

AMSR_2 微波植被指数在黄河流域的适用性对比与分析

周俊利^{1,2}, 薛华柱¹, 董国涛², 樊东¹, 郭欣伟², 殷会娟²

(1. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000;

2. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院 水利部 黄土高原水土流失过程与控制重点实验室, 郑州 450003)

摘要:微波数据具有全天候、穿透性强及不受云层影响等优势,使其在遥感研究领域得到越来越多的应用。利用 2012 年 7 月至 2016 年 12 月 AMSR_2 双极化亮温数据,反演微波穿透指数 MVI 与不同频率的微波极化差异指数 MPDI₁₈ 与 MPDI_{36.5},对比黄河流域各微波植被指数与光学植被指数 NDVI 的差异,分析了微波植被指数在黄河流域的适用性。结果表明:微波穿透指数 MVI 与光学植被指数 NDVI 呈现显著负相关关系;微波极化差异指数 MPDI₁₈, MPDI_{36.5} 与光学植被指数 NDVI 呈显著正相关关系;其中,微波极化差异指数 MPDI_{36.5} 与光学植被指数 NDVI 的逐月变化趋势几乎同步,相关系数达到了 0.999。微波植被指数与光学植被指数对降雨、气温的响应大致相同。整体来说,微波穿透指数与微波极化差异指数在黄河流域均具有较好的适用性。

关键词:AMSR_2 微波数据; 植被指数; 适用性; 黄河流域

中图分类号:TP79; Q94

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)05-0378-07

Comparison and Analysis of Applicability of AMSR_2 Microwave Vegetation Index in the Yellow River Basin

ZHOU Junli^{1,2}, XUE Huazhu¹, DONG Guotao², FAN Dong¹, GUO Xinwei², YIN Huijuan²

(1. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo,

Henan 454000, China; 2. Key Laboratory of Soil and Water Loss Process and Control on the Loess

Plateau, Ministry of Water Resources, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Microwave data have the advantages of all-weather, penetrating and free from the clouds, and it is more and more widely used in remote sensing research. This paper uses AMSR_2 dual polarization brightness temperature data from July 2012 to December 2016, to invert microwave polarization index MVI and microwave polarization difference index MPDI₁₈ and MPDI_{36.5} of different frequencies. The difference between the microwave vegetation index and the optical vegetation index NDVI were compared, and the applicability of microwave vegetation index of the Yellow River Basin was analyzed. The result showed that the microwave penetration index MVI was negatively correlated with the optical vegetation index NDVI, microwave polarization difference index MPDI₁₈ and MPDI_{36.5} were significantly positively correlated with the optical vegetation index NDVI; among them, the microwave polarization difference index MPDI_{36.5} was almost identical with the monthly variation trend of the optical vegetation index NDVI, the correlation coefficient reached up to 0.999. The responses of microwave vegetation index and optical vegetation index to rainfall were approximately the same. As a whole, the microwave penetration index and microwave polarization difference index have good applicability in the Yellow River Basin.

Keywords: AMSR_2 microwave data; vegetation index; applicability; Yellow River Basin

植被在地球系统中扮演着重要的角色,植被指数作为植被生长、植被分布、生物量等信息提取的重要手段,已广泛应用于许多领域^[1-3]。因此,地球植被及

其变化一直被各国科学家和政府所关注^[4]。根据植被的光谱特性,将卫星可见光和近红外波段进行组合,形成了各种光学植被指数。目前较为常用的植被

指数有归一化植被指数 NDVI、增强植被指数 EVI 等。光学遥感容易受到环境条件和大气状况等多种因素的影响,在时空分布上具有一定的局限性。相较于光学遥感,微波遥感不受太阳照射、大气、云层、降水等因素的限制,具有全天时和全天候工作的能力,对植被木质部生物量、植被类型以及土壤含水量等具有非常强的敏感性,可以探测到相对较厚的植被层^[5]。相较于光学遥感和主动微波遥感,被动微波遥感的时间分辨率高,数据量低,数据处理较简单,更适用于大范围、长时序的植被实时监测^[6]。星载被动微波传感器因其穿透力较强、天气影响较小、数据更新快等优点,在对地观测中扮演着重要的角色,为地表参数反演及地球环境变化的研究提供了重要的数据^[7]。目前利用微波数据反演得出的各个微波植被指数与全国不同地区光学植被指数 NDVI 均具有良好的相关性^[8-12]。

在研究典型地物微波辐射特性时,利用积分方程模型进行模拟,发现裸露地表情况下不同频率辐射率之间呈很强的线性关系,根据这一特性利用植被地表辐射模型推导出微波穿透指数 MVI^[13-14]。陈思宇等利用青南牧区 2007—2010 年 AMSRE 升轨与降轨的亮温数据采用不同的频率组合反演微波穿透指数 MVI,结果表明升轨低频数据反演的 MVI 与光学植被指数相关性最好^[15]。吕京国等利用 AMSR_E 和 MODIS 数据,探讨了微波穿透指数 (Microwave Vegetation Penetration Index, MVI) 与光学植被指数 NDVI 的关系。结果表明微波穿透指数 MVI 与光学植被指数 NDVI 呈负相关关系,且利用 MVI 数据模拟生成的 NDVI 图像结果比较令人满意^[16]。

Choudhury 等利用 37 GHz 频率计算了微波极化差指数 (Microwave Polarization Difference Temperatures, MPDT),发现其与 AVHRR 植被指数具有一定的相关关系^[17],并将其应用到了全球植被的监测中去^[18]。Plaloscia 等通过研究计算出的微波极化差异指数 (Microwave Polarization Difference Index, MPDI) 能反映植物生物量^[19],而 Becker 通过研究发现 MPDI 在对植被较稀疏地区的干旱监测中具有重要意义^[20]。此外,毛克彪等人也做了相应的微波植被指数的应用研究^[15,21]。

由前人的研究可知,目前较常用的微波植被指数 MPDT, MPDI, MVI 均为 AMSR_E 微波传感器的亮温数据反演而来^[12],且其与光学植被指数均具有较好的相关性。AMSR_E 微波传感器与 2011 年 10 月停止工作,新一代微波传感器 AMSR_2 于 2012 年 7 月正式运行;对于植被生长变化的监测分析来说,需要长期稳定、实时更新的卫星数据作为支持,本文选取新一代微波遥感数据 AMSR_2 数据,通过对比卫

星传感器不同频率亮温数据反演的微波植被指数来分析新一代微波遥感数据 AMSR_2 在黄河流域植被变化监测与分析中的适用性。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

黄河流域位于东经 95°53′—119°14′,北纬 32°9′—41°51′,西起巴颜喀拉山,东至渤海,南临秦岭,北抵阴山,流域面积 75.2 万 km²。黄河流域幅员辽阔,横跨第一、第二、第三阶梯,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东 9 个省区。流域内山脉众多,地形复杂,地貌类型多样,从西到东横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮海平原 4 个地貌单元,流域地势西高东低,西部河源地区平均海拔在 4 000 m 以上,由一系列高山组成,常年积雪,冰川地貌发育;中部地区海拔在 1 000~2 000 m,为黄土地貌,水土流失严重;东部海拔多不超过 50 m,主要由黄河冲积平原组成。流域内地形及气候的多样性使得流域内植被覆盖差异较大,不仅在时间上植被覆盖变化显著,在不同地区植被分布也大不相同。同时流域地表植被的变化趋势还与流域生态环境的变化息息相关,如国家引导的退耕还林政策,使得近年来山西陕西北部山地植被覆盖度明显提高,水土流失现象得到很大改善。

1.2 数据与及处理

搭载第二代先进微波辐射成像仪 AMSR_2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer (2)) 的“第一轮卫星计划之全球水圈变化观测卫星”(GCOM-W1) 于 2012 年 7 月 4 日发射进入极轨^[22]。AMSR_2 具有 14 个亮温观测通道,与之前得 AMSR_E (Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth Observing System) 相比,AMSR_2 增加了 7.3 GHz 的通道,目的是在观测时避免无线电频率的干扰^[23-25],从而得到更可靠的土壤湿度等数据^[26]。本文采用的 AMSR_2 数据为 10 km 分辨率的水平垂直极化化亮温数据,时间序列为 2012 年 7 月至 2016 年 12 月,时间分辨率为 1 个月,频率选取 10 GHz, 18 GHz 与 36.5 GHz 的水平垂直极化亮温数据,微波数据由日本宇宙航空研究开发机构 (Japan Aerospace Exploration Agency; <http://gcom-w1.jaxa.jp/index.html>) 网站下载。

AMSR_2 微波亮温数据为 HDF 格式的正弦投影,对其进行投影转换,转换为 TIFF 格式的经纬度投影;对不同频率亮温数据依据头文件中各频率信息对其进行波段计算,得到标准亮温数据;然后对其进行裁剪,提取出研究区内各通道水平垂直极化亮温数据;为消除背景值的影响,采用最小值合成法合称为逐月水平垂直极化

亮温数据,并利用公式 1,公式 2 计算出植被穿透指数 MVI^[13,14]、微波极化差异指数 MPDI^[17]。

$$MVI = \frac{T_{Bv}(f_1)T_{Bh}(f_1)}{T_{Bv}(f_2)T_{Bh}(f_2)} \quad (1)$$

$$MPDI = \frac{T_{Bv}(f_1) - T_{Bh}(f_1)}{T_{Bv}(f_1) + T_{Bh}(f_1)} \quad (2)$$

式中: $T_{Bv}(f_1)$ 、 $T_{Bh}(f_1)$ 分别为频率为 18 GHz, 36.5 GHz 的垂直和水平极化亮温值; $T_{Bv}(f_2)$ 、 $T_{Bh}(f_2)$ 为频率 36.5 GHz 的垂直和水平极化亮温值。

光学植被指数数据采用 MODIS 三级产品 MOD13A3。MOD13A3 植被产品空间分辨率为 1×1 km, 算法吸收全部 16 d 覆盖全月的产品, 若大气中无云, 采用时间加权平均值法, 或采用最小值以防止云层的影响, 数据由美国国家航空航天局 (NASA, <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) 下载。数据格式为正弦投影的 HDF 格式, 时段与微波数据保持一致。光学植被指数数据集经投影转换、波段计算、研究区裁剪, 提取黄河流域 2012 年 7 月至 2016 年 12 月植被指数数据集。

气象站点降雨实测数据为中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/site/index.html>) 下载的全国气象站点数据。利用研究区内站点站号, 通过 IDL 编程提取出黄河流域内 76 个气象站点逐日降雨数据与气温数据, 计算出逐月降雨、气温数据, 采用逐站点、分时段的方法分析光学植被指数植被的变化与降雨影响因素的相关性。

2 方法

本文从数值对比、相关分析、趋势分析方面来分析微波穿透指数 MVI、微波极化差异指数 MPDI 与 MODIS 植被指数的变化趋势一致性与相关性。同时分析各微波植被指数与降雨站点实测数据间的相关关系。计算方法分别为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: y_i 为微波植被指数值, 数据均值为 \bar{y} ; x_i 为光学植被指数值, 数据集均值为 \bar{x} ; i 为像元标识; n 为时间序列内删格数据对个数。相关系数 R 表示两数据间的相关及一致性程度; R 越接近于 1, 表明两数据集之间相关性越高。

$$\text{Slope} = \frac{\sum_{i=1}^n (i - \bar{i})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (i - \bar{i})^2} \quad (4)$$

式中: n 为研究时段长度 (本研究中为 2012 年 7 月—

2016 年 12 月年); x_i 为第 i 年的植被指数值; \bar{x} 为植被指数多年平均值。当 Slope 值大于 0 时, 表明研究时段内植被指数呈增长趋势, 反之呈减少趋势; Slope 绝对值越大, 说明变化越强烈, 反之变化越为平缓。

3 结果与分析

3.1 长时序变化对比

长时间序列植被指数的对比与分析, 能有效的分析植被指数集间的相关性及一致性。对黄河流域 2012 年 7 月至 2016 年 12 月各微波植被指数与光学植被指数产品作对比与分析, 结果见图 1。微波穿透指数 MVI 与光学植被指数 NDVI 成反比, 即微波穿透指数 MVI 增大时, 光学植被指数 NDVI 减小, 如每年 11 月、12 月份, 光学植被指数 NDVI 数值达到最小, 微波穿透指数 MVI 达到最大值。微波极化差异指数数据有效范围在 0~0.06, 微波极化差异指数整体的变化趋势与光学植被指数 NDVI 大致相同, 变化曲线的波峰波谷相一致。不同频率反演的微波极化差异指数大小不同, 基于 18 通 GHz 水平垂直极化亮温数据反演的微波极化差异指数 MPDI₁₈ 整体上大于 36.5 GHz 反演的极化差异指数 MPDI_{36.5}。

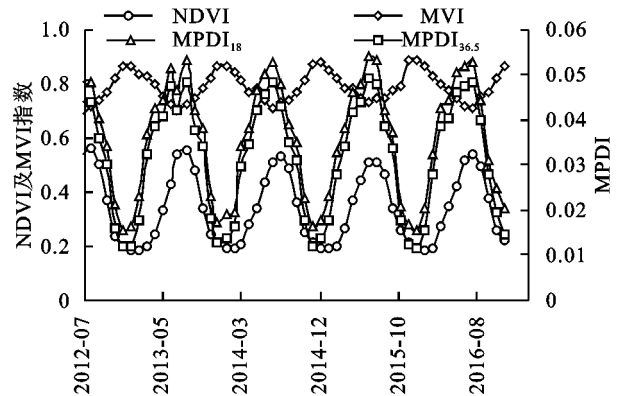


图 1 微波植被指数 MVI、MPDI 与光学植被指数 NDVI 时间变化

整体而言, 不同的微波植被指数与光学植被指数的相关性也不同, 图 2 为光学植被指数与微波植被指数 MVI, MPDI₁₈, MPDI_{36.5} 的长时序月均值线性关系图, 由图可知, 微波穿透指数 MVI 与光学植被指数 NDVI 呈负相关, 两数据集植被指数值十分靠近回归线, R^2 为 0.85。微波极化差异指数 MPDI₁₈, MPDI_{36.5} 与光学植被指数 NDVI 也具有较好的相关性, R^2 分别达到 0.71 与 0.70。光学植被指数 NDVI 与微波穿透指数 MVI 线性回归图中数值整体均在回归线上及附近, 光学植被指数 NDVI 与两微波极化差异指数 MPDI₁₈, MPDI_{36.5} 线性回归图中数值分布较分散, 靠近回归线附近数值较少。

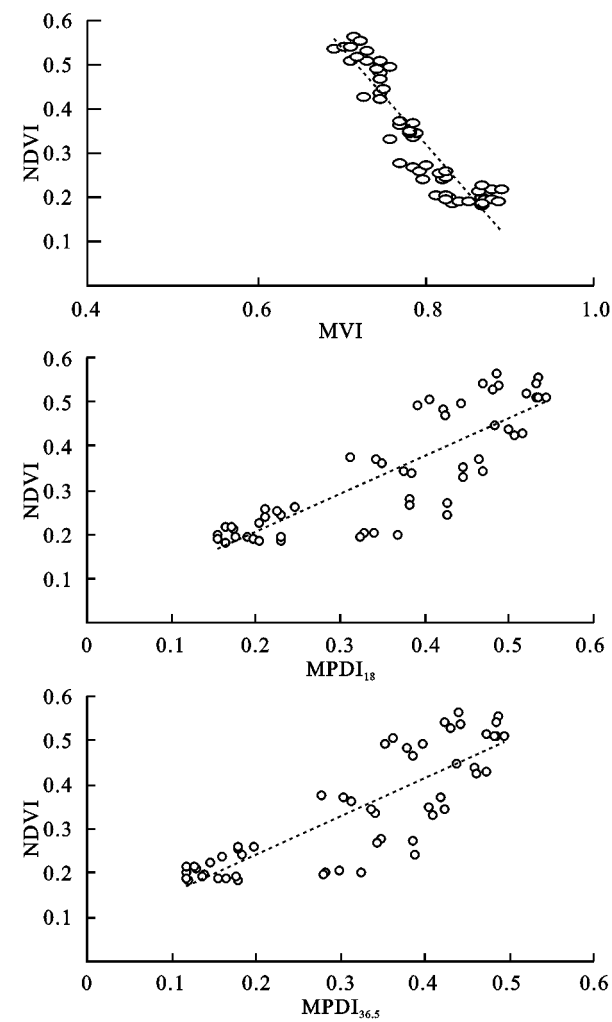


图 2 光学植被指数 NDVI 与不同微波植被指数的线性关系

3.2 逐月均值变化分析

植被在不同月份植被含水量、叶绿素含量等生物量均不同,微波植被指数与光学植被指数在不同月份均有相应的变化响应。图 3 为各微波植被指数数据集与光学植被指数数据集的多年逐月平均值散点图。由图中得知,微波极化差异指数 $MPDI_{18}$ 月均值散点图与光学植被指数 NDV 月均值 I 散点图变化曲线大致相同,植被指数较好的月份也集中在 5 到 9 月份,且两植被指数数据集逐相关系数为 0.851。微波植被指数 $MPDI_{36.5}$ 与光学植被指数 NDVI 的月均值的变化趋势几乎同步,两数据集植被分布最好的月份集中体现在 7 到 9 月份,且微波极化差异指数 $MPDI_{36.5}$ 的月均值散点图较 $MPDI_{18}$ 平滑,微波植被指数 $MPDI_{36.5}$ 与光学植被指数 NDVI 的相关系数达到了 0.999,即两数据集具有极强的相关性。而微波穿透指数 MVI 与光学植被指数 NDVI 的变化趋势呈负相关关系,相关系数为 -0.938 ,两数据集月均值变化呈反比,光学植被指数 NDVI 增加的月份,微波穿透指数 MVI 则减小,且微波穿透指数 MVI 的变化波动较小。

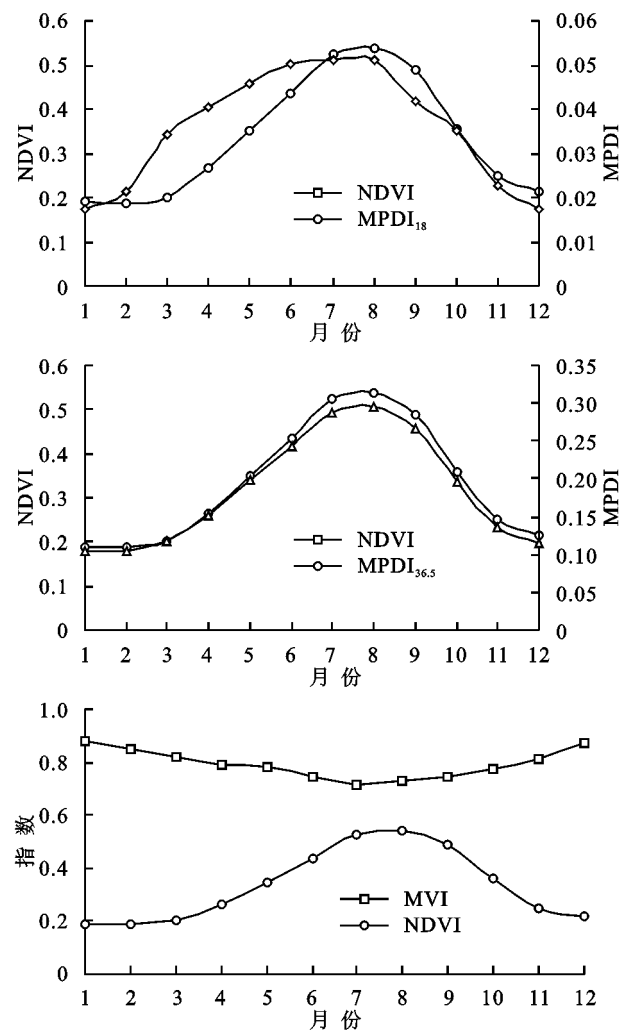


图 3 光学植被指数与微波植被指数多年逐月均值对比

3.3 光学植被指数与微波植被指数空间分布

3.3.1 相关分析 光学植被指数 NDVI 分别与微波植被指数 MVI , $MPDI_{18}$, $MPDI_{36.5}$ 进行皮尔森 (pearson) 显著性检验,结果见表 1。光学植被指数 NDVI 与微波植被指数 MVI 显著性检验中的 p 值小于 0.01,相关系数为 -0.924 ,即光学植被指数 NDVI 与微波植被指数 MVI 呈显著性负相关关系;光学植被指数 NDVI 与微波植被指数 $MPDI_{18}$ 显著性检验中的 p 值小于 0.01,相关系数为 0.841,即光学植被指数 NDVI 与微波植被指数 $MPDI_{18}$ 呈显著性正相关关系;光学植被指数 NDVI 与微波植被指数 $MPDI_{36.5}$ 显著性检验中的 p 值小于 0.01,相关系数为 0.839,即光学植被指数 NDVI 与微波植被指数 $MPDI_{36.5}$ 呈显著性正相关关系。

表 1 NDVI 与各微波指数显著性分析

指标	R	Sig.
NDVI—MVI	-0.924	0.000
NDVI— $MPDI_{18}$	0.841	0.000
NDVI— $MPDI_{36.5}$	0.839	0.000

光学植被指数与各微波植被指数逐像元相关性

分析能很好的体现两数据集空间分布的一致性。微波穿透指数 MVI、微波极化差异指数 $MPDI_{18}$, $MPDI_{36.5}$ 与光学植被指数 NDVI 像元相关性空间分布如图 4A—C 所示。

微波穿透植被指数 MVI 与光学植被指数 NDVI 呈负相关关系,统计结果显示两数据集负相关区域占流域总面积的 97.49%,其中相关系数小于 0.6 的区域占全区总面积的 82.1%,相关系数小于 0.8 占全区中面积的 61.1%,负相关关系明显的区域主要分布于黄河中游。

微波极化差异指数 $MPDI_{18}$ 与光学植被指数

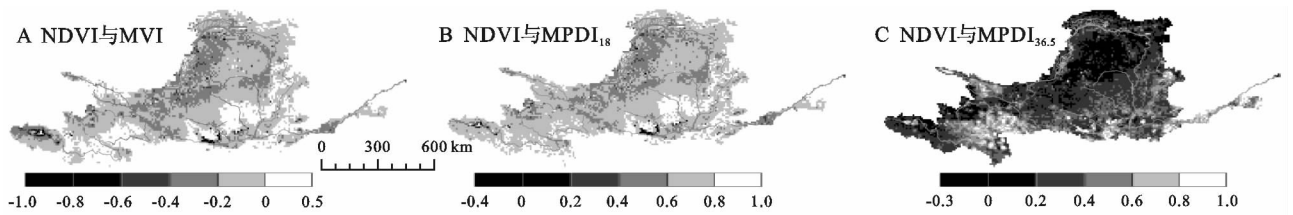


图4 NDVI 与 MVI, $MPDI_{18}$, $MPDI_{36.5}$ 相关系数分布

3.3.2 趋势分析 为量化分析研究区内 NDVI 的空间变化特征,将 2012 年 7 月—2016 年 12 月植被指数均值利用趋势分析方法得到 54 月间的黄河流域月均植被指数变化趋势,光学植被指数 NDVI、微波植被指数 MVI, $MPDI_{18}$, $MPDI_{36.5}$ 变化斜率图分别为图 5A—D 所示,不同植被指数数据集在黄河流域内 Slope 变化范围为各不相同,表明植被变化趋势的空间不一致性。图 5A 光学植被指数 NDVI 变化斜率图表明黄河流域植被改善面积大于植被退化面积,其中黄河干流区域、北洛河、无定河、泾河、渭河、汾河等流域植被改善较大,其中伊洛河流域植被改善情况为

NDVI 相关性。统计结果显示两数据集呈正相关区域所占百分比为 99.7%,其中相关系数大于 0.6 的区域占全区总面积的 97.76%,相关系数大于 0.8 的区域占全区总面积的 76.16%。在黄河流域内,微波极化差异指数 $MPDI_{18}$ 与光学植被指数 NDVI 具有很好的一致性。

微波极化差异指数 $MPDI_{36.5}$ 与光学植被指数 NDVI 也呈现较好的相关性。统计结果显示两数据集呈正相关区域所占百分比为 99.79%,其中相关系数大于 0.6 的区域占全区总面积的 98.22%,相关系数大于 0.8 的区域占全区总面积的 78.07%。

全流域最大。图 5B 微波穿透指数 MVI 变化斜率图表明植被指数降低区域主要集中在黄河源区与渭河上中游、无定河、十大孔兑流域等支流,即 MVI 斜率变化趋势与 NDVI 斜率变化趋势相反。图 5C 微波极化差异指数 $MPDI_{18}$ 与图 5D 中 $MPDI_{36.5}$ 变化斜率图表明微波极化差异指数斜率变化趋势与光学植被指数 NDVI 斜率变化趋势整体一致,然而 $MPDI_{18}$ 植被指数在空间上的植被变化斜率值整体小于 $MPDI_{36.5}$ 斜率值,如黄河源区、伊洛河流域等区域。即基于 36.5 频率的 $MPDI_{36.5}$ 微波极化差异指数在植被变化监测方面优于基于 18 频率的微波极化差异指数 $MPDI_{18}$ 。

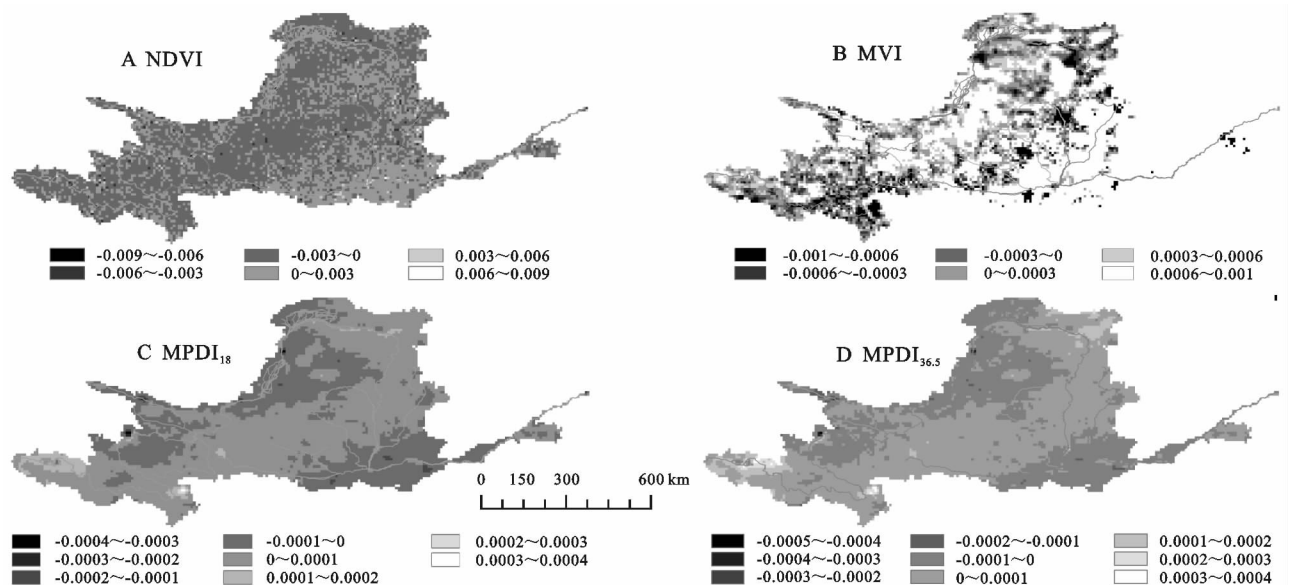


图5 NDVI, MVI, $MPDI_{18}$, $MPDI_{36.5}$ 植被指数变化斜率

3.4 植被对降雨的响应

降雨与气温作为植被生长过程的重要影响因素,

与植被的变化存在密不可分的关系^[27],本文利用黄河流域内国家气象站点实测降雨数据、气温数据分别

与光学植被指数 NDVI 与微波穿透指数 MVI、微波极化差异指数 MPDI₁₈ 与 MPDI_{36.5} 进行趋势分析。

提取黄河流域气象站点位置的各植被指数,分别与与站点降雨数据、气温数据进行显著性检验与相关分析,表 2 中显示实测降雨数据与光学植被指数 NDVI 具有最好的相关性,其中光学植被指数 NDVI,微波极化差异指数 MPDI₁₈ 与 MPDI_{36.5} 与降雨数据极显著相关;微波穿透指数 MVI 与降雨数据的相关性较低,且显著性水平较差。表 3 中显示实测气温数据与不同植被指数显著性相关分析,其中微波穿透指数 MVI 与气温显著性相关,微波计划差异指数在春季与夏季与气温也有显著性相关。

表 2 不同植被指数与降雨显著性相关统计

时期	NDVI	MVI	MPDI ₁₈	MPDI _{36.5}
春季	0.66**	0.22	0.75**	0.79**
夏季	0.5**	0.002	0.55**	0.57**
秋季	0.56**	0.17	0.64**	0.66**
冬季	0.65**	0.18	0.48**	0.51**
月	0.64**	0.16	0.68**	0.7**

注: * 代表 $p<0.05$, ** 代表 $p<0.01$ 。

表 3 不同植被指数与气温显著性相关统计

时期	NDVI	MVI	MPDI ₁₈	MPDI _{36.5}
春季	0.08	0.2	0.39**	0.37**
夏季	0.28*	0.25*	0.47**	0.48**
秋季	0.09	0.33**	0.17	0.16
冬季	0.27*	0.44**	0.09	0.01
月	0.02	0.33**	0.28*	0.29*

注: * 代表 $p<0.05$, ** 代表 $p<0.01$ 。

4 结 论

(1) 各植被指数数据集长时间序列对比分析,结果显示微波极化差异指数 MPDI₁₈, MPDI_{36.5} 的变化趋势与光学植被指数 NDVI 相同,变化曲线的波峰波谷相一致。微波穿透指数 MVI 与光学植被指数 NDVI 呈显著负相关,光学植被指数 NDVI 增加时,微波穿透指数 MVI 减小,且微波穿透指数 MVI 数据整体较大,数值范围集中在 0.65~0.9。

(2) 微波植被数据集与光学植被数据集的多年逐月均值对比结果表明:微波穿透指数 MVI 与光学植被指数 NDVI 对植被生长的月份变化均具有较好的表现。其中微波穿透指数 MPDI_{36.5} 在反映植被生长变化中与光学植被指数 NDVI 存在最好的一致性,其相关性达到 0.999。

(3) 微波植被指数数据集与光学植被指数数据集的空间分布具有很好的相关性与一致性。学植被指数与各微波植被指数逐像元相关性分析显示:微波穿透指数 MVI 与光学植被指数 NDVI 呈现极强的

负相关关系,且相关性较好的区域大多集中在黄河流域上中游。微波极化差异指数 MPDI₁₈, MPDI_{36.5} 与光学植被指数 NDVI 呈现很好的正相关关系,两微波植被指数在全流域内与光学植被指数均呈现较好的一致性,上游扎陵湖与鄂陵湖地区与中游渭河流域宝鸡市附近相关性较小。光学植被指数 NDVI 与微波植被指数 MVI, MPDI₁₈, MPDI_{36.5} 变化斜率显示: MVI 斜率变化趋势与 NDVI 斜率变化趋势相反,微波极化差异指数斜率变化趋势与光学植被指数 NDVI 斜率变化趋势整体一致,且基于 36.5 频率的微波极化差异指数在植被变化监测方面优于基于 18 频率的微波极化差异指数 MPDI₁₈。

(4) 黄河流域内光学植被指数 NDVI、微波穿透指数 MVI、微波极化差异指数 MPDI₁₈, MPDI_{36.5} 与降雨数据、气温数据均具有较好的响应。光学植被指数数据集 NDVI、微波极化差异指数 MPDI₁₈, MPDI_{36.5} 与实测降雨有较好的相关性;微波植被指数与实测气温数据的相关性整体优于光学植被指数 NDVI。

参考文献:

[1] 郭锐,陈添宇,陈乾. 用 NOAA 气象卫星资料对甘肃省河东地区土地覆盖分类[J]. 高原气象,1995,14(4):467-475.

[2] 孙睿,朱启疆. 中国陆地植被净第一性生产力及季节变化研究[J]. 地理学报,2000,55(1):36-45.

[3] 陈维英,肖乾广. 距平植被指数在 1992 年特大干旱监测中的应用[J]. 遥感学报,1994,36(2):106-112.

[4] 郭锐. 植被指数及其研究进展[J]. 干旱气象,2003,21(4):71-75.

[5] 陈亮,杜今阳. L 波段多角度微波植被指数研究[J]. 遥感信息,2010,2010(1):13-16.

[6] 李爽,宋小宁,冷佩. 被动微波遥感植被指数在中国的应用研究[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(8):44-49.

[7] 邱玉宝,郭华东,石利娟,等. 基于 AMSR-E 的全球陆表被动微波发射率数据集[J]. 遥感技术与应用,2016,31(4):809-819.

[8] Shi J, Jackson T, Tao J, et al. Microwave vegetation indexes derived from satellite microwave radiometers[C] // IEEE, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007.

[9] 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.

[10] 陈思宇,于惠,冯琦胜,等. 基于 amsr-e 数据的微波植被指数与 modis 植被指数关系研究[J]. 草业科学,2012,29(3):377-383.

[11] 于惠,冯琦胜,陈思宇,等. 基于微波植被指数的甘南草地生物量动态监测[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2011,47(4):69-74.

- [12] 李爽,宋小宁,冷佩. 被动微波遥感植被指数在中国的应用研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(8): 44-49.
- [13] Shi J, Jiang L, Zhang L, et al. A parameterized multi-frequency-polarization surface emission model [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 43(12): 2831-2841.
- [14] Shi J, Chen K S, Li Q, et al. A parameterized surface reflectivity model and estimation of bare-surface soil moisture with L-band radiometer[J]. Ieee Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2002, 40(12): 2674-2686.
- [15] 陈思宇,于惠,冯琦胜,等. 基于 amsr-e 数据的微波植被指数与 modis 植被指数关系研究[J]. 草业科学, 2012, 29(3): 377-383.
- [16] 吕京国,张小咏,蒋玲梅,等. 微波穿透指数 MVI 与光学植被指数 NDVI 的关系探讨[J]. 遥感信息, 2009, 2009(6): 39-42.
- [17] Choudhury B J, Tucker C J, Golus R E, et al. Monitoring vegetation using Nim bus-7 scanning multichannel microwave radiometer's data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1987, 8(3): 533-538.
- [18] Choudhury B J, Tucker C J. Monitoring global vegetation using Nimbus-737 GHz Data some empirical relations[J]. International Journal of Remote Sensing, 1987, 8(7): 1085-1090.
- [19] 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.
- [20] 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, 24(2): 297-311.
- [21] 毛克彪,唐华俊,周清波,等. Amstr-e 微波极化指数与 modis 植被指数关系研究[J]. 国土资源遥感, 2007, 1(1): 27-31.
- [22] Kachi M, Imaoka K, Shimoda H. Long-term observations of water and climate by AMSR-E and GCOM-W [J]. Proceedings of Spie-the International Society for Optical Engineering, 2009, 7474(1): 24-26.
- [23] Li L, Njoku E G, Im E, et al. A preliminary survey of radio-frequency interference over the U. S. In Aqua AMSR-E data[J]. Geoscience & Remote Sensing Ieee Transactions on, 2004, 42(2): 380-390.
- [24] 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 & Remote Sensing, 2005, 43(5): 938-947.
- [25] Kidd C. Radio frequency interference at passive microwave earth observation frequencies[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(18): 3853-3865.
- [26] Njoku E G, Jackson T J, Lakshmi V, et al. Soil moisture retrieval from AMSR-E[J]. Ieee Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2003, 41(2): 215-229.
- [27] 李秀花,师庆东,常顺利,等. 中国西北干旱区 1981—2001 年 NDVI 对气候变化的响应分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(5): 989-994.



(上接第 377 页)

- [30] 李正国,王仰麟,吴健生,等. 基于植被—温度特征的黄土高原地表水分季节变化[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4563-4575.
- [31] Gillies R R. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover[J]. Remote Sensing Reviews, 1994, 9(1): 161-173.
- [32] Goetz S J. Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(1): 71-94.
- [33] Gillies R R, Kustas W P, Humes K S. A verification of the 'triangle' method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(15): 3145-3166.
- [34] Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration[J]. Ieee Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1990, 28(5): 940-948.
- [35] Carlson T N, Capehart W J, Gillies R R. A new look at the simplified method for remote sensing of daily evapotranspiration [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 54(2): 161-167.
- [36] 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): 213-224.