

归一化水体指数用于河南省 干旱监测适用性分析

谷佳贺^{1,2}, 薛华柱¹, 董国涛², 程结海¹

(1.河南理工大学测绘与国土信息学院,河南 焦作 454003;2.黑河水资源与生态保护研究中心,甘肃 兰州 730030)

摘要:利用 30 m 分辨率的归一化植被指数(NDVI)图像信息熵对河南省气象站周边地表异质性进行分析,选取观测站周围地表较为均匀的站点实测土壤水分数据,通过计算归一化水体指数(NDWI)与实测土壤水分之间的相关系数,分析比较 NDWI 用于干旱监测的适用性。研究表明:信息熵方法可有效地对土壤水分观测数据进行筛选;在时间序列上,各站点实测值与 NDWI 具有负相关关系,在增强型植被指数 $EVI>0.4$ 时相关性更高,说明在植被覆盖高的区域 NDWI 对土壤水分的反演更为敏感;空间上,根据地形将河南省分为北部、中部、南部和西部 4 个区域并选取第 121、201、313 天的土壤水分数据来分析与 NDWI 之间的相关性,在地形较为平坦的中北部地区 NDWI 与土壤水分之间负相关性最稳定且相关系数较高。根据 NDWI 空间分布可知,2014 年河南省大部分地区均遭受了干旱,且干旱地区大部分位于平原,特别是北方地区受灾严重。总体来说,NDWI 用于平原地区对作物进行干旱监测精度较高,并可预测干旱发展趋势及程度。

关键词:归一化水体指数;土壤水分;干旱监测;信息熵

中图分类号:S127;S423 **文献标志码:**A

Applicability analysis of NDWI for drought monitoring in Henan Province

GU Jiahe^{1,2}, XUE Huazhu¹, Dong guotao², CHENG Jiehai¹

(1.School of Surveying and Land Information, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China;

2.Heihe Water Resources and Ecological Protection Research Center, Lanzhou, Gansu 730030, China)

Abstract: This paper analyzed the heterogeneity of places near weather stations by means of the entropy of 30 m NDVI images in Henan Province. Homogenous land cover sites were selected to calculate the correlation index between NDWI and measured soil moisture data, thus to demonstrate the applicability of NDWI in drought monitoring. The results show that information entropy method can effectively screen soil moisture observation data; In time series, the measured soil moisture has a negative correlation with NDWI, and the correlation is higher when $EVI>0.4$. This demonstrates that high vegetation cover zones are more sensitive to the retrieval of soil moisture; According to the topography, Henan Province is divided into four regions of northern, central, southern and western regions. Day 121, day 201 and day 313 are selected to analyze the correlation between soil moisture and NDWI. The negative correlation between NDWI and soil moisture was the most stable and the correlation coefficient was high in the north-central region where the terrain was relatively flat; According to the spatial distribution of NDWI, most areas of Henan Province suffered from drought in 2014 and most of the arid areas were located in the plain, especially in the north. In general, NDWI can be used to monitor crop drought in plain area and estimate drought trends and level.

Keywords: normalized difference water index (NDWI); soil moisture; drought monitoring; information entropy

收稿日期:2020-04-06 修回日期:2020-10-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51779099);省部级项目“黄河中游水土流失区林草植被发展趋势及对来水来沙和环境的影响”专项研究(CYRF2018002);河南省科技攻关项目(172102110268)

作者简介:谷佳贺(1996-),男,河北保定人,硕士研究生,研究方向为水文遥感。E-mail:211804020001@home.hpu.edu.cn

通信作者:薛华柱(1977-),男,安徽肥东人,博士,副教授,主要从事地表参数定量遥感反演研究。E-mail:xhz@hpu.edu.cn

干旱是一种发展缓慢的自然灾害,是我国乃至世界上许多国家主要的自然灾害之一,对生态系统和社会经济以及居民生活造成严重的影响^[1]。在全球变暖的背景下,干旱有加剧态势,因此干旱监测也成为全球关注的重点问题^[2-3]。卫星遥感具有覆盖范围广、持续时间长等特点^[4],是近些年来较有效的技术手段之一^[5],可用于监测大范围的土壤湿度和植被生长状况^[6]。MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer) 数据具有高时间分辨率、高光谱分辨率、适中空间分辨率的特点^[7],近年来在旱情监测中得到了广泛的应用^[8]。

国内外学者利用 MODIS 数据构建了不同的指数对干旱进行监测,彭擎等^[9]采用 MODIS 归一化植被指数 (NDVI) 和地表温度 (LST) 数据分析了新疆 2000—2015 年生长季 3 个阶段 NDVI 与 LST 的时空变化特征及相关关系; Seo-Yeon Park 等^[10]利用 MODIS 地表温度 (LST)、植被健康指数 (VHI)、蒸散发以及降水数据应用于干旱监测并评估了其适用性,确定了不同时间尺度标准化降水指数 (SPI) 与干旱指数之间的相关性,可间接应用于农业或水文干旱监测; 刘英等^[11]以 MODIS NDVI 和 LST 数据构建了温度植被干旱指数 (TVDI) 模型并分析了 2000—2016 年间陕西省旱情时空分布特征和规律。Zhang 等^[12]根据我国 2000—2014 年的 MOD13A3 NDVI 和 MOD16A2 ET/PET 数据集,计算了干旱严重程度指数 (DSI) 并将其用于农业干旱监测,为 DSI 在中国乃至世界其他地区农业监测中的应用提供了理论基础; 刘一哲等^[13]采用模糊数学法建立了基于 MODIS TVDI 的干旱等级划分标准,实现对藏北地区春夏旱情的动态连续监测并分析旱情的时空变化特征。Khan 等^[14]利用 MODIS NDVI 与 LST 数据计算得到植被温度条件指数 (VTCI) 并采用地理空间近实时耦合 (NRTC) 方法对巴基斯坦 Punjab 平原干旱进行了研究。杨波等^[15]利用 MODIS 增强植被状态指数 (EVCi) 和温度状态指数 (TCI) 建立了干旱状态指数 (DCI),将该指数应用于湖南省农作物的旱情监测并得到了旱情等级的空间分布图。

NDVI 在进行干旱监测时得到了较为广泛的应用,但 NDVI 在监测干旱时不能及时反映土壤水分含量,只有当水分胁迫十分严重进而阻碍了作物生长时才会引起 NDVI 值的显著变化,这表明 NDVI 对重旱有较好的反映^[16],因此 NDVI 对土壤水分的反映以及应用于干旱监测具有一定的滞后性^[17-18]。有研究表明,在高纬度、高海拔地区,尤其是作物生长的前期和后期,基于 NDVI-LST 特征空间的 TVDI

模型可能并不适用^[19]。归一化水体指数 (NDWI) 一般用于识别水体目标,NDWI 对植被冠层含水率比 NDVI 更为敏感,在短期干旱监测中,NDWI 能及时地反映旱情的时空变化^[20]。

河南省是我国的农业大省,粮食年产量占全国总产量的 10% 左右,是我国粮食重要生产地区^[21]。近年来,在全球变暖的背景下,该地区的干旱灾害日益严重,对粮食生产构成巨大威胁,干旱问题研究亟待加强^[22]。准确监测干旱的发生时间、发展程度和影响范围,对保障社会经济发展、促进生态环境恢复、维持区域和谐稳定具有重要意义。2014 年河南省大部分地区遭受百年不遇的大旱,因此本文选取 2014 年 MODIS 观测数据从时间和空间尺度上分别分析 NDWI 与实测土壤相对湿度之间的相关性,根据相关系数来评价 NDWI 用于河南省干旱监测的适用性。

1 研究区概况

河南省位于我国中东部、黄河下游,地处北纬 31°23'~36°22',东经 110°21'~116°39'之间,总面积达 16.7 万 km²。河南省地势西高东低,由平原、盆地、山地、丘陵等构成,具有独特的地理位置和复杂的地貌特征。大部分地区气候处于暖温带,南部跨亚热带,属于大陆性季风气候。在北亚热带向暖温带气候过渡、自东向西由平原向丘陵山地气候过渡过程中,受季风型气候的影响,降雨分布不均匀^[23],具有四季分明、雨热同期、复杂多样和旱涝灾害频繁的特点。全省由北向南平均气温为 12.1~15.7℃,年均降水量 532.5~1 380.6 mm,降雨以 6—8 月份为主^[24]。河南省主要土地利用类型以耕地为主。

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

2.1.1 遥感数据来源及预处理 本文使用的 MODIS 数据来源于美国国家航天局 NASA 网站 LAADS DAAC 数据中心 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>), 时间为 2014 年, 编号为 H27V05。MOD09A1、MYD09A1 反射率产品提供了波段 1-7 的 500 m 分辨率 8 d 合成的反射率数据, MOD13A1、MYD13A1 数据为 16 d 合成的 500 m 空间分辨率植被指数产品。其中, MOD 为 Terra 卫星产品, 数据获取时间约为地方时上午 10:30, MYD 为 Aqua 卫星产品, 数据获取时间约为地方时 13:30。由于同一天 Terra 和 Aqua 两颗卫星过境时间不一样, 可在 MOD 产品出现缺失值时利用 MYD 产品对其进行填

补生成较为连续的数据集。以上 MODIS 数据利用 MRT 处理工具对其进行波段提取、投影及格式转换。

Landsat8 OLI 数据来源于美国地质调查局 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), 其可见光波段数据分辨率为 30 m。本研究选取 2013—2015 年植被生长季(6—9 月), 条代号为(122-126, 35-38)共 12 景数据, 生成河南省 30 m 分辨率的 NDVI 分布图, 用于分析观测站点周围地表的异质性。

2.1.2 测站土壤水分数据 土壤相对湿度数据来源于河南省气象局, 监测深度为 10、20、30、40 cm 和 50 cm, 共有 162 个土壤墒情监测站数据。选取 2014 年每天的实测土壤相对湿度数据, 剔除缺测土壤层的数据点和有明显异常的数据点剩余 148 个站点(图 1), 根据 MODIS 产品时间尺度将其以 8 d 进行平均, 用于验证 NDWI 的干旱监测精度。

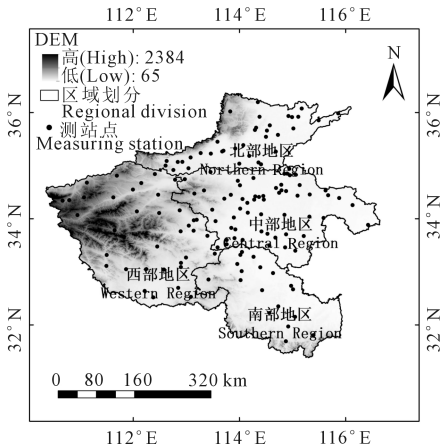


图1 河南省气象站分布图

Fig.1 Distribution map of weather stations in Henan Province

2.2 植被指数计算及预处理

2.2.1 归一化水体指数 归一化水体指数(normalized difference water index, NDWI)是基于近红外波段与绿波段建立的归一化比值指数^[25], 在利用遥感影像提取水体方面应用十分广泛。计算公式如下:

$$NDWI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}} \tag{1}$$

式中, ρ_{NIR} 、 ρ_{SWIR} 分别为近红外波段、短波红外波段的反射率。本研究利用 MODIS 第 2 波段和第 5 波段数据计算 NDWI。

2.2.2 增强型植被指数 增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)是目前应用比较广泛的植被指数, 它利用背景调节参数 L 和大气修正参数 C_1 、 C_2 同时减少背景和大气的作用, 对气溶

胶等残留做了进一步改正, 并具有消除土壤背景和大气影响的优势。其计算公式如下:

$$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + C_1 \rho_{RED} - C_2 \rho_{BLUE} + L} \tag{2}$$

式中, ρ_{BLUE} 和 ρ_{RED} 分别为蓝光和红光波段反射率, L 为土壤调节参数, C_1 和 C_2 为拟合系数。MODIS EVI 产品数据反演过程中, $L = 1$, $C_1 = 6$, $C_2 = 7.5$ 。EVI 时间序列季节性明显, 能够更好地反映高植被覆盖区的季节性变化特征, 并且很少有突降现象, 时间序列曲线较平滑^[26]。

2.3 研究方法

2.3.1 图像信息熵 信息熵常被用来作为一个系统信息含量的量化指标, 从而可以进一步用来作为系统方程优化的目标或者参数选择的判据。其计算公式如下:

$$H(X) = - \sum_{x \in X} P(x) \log P(x) \tag{3}$$

式中, $H(X)$ 是求得的信息熵的值; $P(x)$ 表示 x 在计算范围内出现的概率。由信息熵的定义可知, 一个系统越有序, 信息熵就越低; 反之, 一个系统越混乱, 信息熵就越高^[27]。对于图像而言, 系统有序表示灰度值相同或相近, 反之表示灰度值相差较大。对 NDVI 图像灰度图而言, 若灰度值相同或相近, 可表明地物相同或相似, 灰度值不同则表明地物类型不同。

利用土壤水分实测数据对基于 MODIS 数据计算的 NDWI 用于农业干旱监测适用性进行验证时, 应选择像元范围内下垫面较为单一的站点数据。由于建筑物与植被的反射率不同, 通过 30m 分辨率 NDVI 影像很容易区分。本文利用 NDVI 图像信息熵方法对气象站点进行筛选, 以气象站所在像元为中心计算 33 * 33 窗口内图像的信息熵值, 根据熵值大小判断站点周围地表异质性。

2.3.2 时间序列谐波分析法 时间序列谐波分析法(harmonic analysis of time series, HANTS)用于对时间序列数据进行平滑, 它能够充分利用遥感影像的时间性和空间性, 将空间上的分布规律和时间上的变化规律联系起来。本文利用 ENVI 提供的 HANTS 工具对 EVI 进行了时间序列平滑, 该方法通过最小二乘法的迭代拟合去除时序 EVI 值中受云污染影响较大的点, 借助于傅立叶在时间域和频率域的正反变换实现曲线的分解和重构可生成较为平滑的 EVI 数据集。HANTS 方法充分考虑了植被生长周期性和数据本身的双重特点, 可真实反映植被的周期性变化规律, 平滑前后如图 2 所示。

2.3.3 相关性分析 本文通过计算气象站点的土壤湿度数据和 NDWI 的相关系数,评价 NDWI 在河南省的干旱监测能力。相关系数的取值范围在 $[-1,1]$ 之间,其绝对值越大表明相关程度越高,正(负)号代表两个变量之间呈正(负)相关性。干旱指数与土壤湿度之间的相关程度,用于表征某种干旱指数是否能够准确反映土壤的干湿状况^[28]。

3 结果与分析

3.1 观测站点异质性评价

本文采用 NDVI 图像信息熵方法分析了观测站点 1 km^2 范围内的地表异质性,利用 Google Earth 查看气象站周围环境并与信息熵计算结果进行对比,结果发现 NDVI 图像信息熵的大小与站点周围的均匀程度具有较好的一致性,表 1 为辉县等 6 个观测站点的 NDVI 图像信息熵,各站点对应周边如图 3 所示。

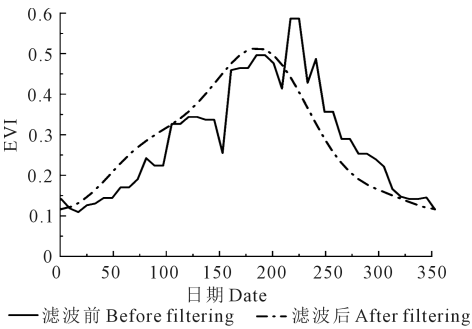


图 2 EVI 平滑前后对比图

Fig.2 EVI smoothing before and after comparison chart

3.2 NDWI 与土壤水、植被覆盖关系分析

在干旱发生时,大气相对湿度、气温与植被受水分胁迫相关。气温越高,大气相对湿度越小,则植被受水分胁迫也越严重。图 4 为 2014 年开封市大后庄站点土壤水分、NDWI 与 EVI 的变化趋势图。此站点位于开封市南部,地处中原腹地,地势平坦、土壤肥沃,适宜各类农作物种植,属温带季风气候,四季分明。由图 4 可知,NDWI 与土壤相对湿度的变化呈现明显的负相关性。EVI 随时间呈现波动性变化趋势,首次波峰出现在第 73 天,波谷出现在第 129 天,土壤水分在此区间变化状态总体上呈增长状态,波动情况比较明显,NDWI 的增长趋势则较为平缓。EVI 在第 193、257 天达到最大值和最小值,分别为 0.70、0.09。由于受降雨的影响,土壤水分的波动变化较大,但 NDWI 对其负相关性依旧不变。总体来说,NDWI 与土壤水分呈负相关性,在 EVI 值较大的情况下负相关性更加明显。

Table 1 Information entropy values of different stations			
站点 Station	坐标 Coordinate		信息熵 Information entropy
	经度 Longitude	纬度 Latitude	
辉县 Huixian	113.58	35.45	2.97
二郎 Erlang	114.02	33.32	3.63
留固 Liugu	114.72	35.58	3.95
新密 Xinmi	113.33	34.53	8.18
栾川 Luanchuan	111.65	33.78	8.38
太康 Taikang	114.85	34.07	8.67

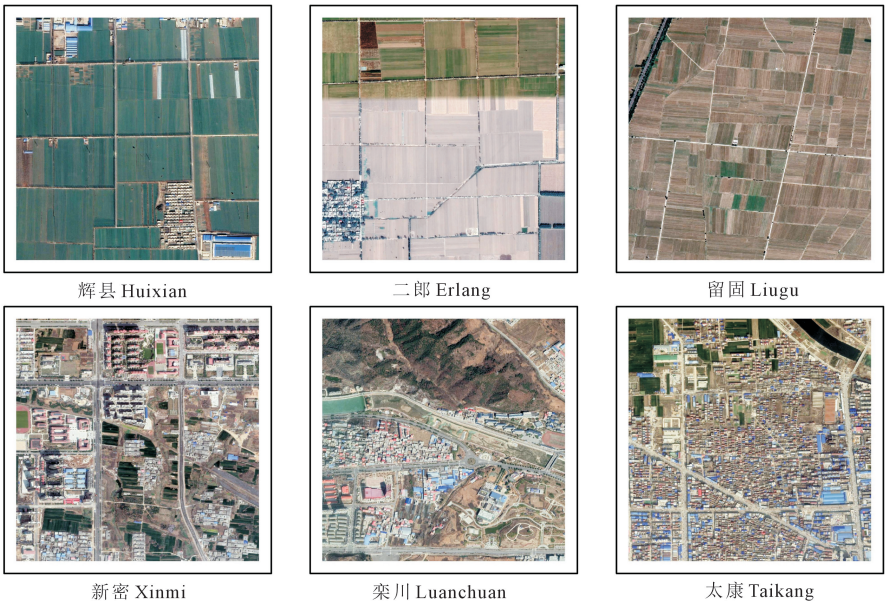


图 3 不同站点周围环境分布

Fig.3 Environmental distribution around different stations

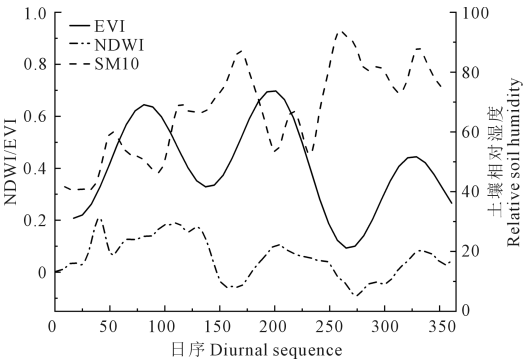


图4 大后庄站点 NDWI、SM10、EVI 年变化情况
Fig.4 Annual changes of NDWI, SM10 and EVI at Dahouzhuan station

3.3 时间序列相关性分析

为验证 NDWI 的干旱监测能力,选取地表异质性较小的站点,将 EVI 的阈值设为 0.4 并利用 NDWI 与土壤水分数据进行相关性分析(图 5)。大后庄、后李、留固、正阳、董天龙气象站点均匀分布在河南省平原区域,受地势起伏影响较小且植被长势较好,NDWI 与土壤相对湿度有较好的相关性,决定系数 R^2 均能达到 0.4 以上。在 $EVI>0.4$ 时,大后庄、后李和留固的 NDWI 与土壤相对湿度的相关性均大于 $EVI<0.4$ 的情况,正阳和董天龙站在两种状态下的相关性基本相同。社旗站点位于河南省西南部南阳

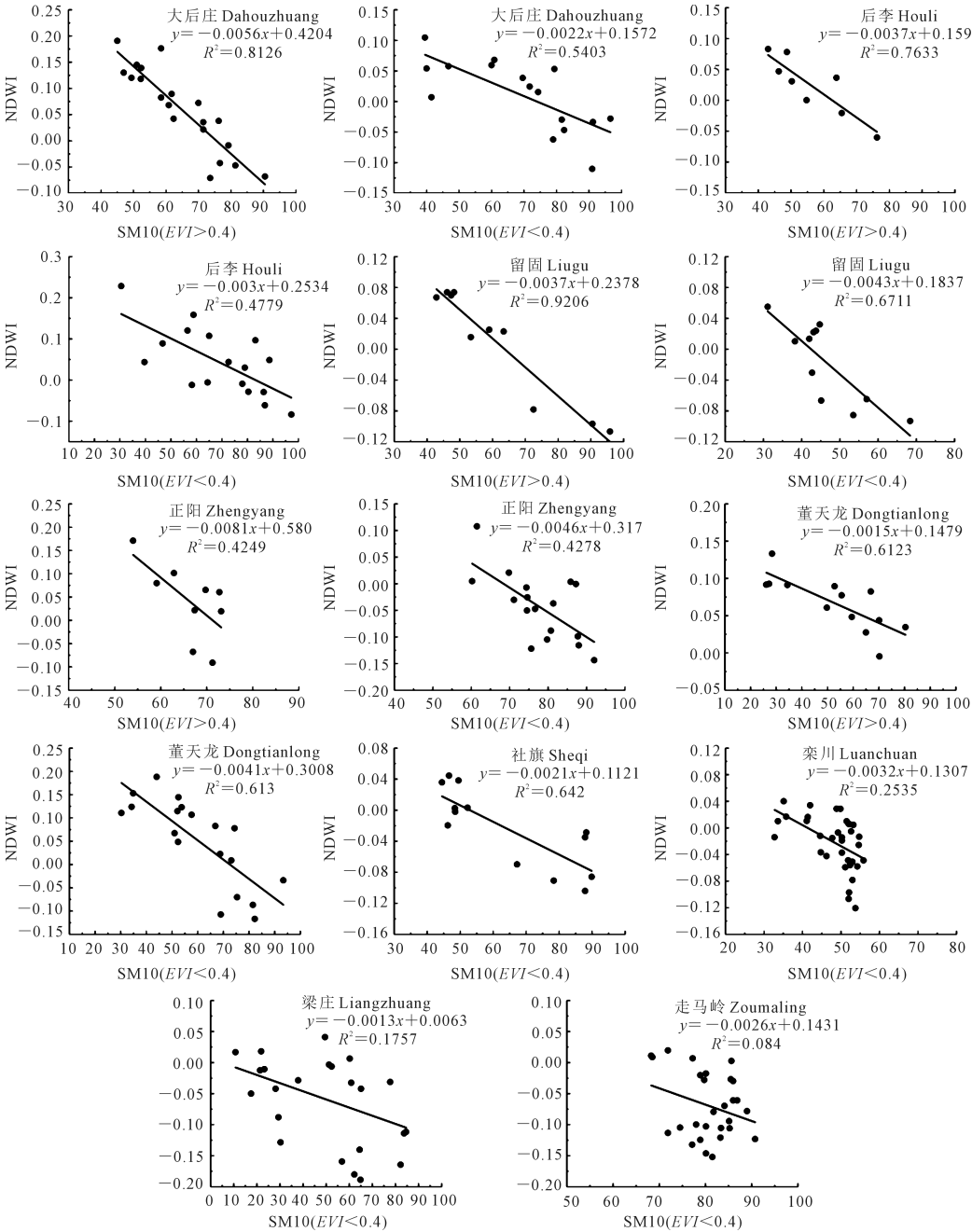


图5 NDWI 与土壤相对湿度时间序列相关性

Fig.5 Time series correlation between NDWI and soil moisture

盆地东部,地形平缓,植被覆盖度相对较高,NDWI 指数对土壤水分的反映较好。栾川、走马岭、梁庄等站点位于河南省西部,地形以山脉、丘陵为主,土壤相对湿度与 NDWI 的决定系数 R^2 分别为 0.253、0.175、0.084,说明地形的复杂多样以及小范围气候带的差异性往往会对遥感监测带来一定的影响,海拔较高地区对光谱反射率的准确性造成误差,从而影响 NDWI 指数对土壤水分的监测。整体来看,NDWI 与土壤水分呈负相关性且在平原区域相关性较好,在植被覆盖高 ($EVI>0.4$) 的区域 NDWI 对土壤水分的反演更为敏感。

3.4 空间尺度相关性分析

河南省各地地形、气候、土壤类型均有所区别,豫南山地以及整个西部区域地形复杂、海拔较高、气候多样,再加上山地丘陵区与平原地区土壤持水能力的不同,对遥感数据所计算的 NDWI 指数有一定的影响,NDWI 指数对土壤水分的相关性可能有一定的差异。为了减小气候、土壤类型等因素对实验结果的影响,根据地形特征将河南省分为北部、中部、南部、西部,安阳、濮阳、鹤壁、新乡、焦作为北部地区,郑州、开封、商丘、许昌、漯河、周口为中部地区,驻马店和信阳为南部区域,西部地区有三门峡、洛阳、南阳和平顶山。随机选取第 121、201、313 天数据计算不同区域 NDWI 与实测土壤相对湿度之间的相关性以分析 NDWI 在河南省干旱监测中的适用性。

图 6 展示了第 121、201、313 天空间上 4 个区域的 NDWI 指数与土壤水分的相关性。由图 6 可知,第 121 天时 NDWI 与土壤水分的相关性由高到低依次是北部、中部、南部、西部,决定系数 R^2 依次为 0.2998、0.2839、0.1372、0.0811。植被高覆盖区域主要集中在北部地区鹤壁、新乡和中部地区商丘、周口、漯河以及南部地区驻马店,这 3 个区域地势均相对较为平坦,NDWI 与土壤水分的相关性较高。南部地区水系较其他区域发达,植被覆盖度高于其他区域,因此 NDWI 与土壤相对湿度的相关性也较高。而西部地区地形较为复杂,NDWI 与土壤水分相关性低于其他区域,说明 NDWI 更适用于平原地区的干旱监测。河南省植被的生长季一般位于 3—9 月份,第 201 天正是植被快速生长阶段,北部和中部地区 NDWI 与土壤相对湿度之间仍然呈负相关,决定系数分别为 0.206 和 0.255。然而在南部和西部地区 NDWI 与土壤水分呈现正相关性,与理论相矛盾,可见由于地形和其他未知因素影响了两者之间的

相关性,NDWI 在山地丘陵地进行干旱监测适用性较差。北部、中部、南部和西部地区第 313 天土壤水分与 NDWI 的决定系数依次是 0.165、0.163、0.482、0.139,该时间 4 个区域 NDWI 与土壤水分的相关关系仍然为负相关,北部和中部地区相关性仍然高于西部地区,但南部地区相关性最高。由于受天气影响,该时间内南部地区无云覆盖的观测站点较少,该相关性不能完全代表整个区域。再一个可能的原因是南部地区第 313 天内温度和植被覆盖要高于其他地区,因而该区域内 NDWI 与土壤水分的相关性高于其他区域。

3.5 基于 NDWI 干旱情况分析

2014 年为河南省特大干旱年,各月份 NDWI 的空间分布及变化趋势如图 7 所示。总体来说,在时间和空间上均体现出了全年干旱变化情况,4—8 月份全省较为干旱,在 8 月 26—30 日期间,河南省大部分地区有较大降雨后,对比图 7 中 8、9 月份两个月的 NDWI 分布图可以看出,9 月份的 NDWI 值明显降低,说明地表土壤水分含量增加,全省旱情得到缓解。

在豫北山地以东、豫东平原、豫南山地以北区域 NDWI 值均呈现较低趋势,表明土壤含水量较大,地区较为湿润。11 月、12 月及翌年 1 月为冬季,土壤较为湿润的地区主要集中在豫北山地,即太行山脉附近、伏牛山、熊耳山、小秦岭、豫南山地等山地地区。此时其他地区庄稼均已收割,冬季作物刚播种下去,地表植被覆盖度较低,而山区植被类型大多为林地,此时植被覆盖度要高于其他平原地区,在相同的降雨条件下,山地林区比平原地区具有更强的保水能力;同时,低海拔地区地表蒸发和植物蒸腾作用强烈,对土壤水的消耗作用较大,而高海拔地区温度较低,对地表蒸散发具有一定的限制作用,土壤水分的消耗相对较少^[29]。因此在 11 月、12 月及翌年 1 月山地的 NDWI 明显低于其他平原地区。

4 讨 论

利用地面站点观测数据验证卫星遥感数据时,两者尺度不同,直接验证会存在误差,地表异质性越强,误差越大。本文提出利用 NDVI 图像信息熵值对观测站点进行筛选,通过和 Google Earth 图像对比,该方法效果较好,可用于其他卫星遥感产品检验时站点异质性分析,其操作比半变异函数更为简单。

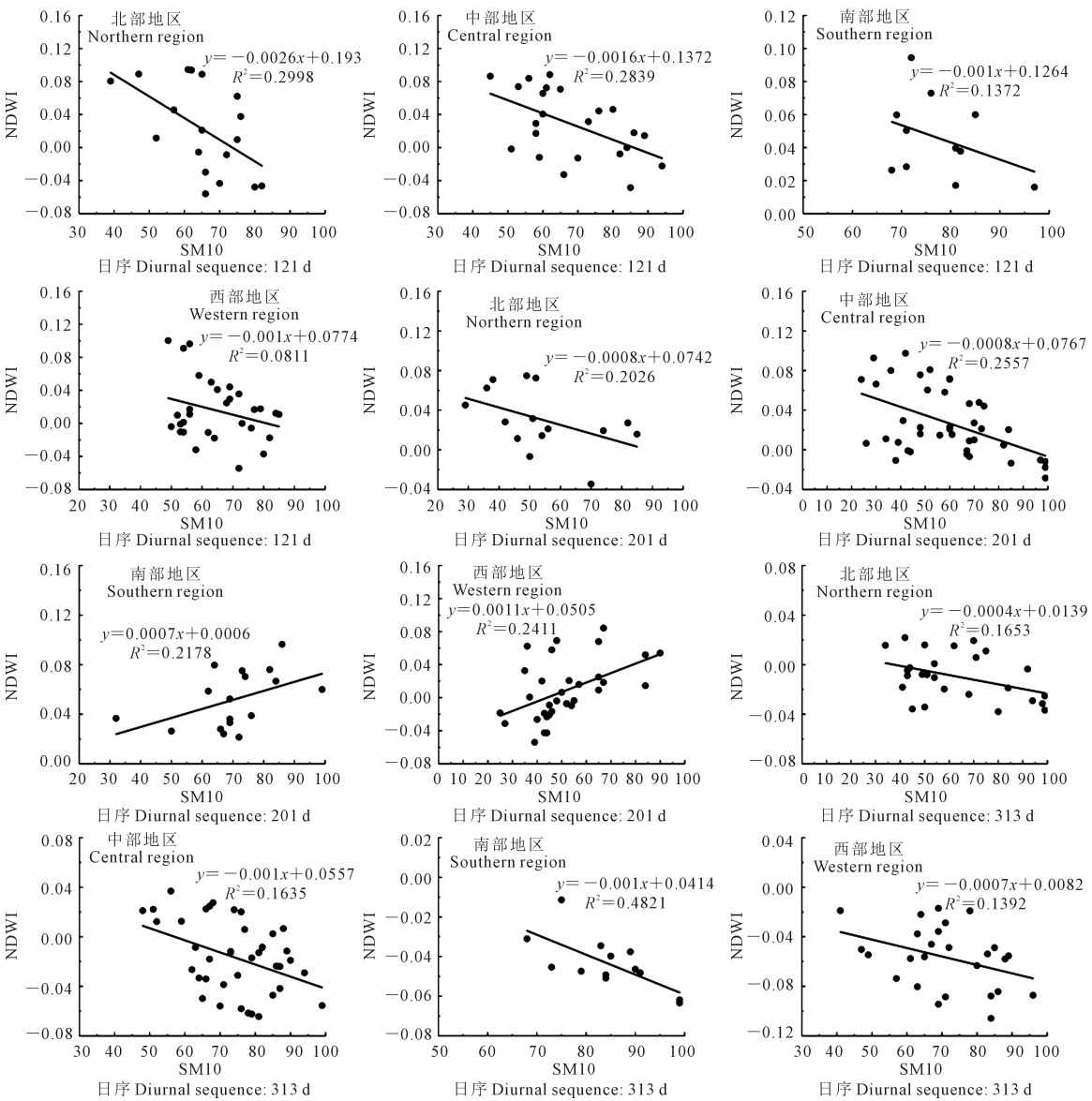


图6 NDWI与土壤相对湿度空间相关性

Fig.6 Spatial correlation between NDWI and soil relative humidity

NDWI 可有效指示植被冠层的含水量信息,在植被受水分胁迫时,指示效果比 NDVI 敏感,可用于进行大范围的干旱监测,选用归一化水体指数 NDWI 法,还可最大限度地消除植被和土壤等信息从而提高精度^[30]。总体上,NDWI 与冠层含水量呈负相关,且植被覆盖度越高相关性越好。本文利用地面观测土壤相对湿度验证 NDWI 用于干旱监测的精度,土壤相对湿度较低时,植被冠层开始受水分胁迫,但胁迫过程存在一定的延滞性,而 NDWI 指示的是植被冠层的含水量信息,利用观测的土壤相对湿度验证时会产生一定的影响。在地形较为复杂的地区,卫星遥感观测精度会有所降低,NDWI 用于干旱监测的精度比平原地区有所降低,应对遥感数据进行地形校正后再使用。河南省大部分地区为

平原,西部三门峡及洛阳部分地区为山地,其余信阳、新乡、焦作等地有少量山地,利用 NDWI 进行干旱监测具有可行性。

2014 年为河南省特大干旱年份,NDWI 较好的反映出了该年份干旱的时空动态变化规律。本文研究结果可为不同地表大范围遥感干旱监测提供了参考,且更易于实施。

5 结 论

本文以 NDWI 对 2014 年河南省干旱情况进行研究,结合 EVI 并利用实测土壤水分数据,综合评价了 NDWI 在时间和空间上干旱监测的能力。研究结果表明:

(1)利用 NDVI 图像信息熵的方法也能够很好

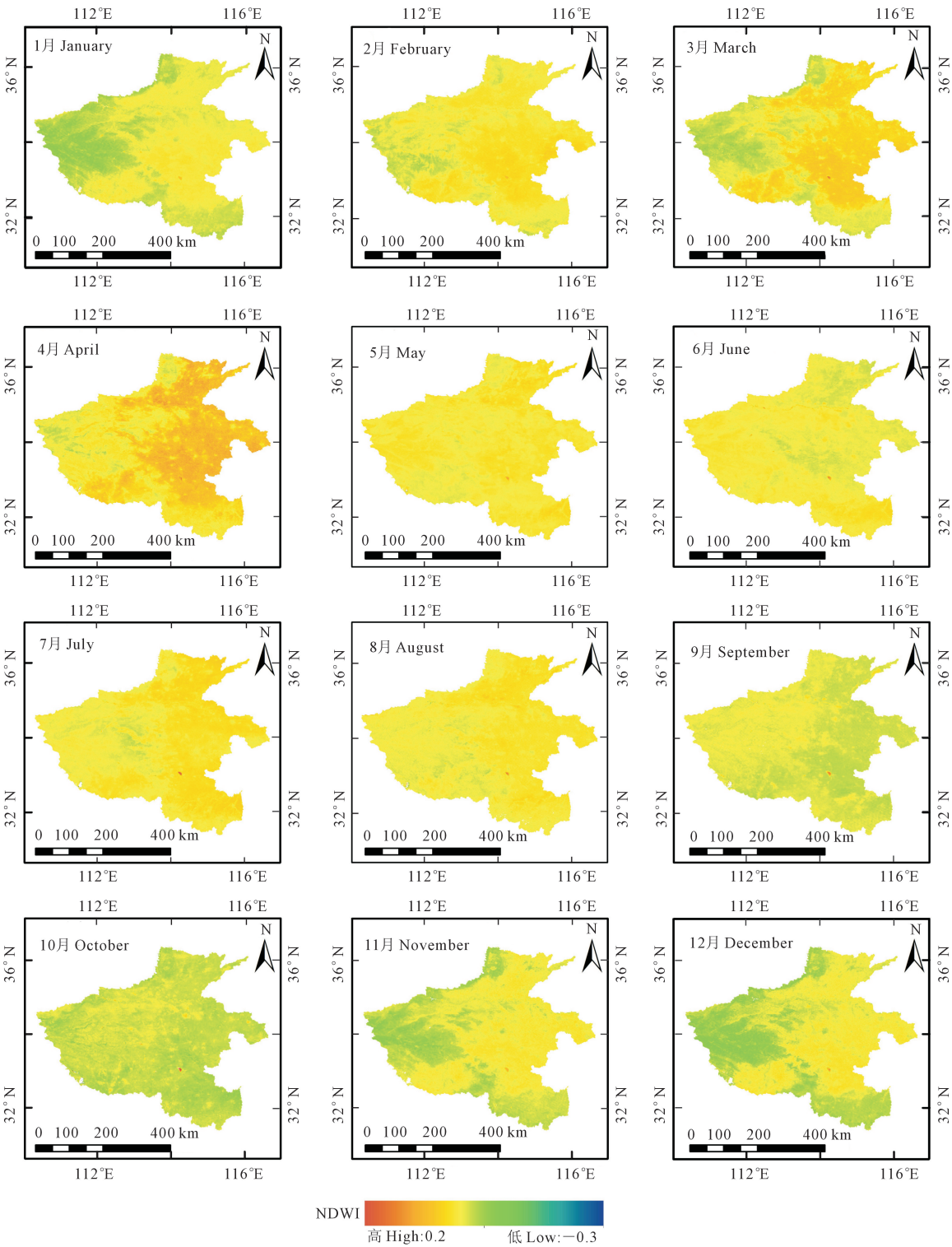


图 7 河南省 2014 年不同时期 NDWI 空间分布图

Fig.7 Spatial distribution map of NDWI in different periods in Henan Province in 2014

地表达河南省气象站周围的地表异质性程度,从而对土壤水分数据进行筛选,其可作为地表异质性评价指标,利用该指标有效筛选出地表真实性检验研究工作中所需的较为均匀的研究区。

(2)时间序列上,同一地点的 NDWI 与土壤水分之间有很好的负相关关系,在植被覆盖度高的区

域,NDWI 对植被含水量的反演更为敏感,可有效监测植被干旱程度。

(3)通过对河南省不同区域的 NDWI 与土壤水分观测值的比较发现,地势较为平坦的区域,NDWI 能够最大限度地消除植被和土壤等信息的影响,利用其进行干旱监测具有很好的适用性。在地形较

为复杂的区域,监测精度有所降低,具体原因有待进一步研究。

(4)通过 NDWI 分析 2014 年河南省干旱程度,干旱区域主要集中在中西部地区和北部地区,南部地区所受干旱影像程度较小,8 月底有大范围降雨时全省旱情才得到缓解。NDWI 监测结果与实际相吻合,可用于河南省尤其是平原地区大区域范围的干旱监测,为农业生产和经济发展提高重要信息。

参考文献:

[1] Li Z, Tan D B. The second modified perpendicular drought index (MPDI1): A combined drought monitoring method with soil moisture and vegetation index[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2013, 41(4): 873-881.

[2] Wang Y Q, Shi J C, Liu Z H, et al. Application of microwave vegetation index in drought monitoring[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, (4): 843-867.

[3] Liu X F, Zhu X F, Pan Y Z, et al. Agricultural drought monitoring: progress, challenges, and prospects[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(6): 750-767.

[4] Zhang N, Hong Y, Qin Q M, et al. VSDI: a visible and shortwave infrared drought index for monitoring soil and vegetation moisture based on optical remote sensing[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(13): 4585-4609.

[5] AghaKouchak A, Farahmand A, Melton F S, et al. Remote sensing of drought: progress, challenges and opportunities[J]. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53(2): 452-480.

[6] Jiao W Z, Zhang L F, Chang Q, et al. Evaluating an enhanced vegetation condition index (VCI) based on VIUPD for drought monitoring in the continental united states[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(3): 224-244.

[7] 林巧,王鹏新,张树誉,等.基于 Aqua-MODIS 数据的条件植被温度指数干旱等级监测研究[J].*遥感信息*,2014,(3):69-74.

[8] Zhang A Z, Jia G S. Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 134: 12-23.

[9] 彭擎,王让会,蒋烨林,等.植被-地温指数(NDVI-LST)在新疆干旱监测中的适用性[J].*生态学报*,2018,38(13):4694-4703.

[10] Park S Y, Sur C, Kim J S, et al. Evaluation of multi-sensor satellite data for monitoring different drought impacts[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2018, 32(9): 2551-2563.

[11] 刘英,岳辉,侯恩科. MODIS 数据在陕西省干旱监测中的应用[J].*国土资源遥感*,2019,31(2):172-179.

[12] Zhang Q, Yu H Q, Sun P, et al. Multisource data based agricultural drought monitoring and agricultural loss in China[J]. *Global and*

Planetary Change, 2019, 172: 298-306.

[13] 刘一哲,冯文兰. 基于 MODIS TVDI 和模糊数学方法的藏北地区旱情等级遥感监测[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(1): 86-96.

[14] Khan J, Wang P X, Xie Y, et al. Mapping MODIS LST NDVI imagery for drought monitoring in Punjab Pakistan[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 19898-19911.

[15] 杨波,马苏,王彬武,等. 基于 MODIS 的湖南省农业干旱监测模型[J]. *自然资源学报*,2012,27(10):1788-1796.

[16] Lozano-Garcia D F, Fernandez R N, Gallo K P, et al. Monitoring the 1988 severe drought in Indiana, USA. using AVHRR data[J]. 1995, 16(7): 1327-1340.

[17] Wang X W, Xie H J, Guan H D, et al. Different responses of MODIS-derived NDVI to root-zone soil moisture in semi-arid and humid regions[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 340(1-2): 12-24.

[18] Sánchez N, González-Zamora Á, Piles M, et al. A new soil moisture agricultural drought index (SMADI) integrating MODIS and SMOS products: A case of study over the Iberian Peninsula[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(4): 287-311.

[19] Karnieli A, Panov N, Goldberg A, et al. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: merits and limitations[J]. 2010, 23(3): 618-633.

[20] 刘小磊,覃志豪. NDWI 与 NDVI 指数在区域干旱监测中的比较析—以 2003 年江西夏季干旱为例[J]. *遥感技术与应用*, 2007, 22(5): 608-612.

[21] 张宏伟,林苗苗,许孟会,等. 农作物干旱灾害实时风险监测研究—以 2014 年河南干旱为例[J]. *自然灾害学报*, 2016, 25(5): 28-36.

[22] 赵菲菲,何斌,李小涵,等. 区域农业干旱脆弱性评价及影响因素识别—以河南、河北省为例[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(3): 282-286.

[23] 成威,王连喜,李琪,等. 基于植被供水指数的河南 2012 年春季干旱监测[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(24): 315-320.

[24] 张文鸽,刘豪,殷会娟. 基于改进 TVDI 指数的河南省干旱监测[J]. *人民黄河*, 2016, 38(11): 50-53.

[25] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*, 2005, 9(5): 589-595.

[26] 李文梅,覃志豪,李文娟,等. MODIS NDVI 与 MODIS EVI 的比较分析[J].*遥感信息*, 2010, (6): 73-78.

[27] 侯威,张存杰,高歌. 基于标准降水指数的多尺度叠加干旱监测指标及其等级划分[J]. *干旱区研究*, 2013, 30(1): 74-88.

[28] 赵海燕,侯美享,刘文平,等. 干旱指数在山西逐日监测中的适用性研究[J].*干旱气象*, 2014, 32(4): 505-515.

[29] 刘磊,李小雁,蒋志云,等. 青海湖流域不同海拔高度土壤水分时空变化特征[J]. *资源科学*, 2017, 39(2): 263-275.

[30] 毛海颖,冯仲科,巩垠熙,等. 多光谱遥感技术结合遗传算法对永定河土壤归一化水体指数的研究[J].*光谱学与光谱分析*, 2014, 34(6): 1649-1655.