

基于 AMSR2 微波植被指数与地表温度的旱情分析

周俊利^{1,2}, 薛华柱¹, 董国涛², 樊东¹, 刘启兴¹, 贾培培¹

(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: 基于微波数据全天时、全天候、不受云层影响等优点, 选取了 2012 年 7 月—2016 年 12 月的 AMSR2 微波数据中的 10, 18, 36.5 GHz 水平垂直极化亮温数据反演微波穿透指数 MVI 与微波极化差异指数 MPDI₁₈, MPDI_{36.5}, 构建了微波植被指数与光学地表温度的微波旱情指数 TMVDI, TMPVDI₁₈, TMPVDI_{36.5}, 并与光学旱情指数 TVDI 进行了对比, 分析了微波旱情指数在黄河流域旱情监测中的适用性。结果表明: 微波旱情指数时空变化趋势与光学旱情指数基本保持一致; 微波旱情指数在黄河流域旱情监测中具有很好的适用性, 在大部分地区微波旱情指数反演效果优于光学旱情指数; 光学、微波旱情指数与降雨因素的相关分析也表明微波旱情指数与降雨的相关关系整体优于光学旱情指数与降雨的相关关系, 且微波旱情指数与降雨相关关系较好的区域集中在黄河流域南部地区。

关键词: AMSR2 微波; 植被指数; 旱情指数; 适用性

中图分类号: P426.616; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)06-0377-06

Analysis on Drought Based on AMSR2 Microwave Vegetation Index and Surface Temperature

ZHOU Junli^{1,2}, XUE Huazhu¹, DONG Guotao², FAN Dong¹, LIU Qixing¹, JIA Peipei¹

(1. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2. Key Laboratory of the Loess Plateau Soil Erosion and Erosion Water Loss Process and Control, Institute of Hydraulic Research, Yellow River Water Conservancy Commission, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Based on the advantages of microwave data all day long, all-weather, and not affected by cloud, AMSR2 microwave data from July 2012 to December 2016 in 10, 18, 36.5 GHz horizontal and vertical polarization brightness temperature data inversion of microwave penetration index MVI, microwave polarization difference index MPDI₁₈ and MPDI_{36.5} were used to build microwave vegetation index, and microwave drought indexes (TMVDI, TMPVDI₁₈ and TMPVDI_{36.5}) with the optical surface temperature, and the optical drought index TVDI was compared to microwave vegetation index and microwave drought indexes. The applicability of microwave drought index in drought monitoring in the Yellow River basin was analyzed. The results showed that the microwave drought index change tendency was consistent with optical drought index; microwave drought index had the good applicability to drought monitoring in the Yellow River Basin; microwave drought index inversion was better than optical drought index in most areas; analysis on correlation between optical and microwave drought indexes and rainfall also showed that the correlation between microwave drought index and rainfall was overall better than the correlation between optical drought index and rainfall, good correlation between microwave drought index and rainfall was found in the southern area of the Yellow River Basin.

Keywords: AMSR2 microwave, vegetation index, drought index, applicability

干旱是世界范围内普遍存在的自然现象, 干旱的频繁发生, 严重影响了生态平衡及经济发展, 因此研

究干旱的时空变化规律, 对干旱灾害的认识及预防有重要意义。干旱监测一直以来都是科学界的难题, 传

收稿日期: 2018-12-08

修回日期: 2018-12-23

资助项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402400); 国家自然科学基金(51779099, 41301496); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2017-10); 河南省科技攻关项目(172102110268)

第一作者: 周俊利(1993—), 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 研究方向为 3S 技术理论与应用。E-mail: lariely@163.com

通信作者: 董国涛(1982—), 男, 山东青州人, 博士, 高级工程师, 主要从事水文水资源遥感方面研究。E-mail: dongguotao@hky.yrcc.gov.cn

统的监测方法需要投入大量的人力物力,且获得的数据信息范围较小,难以反映大范围的干旱情况。基于卫星遥感的干旱监测具有覆盖范围广、空间分辨率高、数据获取方便快捷等优点,已经成为干旱监测领域很有潜力的一个方向^[1]。孙秀邦等^[2]基于植被叶片在干旱情况下气孔关闭,表面温度升高,叶面积指数降低的规律,利用植被指数 NDVI 与地表温度 LST 反演出供水植被指数 WSVI(Water Supply Vegetation Index),该指数在干旱监测中起到了一定的监测作用。Price 等^[3]在 MODIS 地表温度数据 LST 与归一化植被指数 NDVI 构建特征空间的基础上,提出了温度植被旱情指数(temperature vegetation dryness index TVDI),该指数在监测地表干旱方面是一个重要的指数,已广泛应用到干旱监测之中^[4-8]。

目前运用较成熟的干旱监测指数大多基于归一化植被指数 NDVI 与地表温度 LST 数据,由于归一化植被指数 NDVI 在高纬度地区容易饱和^[9],年时过程的季节性不明显^[10],而且地表温度 LST 易受天气情况影响(如云层、雾霾)从而反演出的旱情监测指数有较大的误差,不能准确得出相应地区的干旱情况。另外,基于光学遥感的植被指数大多只能探测植被表面,在反应植被生长信息方面有一定的惰性。

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^[11]。同时微波数据的数据量低,数据处理较简单,更适用于大范围、长时序的植被实时监测^[12]。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^[13]。搭载着第二代先进微波辐射成像仪(AMSR2)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^[14]。AMSR2 具有 14 个亮温观测通道,分布于 7 个不同的中心频率:6.9,7.3,10.6,18.7,23.8,36.5,89 GHz^[15]。与之前的 AMSR-E 相比,AMSR2 增加了 7.3 GHz 的两个通道,目的是在观测时避免无线电频率的干扰^[16-18]。利用微波亮温数据反演得出的微波植被指数在全国植被区与光学植被指数 NDVI 均具有良好的相关性^[19-22]。目前较常用的微波植被指数主要有 MPDT,MPDI,MVI 这 3 种^[23],尤其是微波穿透指数 MVI、微波极化差异指数 MPDI 与光学植被指数 NDVI 具有相关性的像元个数最多^[24]。微波植被指数已被应用到部分地区的干旱监测中去。王永前

等^[25]采用第一代微波辐射成像仪 AMSRE 反演出微波穿透指数 MVI,构建微波旱情指数 TMVDI,并与光学旱情指数 TVDI 进行对比分析,结果显示基于微波的旱情指数更加适于旱情监测。

本文以黄河流域为研究区,基于 2012 年 7 月—2016 年 12 月期间的 MODIS 植被指数产品与 AMSR2 垂直水平极化亮温数据,计算微波穿透指数 MVI 与微波极化差异指数 MPDI₁₈,MPDI_{36.5},并与 MODIS 地表温度产品构建特征空间,分别反演出微波旱情指数 TMVDI,TMPVDI₁₈,TMPVDI_{36.5};在此基础上利用趋势分析法分析各旱情指数在黄河流域内干旱变化情况及趋势,以及降雨因素对干旱指数的影响。

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;中部地区海拔为 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旱情差异较大,不仅在时间上旱情变化显著,在不同地区旱情分布也大不相同。

1.2 数据与处理

1.2.1 数据来源

(1) 光学数据产品选取搭载在 TARRA 卫星上的中分辨率成像光谱仪 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS)提供的地表温度产品 MOD11A2 与植被指数产品 MOD13A3。MOD11A2 地表温度产品空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 8 d,采用最大值合成法(MVC)合成为月地表温度产品,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 km×1 km,算法吸收全部 16 d 覆盖全月的产品,采用时间加权平均值法计算得来。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—2016 年 12

月植被指数数据集。

(2) 微波数据采用的 AMSR2 数据为 10 km 分辨率的水平垂直极化亮温数据,时间序列为 2012 年 7 月—2016 年 12 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。对 AMSR2 亮温数据进行投影转换、波段计算、裁剪等预处理,采用最小值合成法来消除背景值的影响,计算出每月各频率水平垂直极化亮温数据。

(3) 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 个气象站点逐月降雨,利用反距离权重法插值为黄河流域降雨栅格数据。

1.2.2 数据处理原理

(1) 温度植被旱情指数。研究表明:植被指数与地表温度之间存在负相关关系,且植被指数与地表温度散点图呈现三角形的关系^[26-28],Sandholt 等^[28]基于植被指数与地表温度的这种关系建立了温度植被旱情指数(TVDI),公式如下:

$$TVDI = \frac{T_s - T_{smin}}{T_{smax} - T_{smin}} \quad (1)$$

式中: T_{smin} 是指研究区内某一时期的同一 NDVI 值所对应的最低地表温度值,即湿边;而 T_{smax} 是指该 NDVI 值在相同时间所对应的最高地表温度值,与其对应的是干边。 T_s 为研究区内任意像元地表温度值。将 T_s —NDVI 特征空间(即植被指数与地表温度构成的二维散点图)简化为三角形,同时将 T_{smin} , T_{smax} 与 NDVI 进行线性拟合,拟合结果公式如下:

$$T_{smax} = a_1 + b_1 \times NDVI \quad (2)$$

$$T_{smin} = a_2 + b_2 \times NDVI \quad (3)$$

式中: a_1 , b_1 是湿边拟合方程的系数; a_2 , b_2 是干边拟合方程的系数。

(2) 微波植被指数。微波穿透指数 MVI 与微波极化差异指数 MPDI 计算方法如公式(4), (5)所示:利用以下两公式计算出植被穿透指数 MVI、微波极化差异指数 MPDI。

$$MVI = \frac{T_{Bv}(f_1)T_{Bh}(f_1)}{T_{Bv}(f_2)T_{Bh}(f_2)} \quad (4)$$

$$MPDI = \frac{T_{Bv}(f_1) - T_{Bh}(f_1)}{T_{Bv}(f_1) + T_{Bh}(f_1)} \quad (5)$$

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

2 分析方法

2.1 旱情指数趋势分析

不同旱情指数数据集在时空上的变化趋势有所不同,本文采用趋势分析法分析各旱情指数在黄河流域内变化情况及趋势。

趋势分析法:

$$Slope = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{i})(x_i\bar{x})}{\sum_{i=1}^n (\bar{i})^2} \quad (6)$$

式中: n 为研究时段长度(本研究中为 2012 年 7 月—2016 年 12 月); i 为数据标识; \bar{i} 为标识数据均值; x 为第 i 年的旱情指数值; \bar{x} 为旱情指数多年平均值。当 Slope 值大于 0 时,表明研究时段内旱情指数呈增长趋势,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。

2.2 旱情影响因素分析

本文采用相关分析法分析各旱情指数与气象站点实测降雨数据间的相关关系。黄河流域幅员辽阔,不同地区地貌、气候差异较大,对全流域旱情指数与降雨数据进行整体显著性分析,不能准确地反映出流域内旱情指数与降雨数据的显著性。本文基于黄河流域区域地貌、气候特征,将黄河流域划分为源区、河潼区间、河龙区、北洛河、汾河、泾河、渭河 7 个区域,其中河潼区间为中游较大区域,包括河龙区、渭河、汾河、北洛河。分区统计旱情指数与降雨数据的显著性,从而消除因不同地区地貌、气候等差异引起的误差。计算方法为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i\bar{x})(y_i\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i\bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i\bar{y})^2}} \quad (7)$$

式中: y_i 为降雨数据,数据均值为 \bar{y} ; x_i 为光学、微波旱情指数的值,数据集均值为 \bar{x} ; i 为像元标识; n 为时间序列内栅格数据对个数。相关系数 R 表示两数据间的相关及一致性程度, R 绝对值越接近于 1,表明两数据集之间相关性越高。

3 结果与分析

3.1 旱情指数时空变化分析

3.1.1 旱情指数长时序变化分析 光学旱情指数 TVDI 与微波旱情指数 TMVDI, TMPVDI₁₈, TMPVDI_{36.5} 长时间序列均值变化如图 1 所示:整体来说光学旱情指数与微波旱情指数变化周期相同,光学旱情指数与微波旱情指数数值值域相近,且变化范围也大致相同,然而光学旱情指数 TVDI 值整体略

大于微波旱情指数值。各旱情指数在 2012 年 7 月—2014 年 8 月时段、2016 年全年时段数值变化周期稳定, 振幅明显; 而 2014 年 9 月—2015 年 12 月, 各旱情指数周期变化紊乱, 波峰波谷不明显, 光学与微波旱情指数皆在 0.65 上下波动。

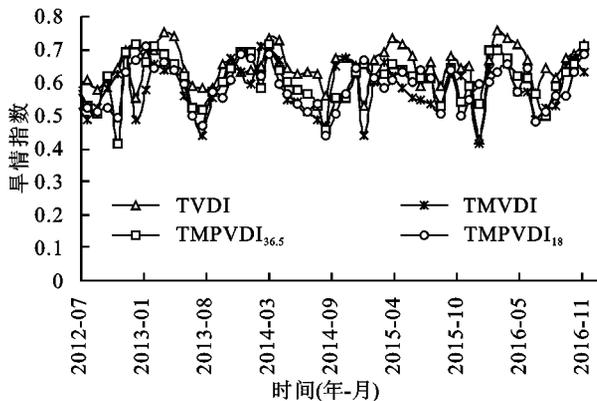


图 1 不同旱情指数变化时序

旱情指数的变化与光学、微波植被指数的变化有密切关系, 各旱情指数均能反映出由植被指数变化引起的变化波动。微波旱情指数整体变化趋势与光学旱情指数变化趋势大致相同, 各旱情指数值变化波动一致。相同时段内光学与微波植被指数的变化周期及波动也相同。不同时段植被指数与旱情指数也有较明显的变化关系, 2014 年、2015 年黄河流域光学、微波植被指数变化均存在异常变化, 其中 2014 年 7 月、8 月份达到植被指数的多年最大值, 2015 年后回落, 各旱情指数在相同时段内也随之变化, 如 2014 年、2015

年光学与微波旱情指数变化趋势较平缓、变化周期不明显, 波峰较小, 波谷较大。

3.1.2 旱情指数空间变化趋势分析 如图 2 所示, 各旱情指数斜率变化空间分布大致相同, 其中上游黄河源区旱情指数变化斜率均为正值, 且斜率值较大, 玛曲水文站以上至黄河源头区域变化斜率达到最大。中游地区葫芦河区域、清水河上游、泾河上游及马莲河区域旱情指数变化斜率较大, 渭河流域中游部分区域旱情指数变化斜率与周围地区变化斜率呈明显不同, 该区域旱情指数斜率变化整体为正值, 部分区域斜率达到 0.003 以上, 而周围地区旱情指数变化斜率均为负值或 0~0.001 范围内, 中游地区包头、鄂尔多斯、呼和浩特市区域旱情指数变化斜率数值也较大。中游毛乌素沙漠地区旱情指数变化斜率较小, 大部分为负值, 除此之外, 湟水流域、汾河流域及伊洛河流域旱情指数变化斜率也为负值。

黄河流域旱情指数变化斜率空间分布差异较大, 其中上游黄河源区多为高寒草甸, 植被生长分布情况较好, 水源丰富, 旱情指数多呈现稳定不变。中游旱情指数变化的因素多为植被生长的影响, 内流区毛乌素沙漠地区干旱少水, 植被分布较差, 变化斜率多为零值或负值。旱情指数变化斜率较大的区域集中在河套平原包头、鄂尔多斯、呼和浩特等地区。渭河中下游宝鸡、西安、渭南地区旱情指数变化斜率呈两极化分布, 变化原因与当地经济发展及城市扩张等经济因素相关。

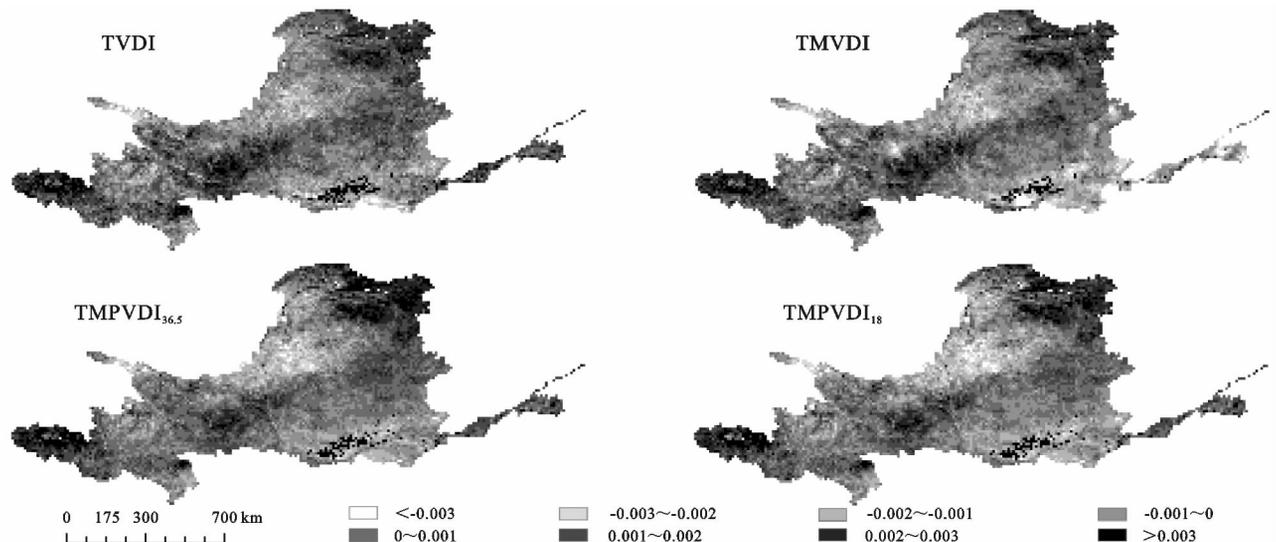


图 2 旱情指数变化斜率空间分布

3.2 旱情指数—降雨相关性分析

3.2.1 旱情指数—降雨显著性检验 黄河流域降雨数据与旱情指数数据进行逐像元显著性分析结果如表 1 所示: 光学、微波旱情指数与降雨数据的区域均值相关性符合理论值, 即呈负相关关系。然而河龙区

旱情指数与降雨的相关系数数值均较小, 微波旱情指数与降雨数据的相关系数均为负值, 而光学旱情指数与降雨数据的相关系数为正值, 相关系数为 0.084。

黄河源区各旱情指数与降雨数据均达到了极其显著水平, 即显著性小于 0.01; 河潼区间作为最大的分区

区域,各旱情指数与降雨也通过了显著性检验,其中微波旱情指数与降雨数据达到了极其显著水平;河龙区光学旱情指数与降雨数据显著相关,即显著性小于 0.05,

河龙区各微波植被指数与降雨数据为极其显著相关,即显著性小于 0.01;北洛河、汾河、泾河、渭河区域各旱情指数与降雨数据的显著性达到了极其显著水平。

表 1 旱情指数与降雨数据分区显著性分析

分区	TVDI—RAIN	TMVDI—RAIN	TMPVDI _{36.5} —RAIN	TMPVDI ₁₈ —RAIN
黄河源区	-0.773**	-0.846**	-0.805**	-0.795**
河潼区间	-0.148*	-0.456**	-0.510**	-0.549**
河龙区	0.084*	-0.09*	-0.075*	-0.082*
北洛河	-0.228**	-0.547**	-0.58**	-0.624**
汾河	-0.252**	-0.546**	-0.544**	-0.597**
泾河	-0.410**	-0.587**	-0.613**	-0.628**
渭河	-0.609**	-0.703**	-0.712**	-0.714**

注:* 为显著性小于 0.05; ** 为显著性小于 0.01。

3.2.2 旱情指数—降雨相关性分析 旱情指数与降雨的逐像元相关分析如图 3 所示:整体来说,旱情指数与降雨数据主要为负相关关系,其中光学旱情指数 TVDI 与降雨数据的相关系数整体高于微波旱情指数 TMVDI, TMPVDI_{36.5}, TMPVDI₁₈, 光学旱情指数负相关区域少于微波旱情指数,如黄河源区等;微波旱情指数与降雨数据的相关系数空间分布整体较好,如渭河、泾河、北洛河、汾河、伊洛河流域等。

降雨与旱情指数的相关关系理论上来说应呈负相关关系,然而由于地区纬度高低、旱情影响因素(植被、降雨)等影响,在不同地区呈现不同的相关性。黄河流域光学、微波旱情指数与降雨的空间相关分布图显示:光学、微波旱情指数与降雨像元相关系数呈现北高南低的趋势,其中无定河流域与苦水河流

域北部边界为大致分界线,北部相关系数多为正值且相关系数整体较小,如河套平原、毛乌素沙漠、内流区等地;南部地区相关系数多为负值,如黄河源区、泾河、渭河、北洛河、汾河等流域,且相关系数大多集中在(-0.8, -0.4)范围内,即黄河流域南部地区旱情指数与降雨的相关性与理论上较吻合。光学旱情指数—降雨的相关系数像元数值整体较大,且正值区域较多,其原因与光学传感器有关,光学植被指数在较高纬度地区容易饱和且在植被指数较差的时段与区域易出现植被指数与现实不吻合。微波不受云层等影响,穿透性强,对地面地物实际的反射光谱捕捉较准确,反演出的植被指数能更准确地反映实时生长情况,微波植被指数与降雨的相关性也更能接近理论值。

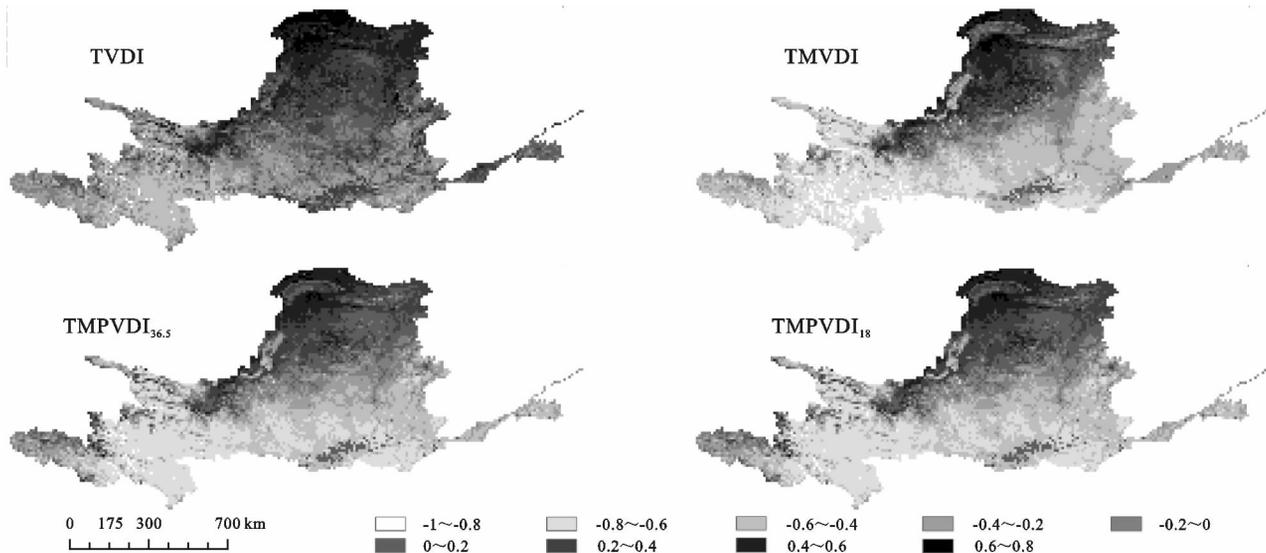


图 3 降雨与旱情指数相关分析空间分布

旱情指数与降雨相关分析像元个数统计如表 2 所示:流域内旱情指数与降雨相关系数主要呈负相关关系,各旱情指数与降雨数据负相关关系区域主要集中在显著性小于 0.05 的区域,如黄河源区、渭河、泾河、汾河流域等,负相关系数集中在(-1, 0),

(-0.8, -0.4)范围内负相关像元个数较多,且负相关区域占全流域面积 65%以上;旱情指数与降雨的正相关区域较少,主要集中在(0, 0.4),正相关系数在 0.4 以上的像元较少,占全流域面积的不到 10%,正相关性较低。

表 2 旱情指数—降雨数据相关系数像元统计

R	RAIN—TVDI	RAIN—TMVDI	RAIN—TMPVDI _{36.5}	RAIN—TMPVDI ₁₈	%
(-1, -0.8)	0.46	3.08	0.82	0.50	
(-0.8, -0.6)	10.39	19.51	23.11	23.33	
(-0.6, -0.4)	18.11	26.56	22.18	23.38	
(-0.4, -0.2)	18.16	13.54	12.77	11.99	
(-0.2, 0)	18.22	8.42	10.19	9.96	
(0, 0.2)	18.78	10.05	13.47	13.16	
(0.2, 0.4)	12.50	10.11	11.41	11.66	
(0.4, 0.6)	3.36	7.61	5.60	5.61	
(0.6, 0.8)	0.01	1.12	0.44	0.42	

4 结论与展望

4.1 结论

(1) 基于微波穿透指数 MVI、微波极化差异指数 MPDI₁₈, MPDI_{36.5} 反演的微波旱情指数 TMVDI, TMPVDI_{36.5}, TMPVDI₁₈ 在黄河流域干旱监测中具有很好的适用性, 旱情变化趋势监测效果与光学旱情指数大致相同。(2) 各微波旱情指数像元变化斜率与光学旱情指数像元变化斜率空间分布趋势大致相同, 微波旱情指数变化斜率的反应更明显。(3) 光学与微波旱情指数像元时空分布规律及大小均有明确的规律性。在黄河流域大部分区域微波旱情指数与降雨均具有良好的相关性, 且微波旱情指数与降雨的相关性在黄河流域南部更加接近理论值, 在相关性较差的黄河流域北部, 微波旱情指数在旱情与降雨的相关分析中也较光学旱情指数好。

4.2 展望

微波植被指数在旱情监测中还具有一定的缺陷, 首先, 旱情指数反演因子—地表温度数据为光学数据, 光学数据易受天气等影响, 局限性较大, 且微波数据尚未有地表温度数据产品发布, 若全部采用微波数据反演旱情指数, 在旱情监测中相信会有明显的提升。然而微波数据的空间分辨率较粗, 均为 10 km 以上, 尚不能进行小范围内旱情指数的反演及监测, 找寻一种合适的降尺度方法对微波旱情指数进行降尺度, 这在旱情指数的监测及运用中是亟待解决的。

参考文献:

[1] 李喆, 谭德宝, 秦其明, 等. 基于特征空间的遥感干旱监测方法综述[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(1): 37-41.
 [2] 孙秀邦, 王伟宏, 严平, 等. 安徽长江以南农业干旱遥感监测研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(3): 305-309.
 [3] 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.
 [4] 徐霞. 基于 TVDI 指数的农业干旱遥感监测应用研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2009.

[5] 齐述华, 王长耀, 牛铮. 利用温度植被旱情指数(TVDI)进行全国旱情监测研究[J]. 遥感学报, 2003, 7(5): 420-427.
 [6] 陈斌, 张学霞, 华开, 等. 温度植被干旱指数(TVDI)在草原干旱监测中的应用研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(5): 930-937.
 [7] 吴孟泉, 崔伟宏, 李景刚. 温度植被干旱指数(TVDI)在复杂山区干旱监测的应用研究[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 30-35.
 [8] 沙莎, 郭妮, 李耀辉, 等. 我国温度植被旱情指数 TVDI 的应用现状及问题简述[J]. 干旱气象, 2014, 32(1): 128-134.
 [9] 米兆荣, 张耀生, 赵新全, 等. NDVI 和 EVI 在高寒草地牧草鲜质量估算和植被动态监测中的比较[J]. 草业科学, 2010, 27(6): 13-19.
 [10] 王正兴, 刘闯, 陈文波, 等. MODIS 增强型植被指数 EVI 与 NDVI 初步比较[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 31(5): 407-410.
 [11] 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(1): 13-16.
 [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] 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.
 [14] 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.
 [15] Kawanishi T, Sezai T, Ito Y, et al. The advanced microwave scanning radiometer for the earth observing system (AMSR-E), NASDA's contribution to the EOS for global energy and water cycle studies[J]. Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on, 2003, 41(2): 184-194.
 [16] 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]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2003, 42(2): 380-390.

- [20] 周婷,彭少麟,任文韬. 东江河岸带各区段景观格局对水体恢复的影响[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2009,48(4):78-83.
- [21] Griffith J A, Martinko E A, Whistler J L, et al. Preliminary comparison of landscape pattern-normalized difference vegetation index (NDVI) relationships to Central Plains stream conditions[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002,31(3):846-859.
- [22] 彭建,王仰麟,张源,等. 土地利用分类对景观格局指数的影响[J]. 地理学报, 2006,61(2):157-168.
- [23] 陈晓宏,王兆礼. 东江流域土地利用变化对水资源的影响[J]. 北京师范大学学报:自然科学版, 2010,46(3):311-316.
- [24] Braak C J F T, Šmilauer P. CANOCO Reference Manual and User's Guide to Canoco for Windows(version 4.5) [M]. New York: Centre for Biometry Wageningen, 2002.
- [25] 董旭辉,羊向东,刘恩峰,等. 冗余分析(RDA)在简化湖泊沉积指标体系中的应用:以太白湖为例[J]. 地理研究, 2007,26(3):477-484.
- [26] 邬建国. 景观生态学:格局、过程、尺度与等级 [M]. 2版. 北京:高等教育出版社, 2007.
- [27] Moser D, Zechmeister H G, Plutzer C, et al. Landscape patch shape complexity as an effective measure for plant species richness in rural landscapes[J]. *Landscape Ecology*, 2002,17(7):657-669.
- [28] Sliva L, Williams D D. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality[J]. *Water Research*, 2001,35(14):3462-3472.
- [29] Li S, Gu S, Liu W, et al. Water quality in relation to land use and land cover in the upper Han River Basin, China[J]. *Catena*, 2008,75(2):216-222.
- [30] Fedorko E J, Jr P R, Aldrich S P, et al. Spatial distribution of land type in regression models of pollutant loading[J]. *Biol Bull*, 2004,5(20):173.
- [31] Galbraith L M, Burns C W. Linking land-use, water body type and water quality in Southern New Zealand [J]. *Landscape Ecology*, 2007,22(2):231-241.
- [32] Wu J. Key concepts and research topics in landscape ecology revisited: 30 years after the Allerton Park workshop[J]. *Landscape Ecology*, 2013,28(1):1-11.

~~~~~

(上接第382页)

- [17] 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.
- [18] Kidd C. Radio frequency interference at passive microwave earth observation frequencies[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006,27(18):3853-3865.
- [19] Shi J, Jackson T, Tao J, et al. Microwave vegetation indexes derived from satellite microwave radiometers [C] // *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2007. Barcelona, Spain: IEEE, 2008.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 王永前,施建成,刘志红,等. 微波植被指数在干旱监测中的应用[J]. 遥感学报, 2014,18(4):843-867.
- [26] 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.
- [27] Carlson T. An overview of the "triangle method" for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery[J]. *Sensors*, 2007,7(8):1612-1629.
- [28] 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.