

引用格式: Liu Liyang, Yang Xueqin, Chen Xiuzhi, *et al.* The Application of Microwave Temperature-Vegetation Drought Index (MTVDI) based on the AMSR-E in Amazon Basin[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(4): 961-970. [刘礼杨, 杨雪琴, 陈修治, 等. 基于 AMSR-E 的微波温度植被干旱指数的应用[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(4): 961-970.]

DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.4.0961

基于 AMSR-E 的微波温度植被干旱指数的应用 ——以亚马逊热带雨林为例

刘礼杨^{1,2,3,4,5}, 杨雪琴^{1,2,3,4,5}, 陈修治³, 苏泳娴^{2,4}, 任加顺^{3,4}, 黄光庆^{1,4}

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458;

3. 中山大学大气科学学院, 广东 珠海 519082;

4. 广东省科学院广州地理研究所, 广东 广州 510070;

5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 以热带常绿阔叶林为主的亚马逊流域在全球气候变化的背景下频繁遭受干旱胁迫。但是对于该地区实施长时间序列的干旱监测一直是难点和热点。基于 Liu 等 2017 年提出的微波温度—植被干旱指数 (Microwave Temperature-Vegetation Drought Index, MTVDI), 对亚马逊流域进行了 2003—2008 年长时间序列的干旱监测, 并采用饱和水汽压差 (Vapor Pressure Deficit, VPD)、帕尔默干旱指数 (Palmer Drought Severity Index, PDSI)、陆地地下水储量 (Terrestrial Water Storage, TWS)、气象水分亏缺 (Climatological Water Deficit, CWD) 对 MTVDI 进行验证。结果表明: 对于整个研究区而言, MTVDI 与 VPD ($R=0.72$) 和 CWD ($R=-0.57$) 相关性较显著, 但与 TWS 和 PDSI 相关性较弱。总体上, MTVDI 能够较好地反映亚马逊地区干旱的季节动态。

关键词: 微波温度—植被干旱指数; 干旱监测; 亚马逊流域; 季节性干旱

中图分类号: P426.616; TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2022)04-0961-10

1 引言

亚马逊常绿森林的碳储量占全球陆地总碳储量的 34%^[1], 是陆地生态系统重要的碳汇。近年来, 由于全球气候变化加快, 极端天气事件增加导致亚马逊流域常绿森林干旱频发^[2-6]。干旱的发生严重影响到植物的正常生理活动, 持续的干旱甚至会造成树木的干旱枯萎^[7-8]。同时, 由于受到干旱的胁迫, 植物会为了避免水力栓塞而关闭气孔以减少蒸腾作用带来的水分流失, 但气孔的关闭会导致叶片

光合作用能力下降, 从而影响植被固碳能力^[9]。这将可能对全球气候变化产生负反馈, 往复循环, 加重干旱的危害。因此, 针对亚马逊地区的植被开展干旱监测, 评估亚马逊常绿森林冠层的季节性波动显得尤为重要。

利用遥感技术进行大尺度干旱监测方法较多, 主要可分为光学遥感和微波遥感两种。前者主要对植被的光谱特征曲线进行分析, 构建多种植被指数, 如归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)^[10]、植被状态指数 (Vegetation

收稿日期: 2021-08-11; 修订日期: 2022-07-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31971458, 41971275)。

作者简介: 刘礼杨 (1992—), 男, 四川泸州人, 博士研究生, 主要从事微波遥感应用与遥感干旱监测研究。E-mail: liuliyang18@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 杨雪琴 (1998—), 女, 四川绵阳人, 博士研究生, 主要从事遥感的生态学应用研究。E-mail: yangxueqin20@mails.ucas.ac.cn

Condition Index, VCI)^[11-12]、距平植被指数 (Anomaly Vegetation Index, AVI)^[13]等。此类方法从植被长势出发,刻画植被冠层受到干旱胁迫后的生长状态。而后者利用微波信号在一定程度上可穿过植被冠层直达土壤表层的特点,分析表层土壤含水量^[14],进而刻画研究区的干旱状况。由于光学遥感易受到气溶胶、云雾以及大气水汽等因素的影响^[15-16],从而导致基于光学遥感的植被指数在干旱监测方面具有一定的局限性。微波遥感通过对土壤水分的监测和分析,由土壤含水量反映植被根系的水分环境优劣。相比光学传感器,微波传感器以全天候全方位工作为优势,可以穿透植被冠层,具有探测林下地表目标的能力。但其同样也有不足,面对多年生热带常绿森林,微波并不能完全穿透茂密的冠层直达土壤表层,这同样增加了土壤水分含量获取的不确定性,导致微波遥感观测也不能准确分析亚马逊常绿森林的干旱状况,例如欧洲航天局发布的全球卫星观测土壤湿度产品 (ESA CCI Soil Moisture) 在热带常绿森林地区鲜有有效数据^[17]。光学遥感与微波遥感各自的不足是当前开展亚马逊地区较为准确的植被干旱监测的难点。

微波温度—植被干旱指数 (Microwave Temperature-Vegetation Drought Index, MTVDI) 由 Liu 等^[18]于 2017 年提出,该指数首次综合了被动微波遥感与光学遥感的优点,基于搭载在地球观测系统卫星上的先进微波扫描辐射仪 (Advanced Microwave

Scanning Radiometer for the Earth Observing System, AMSR-E), 将温度—植被干旱指数 (Temperature-Vegetation Drought Index, TVDI) 的理论方法与微波遥感数据相结合,构建了新型植被干旱监测指数。

为了克服光学遥感易受大气干扰以及微波遥感无法穿透过于稠密的冠层的难点,研究利用 MTVDI 对亚马逊热带常绿森林 2003 年至 2010 年的干旱状况进行监测,探究亚马逊常绿森林的干旱季节性变化特征。同时,采用 4 种干旱指标:饱和水汽压差 (Vapor Pressure Deficit, VPD)^[19]、帕尔默干旱指数 (Palmer Drought Severity Index, PDSI)^[20]、陆地地下水储量 (Terrestrial Water Storage, TWS)^[21]和气象水分亏缺 (Climatological Water Deficit, CWD)^[22]对 MTVDI 进行验证,探究 MTVDI 在亚马逊热带常绿森林进行干旱监测的可靠性。

2 研究区概况与数据

2.1 研究区概况

研究区包含亚马逊流域及其周边森林覆盖地区 (图 1), 横跨 8 个国家, 以巴西为中心主区域, 北部自东向西为法属圭亚那、苏里南、圭亚那、委内瑞拉、哥伦比亚, 西部为厄瓜多尔、秘鲁, 南部为玻利维亚。研究区内植被条件丰富, 主要为覆盖多年生常绿森林, 平均冠层高度为 25—30 m, 并形成大量连续稠密的冠层覆盖。在气候方面, 亚马逊热带常

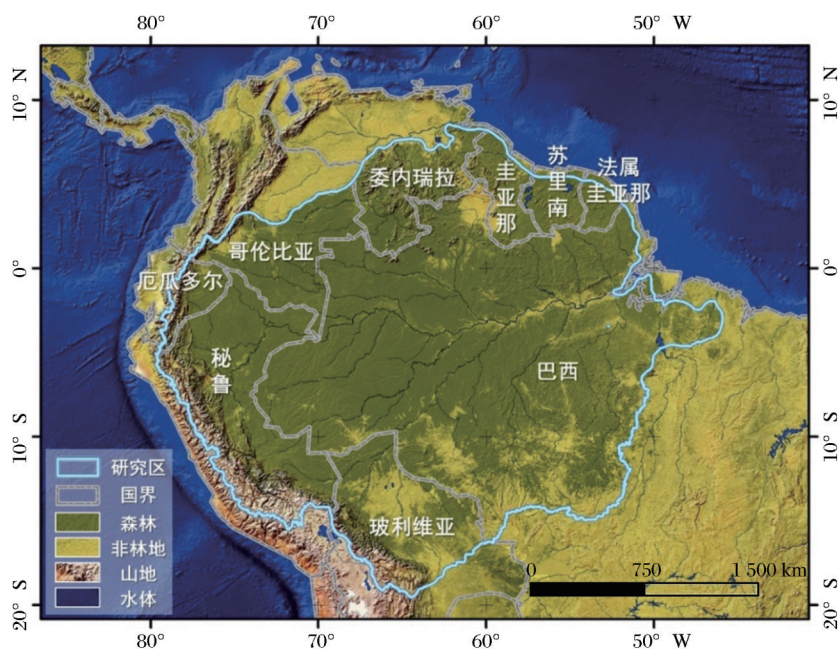


图1 研究区示意图

Fig.1 Study area

绿森林常年受赤道低气压带控制,盛行上升气流,年平均气温 27—28℃,年降水量约为 2 100 mm^[9]。

2.2 数据源与数据预处理

2.2.1 AMSR-E 数据与预处理

搭载在 NASA 对地观测卫星 Aqua 上的 AMSR-E 传感器采用极地太阳同步轨道,对于任意地区其过境时间分别为 1:30 和 13:30^[23],除了极地区外,在不到两天的时间内可以将全球覆盖一次,因此数据的时效性十分有利于水文方面的应用^[24]。AMSR-E 有 6.9 GHz、10.7 GHz、18.7 GHz、23.8 GHz、36.5 GHz 和 89.0 GHz 共 6 个频段,具有水平极化(H)和垂直极化(V)两种极化方式。根据 Liu 等的研究^[18],本文使用空间分辨率为 0.25°、时间分辨率为天的升轨亮度温度(Brightness Temperature, Tb)数据。我们使用地球植被大气模型(Earth Vegetation Atmosphere Model, EVA)对数据进行了简单大气校正^[25],然后参照 Njoku 等^[26]的方法去除受到射频干扰(Radio Frequency Influence, RFI)的像元。最后计算各频段亮温数据的月平均值用于 MTVDI 的计算。

2.2.2 其他数据

(1) Palmer 干旱指数(PDSI)。Palmer 干旱指数(Palmer Drought Severity Index)^[20]作为定量描述气候干旱状况的良好指标,已经被广泛用于气候干旱评价^[27-30]。PDSI 的正值和负值分别表征较湿润和较干旱的情况。本研究使用来自 Terraclimate 数据集的 0.5°空间分辨率的 PDSI 月数据^[31]。

(2) 饱和水汽压差(VPD)。VPD(Vapor Pressure Deficit)是指在特定温度下饱和水汽压与实际水汽压之间的差值,其表示大气的干燥程度,即空气的干燥程度,其数值越大表明空气越干燥,是反映植物干旱情况的重要指标^[32],本研究参照 Yuan 等^[19]的研究,采用 0.125°空间分辨率的 ERA-Interim 数据集^[33]计算 VPD。

(3) 气象水分亏缺(CWD)。CWD(Climatological Water Deficit)表征地表蒸散量(E)较降水量(P)的亏缺情况,已被广泛的应用于描述热带地区的干旱时空特征^[34-35,22]。本研究选用来自 CRUNCEP 数据集的降水数据(P)^[36]用于 CWD 的计算:

如果: $CWD_{n-1} - E_n + P_n < 0$

则: $CWD_n = CWD_{n-1} - E_n + P_n$ (1)

否则: $CWD_n = 0$

其中: CWD_n 为 n 月的水分亏缺,其为前一月

(CWD_{n-1})水分亏缺与当月降水量(P_n)与蒸散量(E_n)的差值的和。前人的研究指出,在亚马逊地区月蒸散量近似为 100 mm^[22,37-39],因此,为了使 CWD 的计算较为简便,本研究中月蒸散量(E_n)设为定值 100 mm^[22]。

(4) 陆地地下水储量(TWS)。TWS(Terrestrial Water Storage)代表了对地下储水量的垂直综合估计^[40],即 TWS 值越大表示地下水储备越多,其主要表征地下水含量的变化从而间接表征植被所受土壤水分的胁迫程度。本研究采用来自 GRACE_REC_v03 数据集的空间分辨率为 0.5°TWS 月数据(GSFC-MSWEP TWS)^[41]。

3 MTVDI 的构建

MTVDI 的计算流程如图 2 所示,首先,根据 Liu 等的研究^[18]分别进行了地表温度(Surface temperature, Ts)反演(公式(2))和微波归一化植被指数的反演(Microwave Normalized Difference Vegetation Index, MNDVI)(公式(3))。

$$Ts = 6.134 \times 10^{-3}(Tb_{18H} - 278.818)^2 + 9.934 \times 10^{-3}(Tb_{23V} - 216.029)^2 - 0.353 Tb_{89V} + 349.582 \quad (2)$$

其中: Tb_{18H} 、 Tb_{23V} 和 Tb_{89V} 分别是 18.7 GHz 水平极化亮温, 23.8 GHz 垂直极化亮温和 89.0 GHz 垂直极化亮温。

$$MNDVI = -0.231 \times \ln(MPDI_{23.8}) - 0.578 \quad (3)$$

其中: $MPDI_{23.8}$ 为 23.8 GHz 的微波极化差异指数(Microwave Polarization Difference Index, MPDI),其定义如下:

$$MPDI = \frac{Tb_v - Tb_h}{Tb_v + Tb_h} \quad (4)$$

其中: Tb_v 和 Tb_h 分别表示给定频率的垂直极化亮温和水平极化亮温。

而后,基于温度-植被指数的定义^[42],MTVDI 的定义如下^[18]:

$$MTVDI = \frac{Ts - Ts_{min}}{Ts_{max} - Ts_{min}} \quad (5)$$

$$Ts_{min} = a_1 \times MNDVI + b_1 \quad (6)$$

$$Ts_{max} = a_2 \times MNDVI + b_2 \quad (7)$$

其中: MTVDI 为微波温度-植被干旱指数, Ts 是观察到的地表温度, MNDVI 是微波归一化植被指数; a_1 和 b_1 是湿边的斜率和截距, a_2 和 b_2 是干边的斜率和截距, Ts_{max} 和 Ts_{min} 是给定 MNDVI 的最大和最小地表温度(Ts)观测值。

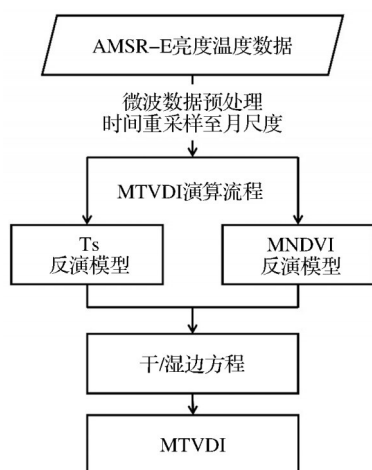


图2 MTVDI计算流程图

Fig. 2 Flowchart of MTVDI calculation

4 结果

4.1 温度-植被指数三角空间

Ts-NDVI三角空间是温度-植被干旱指数建模的关键所在,其原理如图3(a)所示。在这个三角空间(图3(a))中,AC边表示Ts-NDVI三角空间的热边界(干边),此时土壤水分含量低,表面蒸散量小。BC边被认为是Ts-NDVI三角空间的冷边界(湿边),此时土壤水分充足,植被生长不受水分胁迫,表面蒸散等于潜在蒸散。以2008年6月的Ts-MNDVI特征三角空间为例(图3(b)),MTVDI的干边(红色虚线)表示给定MNDVI对应的地表温度最大值($T_{s_{max}}$),湿边(蓝色虚线)表示指定MNDVI对应的地表温度最小值($T_{s_{min}}$)。此外,由于亚马逊

植被覆盖以多年生的常绿森林为主,这导致散点主要集中在MNDVI > 0.5的区间,在MNDVI > 0.9区间最密集(图3(b)),散点往MNDVI降低的方向发散呈现较好的三角特征。

4.2 亚马逊流域干旱的季节性时空分布

从2003年至2010年的多年月平均值结果可以看出MTVDI具有显著的时空变化(图4),这表明亚马逊地区不同区域干旱的季节性变化具有一定的差异^[43]。为了便于定量描述亚马逊地区干旱情况的季节性变化,将MTVDI进行分级量化:MTVDI ≤ 0.5为“湿润”,0.5 < MTVDI ≤ 0.6为“轻微干旱”,0.6 < MTVDI ≤ 0.75为“中度干旱”,MTVDI > 0.75为“重度干旱”。结果表明亚马逊流域干、湿季具有显著的季节性变化特征,且不同地区之间差异明显。位于研究区北部的圭亚那及法属圭亚那、苏里南、委内瑞拉等国家干旱持续时间较长,在1—6月伴随轻微干旱,7月开始干旱逐渐加剧,8、9月达到峰值,随后减轻。位于研究区西部的厄瓜多尔和秘鲁等国家西滨太平洋,降水丰富,全年均保持为湿润状态。厄瓜多尔—哥伦比亚—委内瑞拉地区,干、湿季分布状况属于北部地区和西部地区间的过渡类型,其5—11月为湿季,12月到次年4月是干季,但干旱峰值未超过北部地区,湿润程度也未超过西部地区。巴西作为亚马逊流域内面积最大的国家,有着典型的亚马逊气候特征,干湿季节性分明,5—9月为干季,8月达到干旱峰值,超过研究区内其他国家;10月至次年4月为湿季,此时MTVDI数值维持在较低的水平。

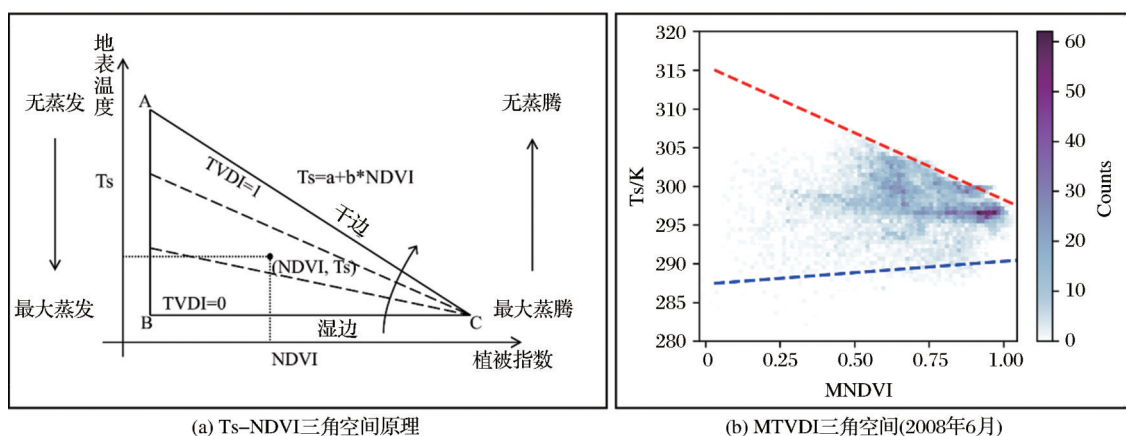


图3 温度-植被指数三角空间示意图

Fig. 3 The schematic diagram of temperature-vegetation index triangular space

不同干旱等级所占面积比例统计如图4所示。从统计结果可以看出,研究区的干旱情况具有显著

的季节性波动,即从5月起重度干旱所占比例逐渐增高,干旱程度愈发加深,直到9月才开始有所缓

解,这种变化状况主要是受占研究区面积比例最大的巴西干旱的季节波动主导(图5)。但湿润区域的比例相对稳定,其主要分布在秘鲁与厄瓜多尔地区(图5)。同时,根据同一等级的季节性变化可以看出,轻微干旱、中度干旱、重度干旱的季节性变化十分显著,尤以中度干旱和重度干旱之间比例的转换为主要变化特征。

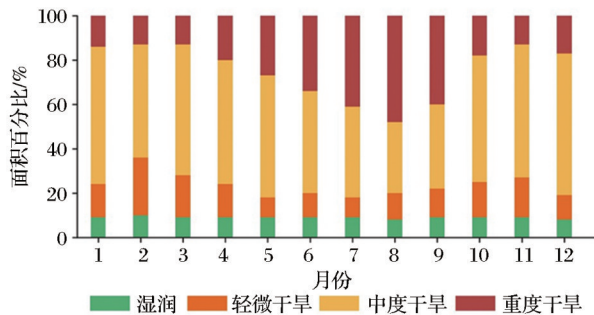


图4 亚马逊流域各月干旱程度百分比统计

Fig.4 Statistics of drought severity of Amazon basin of each month

4.3 MTVDI与干旱指标的对比

在研究区尺度上将 MTVDI 的季节变化与 VPD、CWD、TWS、PDSI 的季节变化进行对比(图6), MTVDI 与 VPD 呈现一致的季节波动, 而与 CWD、TWS 和 PDSI 呈现相反的季节波动。总体上, MTVDI 与表征大气干旱的 VPD ($R=0.72$) 以及表征气象水分亏缺的 CWD ($R=-0.57$) 具有明显的相关性, 然而 MTVDI 与表征气候综合干旱的 PDSI ($R=0.05$) 以及表征地下水储量的 TWS ($R<0.01$) 的相关性不显著。由于地表的干旱 (VPD、CWD) 对地下水储量的波动 (TWS) 产生影响需要一定的过程, PDSI 作为综合气候干旱指数在给定时间之后的降水对其衡量当时旱情影响较大^[44], 因此, 相比于其他干旱指标, PDSI 和 TWS 具有一定的滞后性(图6)。这表明, 相比于地下水储量变化和综合气候干旱, MTVDI 更能及时地反映地表的实际水分亏缺情况。

而后, 本研究将 MTVDI 与 VPD、CWD、TWS、

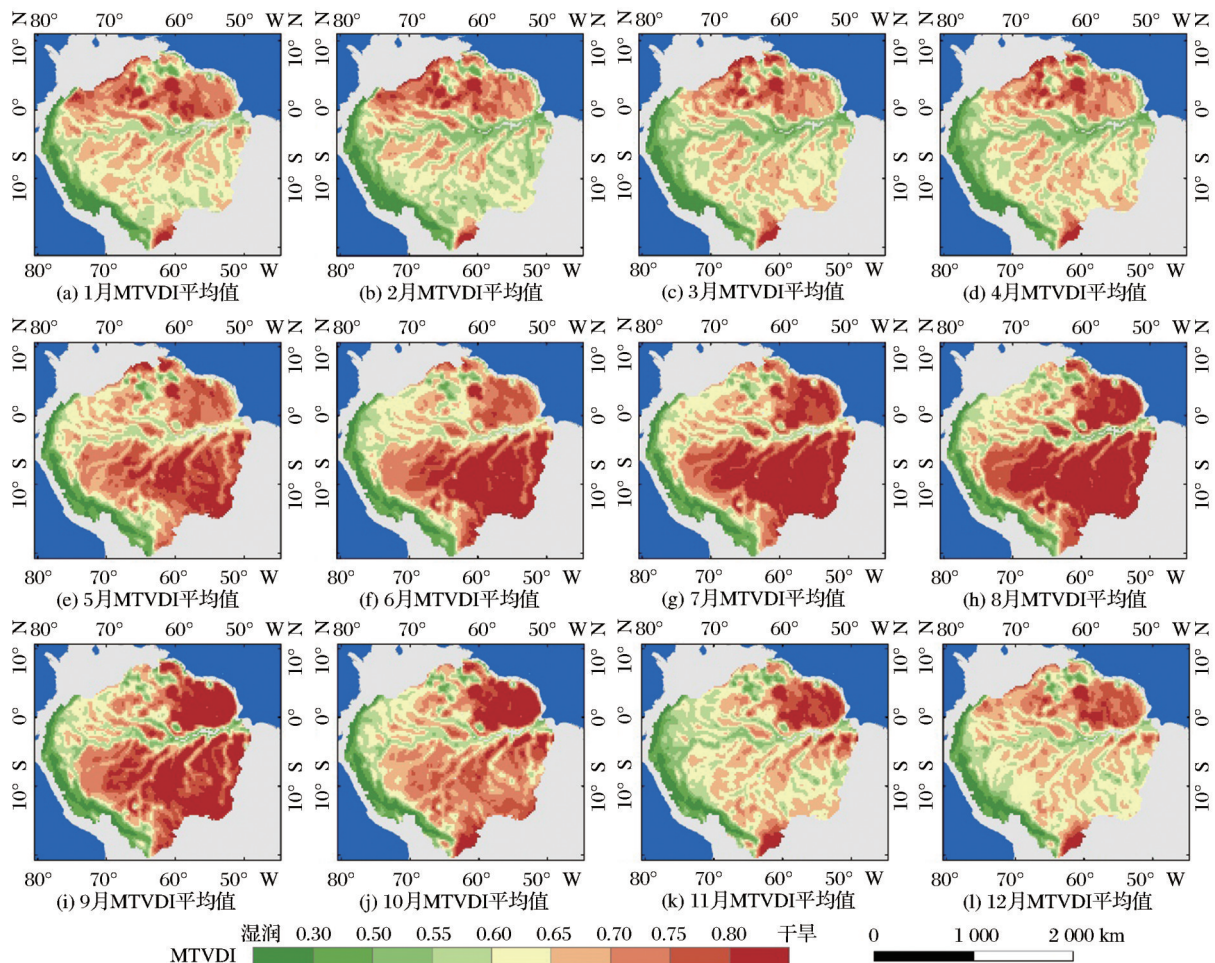


图5 亚马逊流域 MTVDI 季节性时空分布

Fig.5 Spatial pattern of MTVDI seasonality over Amazon basin

PDSI 进行像元尺度的季节性变化的相关性分析(图 7),总体上,MTVDI 能够较好地捕获亚马逊地区的干旱情况。其中,MTVDI 与 VPD 为正相关的区域占比高达 95%,与 CWD、TWS、PDSI 为负相关的区域各自占比 93%、83%、66%。

已有的研究表明,VPD 在表征亚马逊热带常绿森林物候方面具有巨大潜力^[1],而 MTVDI 与 VPD

的良好相关性表明 MTVDI 也存在表征亚马逊物候的潜力。但是沿着亚马逊河干流及周边区域内 MTVDI 与 VPD 的相关性较差($R < 0$),这可能是由于 AMSR-E 属于被动微波遥感,接收的是被探测物的后向反射信号,其易受水体的干扰^[45]。因此在亚马逊河干流附近区域的 MTVDI 具有一定的不确定性。

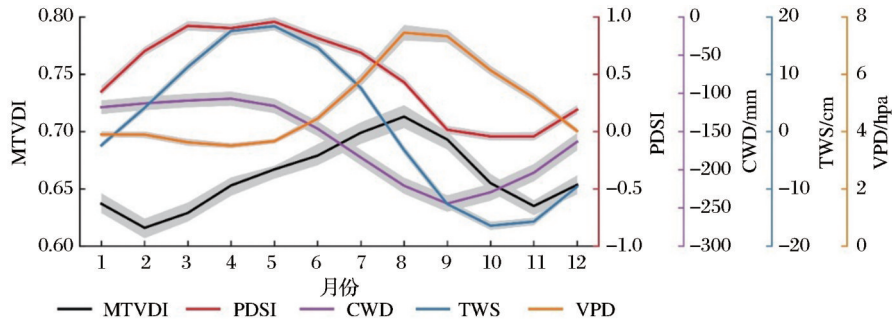


图 6 研究区内 MTVDI 与 4 种干旱指标的季节性变化

Fig. 6 Seasonality of MTVDI, PDSI, CWD, TWS, and VPD in Amazon basin

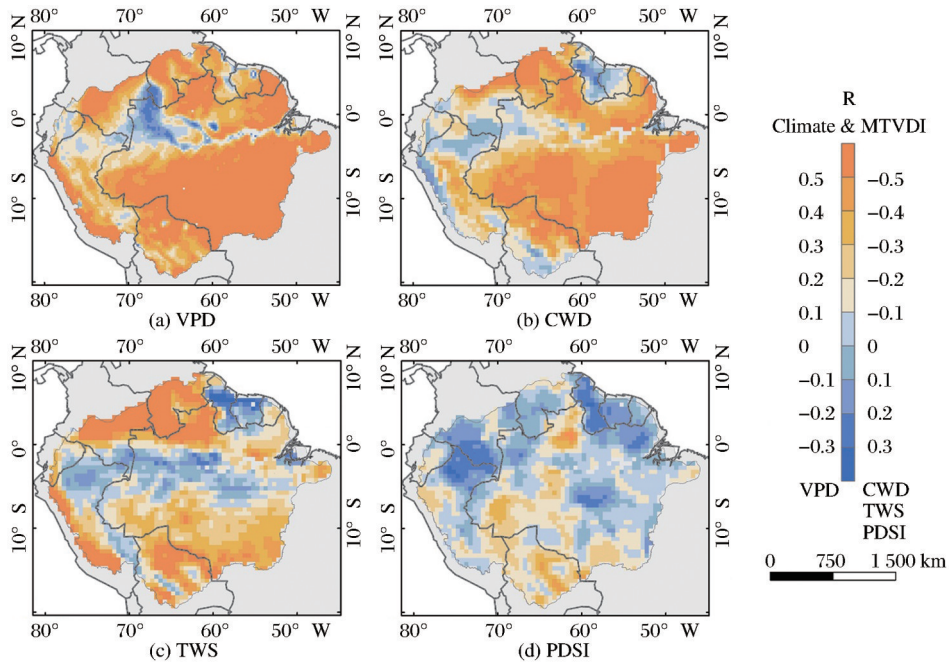


图 7 MTVDI 与干旱指标的相关性的空间分布

Fig.7 The spatial pattern of correlation between seasonality of MTVDI and seasonality of drought index

5 讨 论

虽然 TVDI 是一个较为成熟的植被干旱监测指标^[46],但是受限于不同地表覆盖^[47]、不同研究尺度^[48]或光学遥感易受大气条件影响的特性^[49-50],导致其监测精度好坏不一。发挥 TVDI 理论兼顾温度和植被长势的优势,结合微波遥感数据不易受大气条件影响特性,可以克服光学遥感的不足,本文利

用 MTVDI 对亚马逊地区植被干旱的季节性时空变化特征进行探索,并结合 4 种干旱指标对 MTVDI 的干旱监测精度进行评估。MTVDI 作为一个综合性干旱指数,结果表明其能够较好地捕获亚马逊流域的季节性时空特征。利用其与分别表征大气干旱的 VPD 因子、表层土壤干旱的 CWD 因子、深层土壤干旱的 TWS 因子进行季节性变化统计分析,结果显示都有较好的相关性,这表明 MTVDI 作为

一个新的指标在亚马逊地区干旱监测方面具有较好的潜力。

严重的干旱威胁着植物的生长和生存,干旱引发的过度蒸腾会导致植物自身木质部空穴化或栓塞致死^[51]。本研究进一步将MTVDI与代表植被长势的增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)和日光诱导叶绿素荧光(Solar-Induced chlorophyll Fluorescence, SIF)进行季节性变化的相关性分析(图8)。结果显示沿赤道附近呈现明显的南北差异,即赤道以北地区主要呈现正相关(红色),赤道以南地区主要呈现负相关(绿色)。在赤道以南的区域由于受到干旱胁迫会导致森林生长受到抑

制(EVI),光合能力(SIF)下降,从而导致MTVDI与植被长势呈现负相关。而在赤道以北地区,已有研究表明该地区存在显著的旱季反绿现象,即在旱季冠层呈现出更好的长势和更强的光合作用(图9)^[52],MTVDI与SIF和EVI的正相关表明,MTVDI不仅可以监测该地区的干旱特征(图4),还捕捉到该地区旱季植被反绿(图9)特性。亚马逊地区常绿森林的物候存在显著的南北差异即北部地区主要受到辐射控制,而南部地区主要受到水分胁迫的限制^[53],MTVDI与EVI和SIF的相关性的南北差异表现出MTVDI对于区分亚马逊流域不同地区物候差异具有一定潜力。

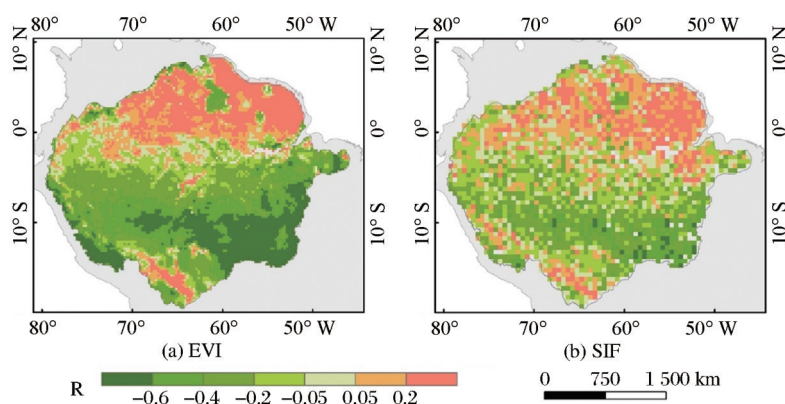


图8 MTVDI与植被长势的相关性空间分布

Fig. 8 The spatial pattern of the correlation between seasonality of MTVDI and seasonality of vegetation growth

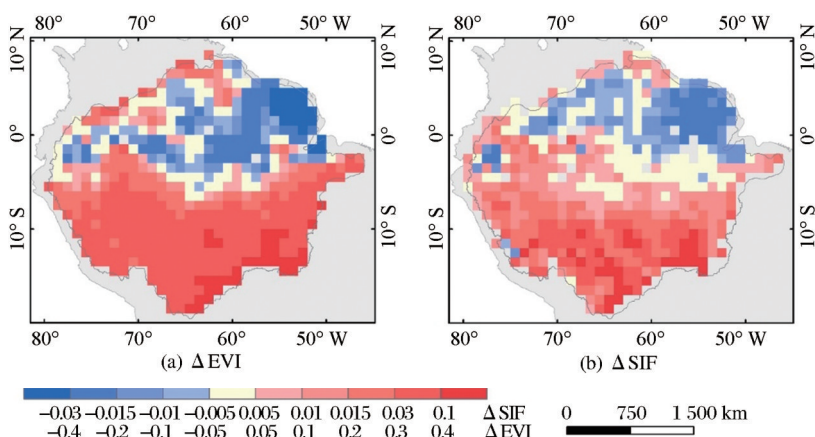


图9 湿季与干季植被长势差异的空间格局

Fig. 9 The spatial pattern of multi-year average of wet minus dry season differences of vegetation growth

此外,在降水充足的热带雨林地区,MTVDI可以不依赖水分相关指标开展干旱监测,更注重植物本身的干旱胁迫程度和长势,可以有效避免以往的干旱指标只注重环境特征而可能忽略植物本身的情况。同时MTVDI作为一个相对指标,可以更为精细地区分同一气候类型下的干旱的季节变化特征。

6 结论

本研究将温度—植被干旱指数(TVDI)理论兼顾温度和植被生长动态的优点和被动微波遥感数据不易受大气条件影响的优点相结合,构建了微波温度—植被干旱指数(MTVDI),并利用MTVDI开展了亚马逊流域地区的干旱季节性变化监测。研

究结果显示,MTVDI与CWD,VPD两种干旱指标呈现较好的相关性,这表明MTVDI具有较好的在森林覆盖密集地区进行干旱监测的能力。此外,MTVDI还能清晰呈现亚马逊地区不同区域的冠层生长动态,这表明MTVDI不仅可以用于干旱监测,还可以作为新的指标来探究森林覆盖密集地区冠层物候变化动态。未来,将尝试围绕MTVDI与冠层物候、不同下垫面的植被干旱差异开展进一步的研究。

参考文献(References):

- [1] Chen X, Maignan F, Viovy N, *et al.* Novel representation of leaf phenology improves simulation of Amazonian evergreen forest photosynthesis in a land surface model[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2020, 12(1): e2018MS001565. DOI: 10.1029/2018MS001565.
- [2] Espinoza J C, Ronchail J, Guyot J L, *et al.* Climate variability and extreme drought in the upper Solimões River (western Amazon Basin): Understanding the exceptional 2010 drought[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(13). DOI: 10.1029/2011GL047862.
- [3] Nepstad D, Lefebvre P, Lopes da Silva U, *et al.* Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: A basin-wide analysis[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(5): 704-717. DOI: 10.1111/j.1529-8817.2003.00772.x.
- [4] Lewis S L, Brando P M, Phillips O L, *et al.* The 2010 amazon drought[J]. *Science*, 2011, 331(6017): 554-554. DOI: 10.1126/science.1200807.
- [5] Doughty C E, Metcalfe D B, Girardin C A J, *et al.* Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in Amazonia[J]. *Nature*, 2015, 519(7541): 78-82. DOI: 10.1038/nature14213.
- [6] Fan L, Wigneron J P, Ciais P, *et al.* Satellite-observed pan-tropical carbon dynamics[J]. *Nature plants*, 2019, 5(9): 944-951. DOI: 10.1038/s41477-019-0478-9.
- [7] da Costa A C L, Galbraith D, Almeida S, *et al.* Effect of 7 yr of experimental drought on vegetation dynamics and biomass storage of an eastern Amazonian rainforest[J]. *New Phytologist*, 2010, 187(3): 579-591. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2010.03309.x.
- [8] Phillips O L, Aragão L E O C, Lewis S L, *et al.* Drought sensitivity of the Amazon rainforest[J]. *Science*, 2009, 323(5919): 1344-1347. DOI: 10.1126/science.1164033.
- [9] Marengo J A. Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon River Basin water budget[J]. *Climate Dynamics*, 2005, 24(1): 11-22. DOI: 10.1007/s00382-004-0461-6.
- [10] Bannari A, Morin D, Bonn F, *et al.* A review of vegetation indices[J]. *Remote Sensing Reviews*, 1995, 13(1-2): 95-120. DOI: 10.1080/02757259509532298.
- [11] Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection[J]. *Advances in space research*, 1995, 15(11): 91-100. DOI: 10.1016/0273-1177(95)00079-T.
- [12] Kogan F N. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1995, 76(5): 655-668. DOI: 10.1175/1520-0477(1995)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2.
- [13] Chen Weiyang, Xiao Qiangang, Sheng Yongwei. Application of the anomaly vegetation index to monitoring heavy drought in 1992[J]. *Remote Sensing of Environment China*, 1994, 9(2): 106-112.[陈维英,肖乾广,盛永伟.距平植被指数在1992年特大干旱监测中的应用[J].*环境遥感*, 1994, 9(2): 106-112.]
- [14] Chen X, Su Y, Yong L, *et al.* Retrieving China's surface soil moisture and land surface temperature using AMSR-E brightness temperatures[J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, 5(7-9): 662-671. DOI: 10.1080/2150704X.2014.960610.
- [15] Samanta A, Ganguly S, Hashimoto H, *et al.* Amazon forests did not green-up during the 2005 drought[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(5). DOI: 10.1029/2009GL042154.
- [16] Samanta A, Ganguly S, Myneni R B. MODIS enhanced vegetation index data do not show greening of Amazon forests during the 2005 drought[J]. *The New Phytologist*, 2011, 189(1): 11-15. <https://www.jstor.org/stable/40960872>.
- [17] Dorigo W, Wagner W, Albergel C, *et al.* ESA CCI soil moisture for improved earth system understanding: State of the art and future directions[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 203: 185-215. DOI: 10.1016/j.rse.2017.07.001.
- [18] Liu L, Liao J, Chen X, *et al.* The Microwave Temperature Vegetation Drought Index (MTVDI) based on AMSR-E brightness temperatures for long-term drought assessment across China (2003-2010)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 199: 302-320. DOI: 10.1016/j.rse.2017.07.012.
- [19] Yuan W, Zheng Y, Piao S, *et al.* Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth[J]. *Science Advances*, 2019, 5(8): eaax1396. DOI: 10.1126/sciadv.aax1396.
- [20] Palmer W C. Meteorological drought[M]. US Department of Commerce, Weather Bureau, 1965.
- [21] Crowley J W, Mitrovica J X, Bailey R C, *et al.* Land water storage within the Congo Basin inferred from GRACE satellite gravity data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(19). DOI: 10.1029/2006GL027070.
- [22] Aragão L E O C, Malhi Y, Roman-Cuesta R M, *et al.* Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(7). DOI: 10.1029/2006GL028946.
- [23] Rüdiger C, Calvet J C, Gruhier C, *et al.* An intercomparison of ERS-Scat and AMSR-E soil moisture observations with model simulations over France[J]. *Journal of Hydrometeorology*

- gy, 2009, 10(2): 431-447. DOI: 10.1175/2008JHM997.1.
- [24] Meng Linda. Land surface temperature retrieval from AMSR-E data [D]. Changchun: Jilin University, 2007. [孟霖达. 利用 AMSR-E 数据反演地表温度[D]. 长春: 吉林大学, 2007.]
- [25] Kerr Y H, Njoku E G. A semiempirical model for interpreting microwave emission from semiarid land surfaces as seen from space [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(3): 384-393. DOI: 10.1109/36.54364.
- [26] Njoku E G, Ashcroft P, Chan T K, *et al.* Global survey and statistics of radio-frequency interference in AMSR-E land observations [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(5): 938-947. DOI: 10.1109/TGRS. 2004. 837507.
- [27] Mera Y E Z, Vera J F R, Pérez-Martín M Á. Linking El Niño Southern Oscillation for early drought detection in tropical climates: The Ecuadorian coast [J]. Science of The Total Environment, 2018, 643: 193-207. DOI: 10.1016/j. scitotenv.2018.06.160.
- [28] Wang X, Piao S, Ciais P, *et al.* A two-fold increase of carbon cycle sensitivity to tropical temperature variations [J]. Nature, 2014, 506(7487): 212-215. DOI: 10.1038/nature12915.
- [29] Dai A. Increasing drought under global warming in observations and models [J]. Nature Climate Change, 2013, 3(1): 52-58. DOI: 10.1038/nclimate1633.
- [30] Zhao M, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009 [J]. Science, 2010, 329(5994): 940-943. DOI: 10.1126/science. 1192666.
- [31] Abatzoglou J T, Dobrowski S Z, Parks S A, *et al.* TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015 [J]. Scientific Data, 2018, 5(1): 1-12. DOI: 10.1038/sdata.2017.191.
- [32] Rawson H M, Begg J E, Woodward R G. The effect of atmospheric humidity on photosynthesis, transpiration and water use efficiency of leaves of several plant species [J]. Planta, 1977, 134(1): 5-10. DOI: 10.1007/BF00390086.
- [33] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, *et al.* The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137(656): 553-597. DOI: 10.1002/qj.828.
- [34] Saatchi S, Asefi-Najafabady S, Malhi Y, *et al.* Persistent effects of a severe drought on Amazonian forest canopy [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(2): 565-570. DOI: 10.1073/pnas.1204651110.
- [35] Malhi Y, Aragão L E O C, Galbraith D, *et al.* Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106(49): 20610-20615. DOI: 10.1073/pnas.0804619106.
- [36] Viovy N. CRUNCEP version 7-Atmospheric forcing data for the community land model [DB/OL]. <https://doi.org/10.5065/PZ8F-F017>, 2018 Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, 2018, 10.
- [37] Rocha H, Goulden M, Miller S, *et al.* Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in Eastern Amazonia [J]. Ecological Applications, 2004, 14: 22-32. DOI: 10.1890/02-6001.
- [38] Shuttleworth W J, Leuning R, Black T A, *et al.* Micrometeorology of temperate and tropical forest [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 1989, 324: 299-334. DOI: 10.1098/rstb.1989.0050.
- [39] von Randow C, Manzi A O, Kruijt B, *et al.* Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2004, 78: 5-26. DOI: 10.1007/s00704-004-0041-z.
- [40] Syed T H, Famiglietti J S, Rodell M, *et al.* Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS [J]. Water Resources Research, 2008, 44(2). DOI: 10.1029/2006WR005779.
- [41] Humphrey V, Gudmundsson L. GRACE-REC: A reconstruction of climate-driven water storage changes over the last century [J]. Earth System Science Data, 2019, 11(3): 1153-1170. DOI: 10.5194/essd-11-1153-2019.
- [42] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2-3): 213-224. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00274-7.
- [43] Tang H, Dubayah R. Light-driven growth in Amazon evergreen forests explained by seasonal variations of vertical canopy structure [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017, 114: 2640-2644. DOI: 10.1073/pnas. 1616943114.
- [44] Alley W M. The Palmer drought severity index: Limitations and assumptions [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1984, 23(7): 1100-1109. DOI: 10.1175/1520-0450(1984)023<1100:TPDSIL>2.0.CO;2.
- [45] Li M, Ma Z. Soil moisture drought detection and multi-temporal variability across China [J]. Science China Earth Sciences. 2015, 58(10): 1798. DOI: 10.1007/s11430-015-5076-8.
- [46] Li Chao, Li Xuemei, Tian Yalin, *et al.* Time and space fusion model comparison of temperature vegetation drought index [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(4): 832-844. [李超, 李雪梅, 田亚林, 等. 温度植被干旱指数时空融合模型对比 [J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(4): 832-844.]
- [47] Zhang Mao, Zhang Xia, Hu Guangcheng, *et al.* Applicability analysis of remote sensing based drought indices in drought monitoring of apple in Luochuan [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(1): 187-197. [张茂, 张霞, 胡光成, 等. 遥感干旱指数在洛川苹果干旱监测中的适用性分

- 析[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(1): 187-197.]
- [48] Zhao Jiepeng, Zhang Xianfeng, Liao Chunhua, *et al.* TVDI based soil moisture retrieval from remotely sensed data over large arid areas[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(6): 742-750. [赵杰鹏, 张显峰, 廖春华, 等. 基于 TVDI 的大范围干旱区土壤水分遥感反演模型研究[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(6): 742-750.]
- [49] Andela N, Liu Y Y, Van Dijk A, *et al.* Global changes in dryland vegetation dynamics (1988 - 2008) assessed by satellite remote sensing: Comparing a new passive microwave vegetation density record with reflective greenness data[J]. Biogeosciences, 2013, 10(10): 6657-6676. DOI: 10.5194/bg-10-6657-2013.
- [50] 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. DOI: 10.1016/j.rse.2008.07.015.
- [51] Zhang Shuoxin, Hanno R. Cavitation and embolization in the Xylem of woody plants[J]. Journal of Northwest Forestry College, 1996(3): 19-30. [张硕新, Hanno Richter. 木本植物木质部的空穴和栓塞化[J]. 西北林学院学报, 1996(3): 19-30.]
- [52] Guan K, Pan M, Li H, *et al.* Photosynthetic seasonality of global tropical forests constrained by hydroclimate[J]. Nature Geoscience, 2015, 8(4): 284-289. DOI: 10.1038/ngeo.2382.
- [53] Xu L, Saatchi S S, Yang Y, *et al.* Satellite observation of tropical forest seasonality: Spatial patterns of carbon exchange in Amazonia[J]. Environmental Research Letters, 2015, 10(8): 084005. DOI: 10.1088/1748-9326/10/8/084005.

The Application of Microwave Temperature-Vegetation Drought Index (MTVDI) based on the AMSR-E in Amazon Basin

Liu Liyang^{1,2,3,4,5}, Yang Xueqin^{1,2,3,4,5}, Chen Xiuzhi³, Su Yongxian^{2,4},
Ren Jiashun^{3,4}, Huang Guangqing^{1,4}

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640, China;

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou),
Guangzhou 511458, China;

3. School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China;

4. Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China;

5. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Amazon basin, dominated by tropical evergreen broad-leaved forests, has frequently encountered drought stress due to the global climate change. The implementation of long-term regional drought monitoring in such areas has always been a serious issue. In this paper, we conducted a long-term drought monitoring of the Amazon basin from 2003 to 2008 based on the Microwave Temperature-Vegetation Drought Index (MTVDI) proposed by Liu *et al.* in 2017. And the MTVDI was evaluated by using Vapor Pressure Deficit (VPD), Palmer Drought Severity Index (PDSI), Terrestrial Water Storage (TWS) and Climatological Water Deficit (CWD). The results show that: For the whole study area, MTVDI is strongly associated with VPD and CWD (Pearson R are 0.72 and 0.57, respectively). In contrast, weak correlations exist between MTVDI and TWS, CWD. In general, MTVDI has well capacity to monitor drought dynamics in Amazon.

Key words: Microwave Temperature-Vegetation Drought Index; Drought monitoring; Amazon Basin; Seasonal drought