7): 1085-1090.
- [21] CHOUDHURY B J, TUCKER C J, GOLUS R E, et al. Monitoring vegetation using Nimbus-7 scanning multichannel microwave radiometer's data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1987, 8(3): 533-538.
- [22] PALOSCIA S, PAMPALONI P. Microwave polarization index for monitoring vegetation growth [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, 26(5): 617-621.
- [23] PALOSCIA S, PAMPALONI P. Microwave vegetation indexes for detecting biomass and water conditions of agricultural crops [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 40(1): 15-26.
- [24] MIN Q, LIN B. Remote sensing of evapotranspiration and carbon uptake at Harvard Forest [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(3): 379-387.
- [25] MIN Q, LIN B. Determination of spring onset and growing season leaf development using satellite measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 104(1): 96-102.
- [26] MIN Q, LIN B, LI R. Remote sensing vegetation hydrological states using passive microwave measurements [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2010, 3(1): 124-131.
- [27] LI R, MIN Q, LIN B. Estimation of evapotranspiration in a mid-latitude forest using the Microwave Emissivity Difference Vegetation Index (EDVI) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(9): 2011-2018.
- [28] LI R, MIN Q. Dynamic response of microwave land surface properties to precipitation in amazon rainforest [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 133: 183-192.
- [29] LIU G. A fast and accurate model for microwave radiance calculations [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 1998, 76(2): 335-343.
- [30] ASHCROFT P, WENTZ F J. AMSR-E/Aqua L2A Global Swath Spatially-Resampled Brightness Temperatures, Version 3 [DB/OL]. Boulder, CO, USA; NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2013 [2019-01-10]. [http://dx.doi.org/10.5067/AMSR-E/AE\\_L2A.003](http://dx.doi.org/10.5067/AMSR-E/AE_L2A.003).
- [31] KUMMEROW C, FERRARO R, RANDEL D. AMSR-E/Aqua L2B Global Swath Surface Precipitation GSFC Profiling Algorithm, Version 3 [DB/OL]. Boulder, CO, USA; NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2015 [2019-01-10]. [https://doi.org/10.5067/AMSR-E/AE\\_RAIN.003](https://doi.org/10.5067/AMSR-E/AE_RAIN.003).
- [32] PLATNICK S, ACKERMAN S A, KING M D, et al. MODIS Atmosphere L2 Cloud Product (06\_L2) [DB/OL]. NASA MODIS Adaptive Processing System, Goddard Space Flight Center, USA, 2015 [2019-01-10]. [http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MYD06\\_](http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MYD06_)

- L2.006.
- [33] POLI P, HERSBACH H, DEE D P, et al. ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(11): 4083-4097.
- [34] JACKSON T J, SCHMUGGE T J. Vegetation effects on the microwave emission of soils [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 36(3): 203-212.
- [35] DIDAN K. MYD13C2 MODIS/Aqua Vegetation Indices Monthly L3 Global 0.05Deg CMG V006[DB/OL]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2015 [2019-01-10]. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MYD13C2.006>.
- [36] FRIEDL M A, SULLA-MENASHE D, TAN B, et al. MODIS collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(1): 168-182.
- [37] LAWLOR D W, CORNIC G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2002, 25(2): 275-294.
- [38] ULABY F T, MCDONALD K, SARABANDI K, et al. Michigan microwave canopy scattering models (MIMICS)[C]//International Geoscience and Remote Sensing Symposium, "Remote Sensing: Moving Toward the 21st Century". IEEE, 1988: 1009.
- [39] KARAM M A, FUNG A K, LANG R H, et al. A microwave scattering model for layered vegetation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(4): 767-784.
- [40] WANG F, SHI J, ZHANG L, et al. Discrete scatter model for microwave radiometer response to wheat field, comparison of theory and data[C]//2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2012: 638-641.