

# 基于 MODIS 的河南省遥感干旱监测研究

王宗敏<sup>1</sup>, 杨海波<sup>1</sup>, 计淇才<sup>1</sup>, 李小涛<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 信息网络重点学科开放实验室 水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

**摘要:** 基于遥感的大面积干旱监测发挥着重要作用,但多种不同的遥感干旱指数在不同区域的空间适应性研究相对较少。利用 MODIS 数据分别计算归一化植被指数、距平植被指数、植被状态指数和温度状态指数等,并结合传统气象干旱指数分析近 10 a 来河南省的干旱情况。结果表明,2000—2009 年有 6 a 发生了不同程度的干旱,其中豫北和豫西地区的干旱程度严重,遥感干旱监测的结果与气象干旱指数基本一致;分析了河南省不同区域和时段内基于遥感的干旱指数与气象干旱指数的相关性,总结出 4 种基于遥感的干旱指数在时空格局中的适用性,为干旱监测提供技术支持。

**关键词:** 遥感监测; 降水距平; 干旱指数; 河南省; MODIS

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)01-0139-05

中图分类号: S27, X830.3

## Remote Sensing Monitoring for Drought in Henan Province Based on MODIS

WANG Zong-min<sup>1</sup>, YANG Hai-bo<sup>1</sup>, JI Qi-cai<sup>1</sup>, LI Xiao-tao<sup>2</sup>

(1. Henan Provincial Key Laboratory on Information Network/School of Water

Conservancy and Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan

450001, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Large scale drought monitoring based on remote sensing plays an important role and however, only a few studies of the spatial adaptability about a variety of remote sensing drought indexes in different regions were conducted. Normalized difference vegetation index(NDVI), anomaly vegetation index(AVI), vegetation condition index(VCI), and temperature condition index(TCI) were separately calculated based on MODIS images of He'nan Province and its drought situation in the latest decade was analyzed in combination with traditional meteorological drought index. Results showed that droughts occurred at different extents in six years between 2000 and 2009 and the northern and western parts of He'nan Province were more prone to suffer from severe droughts. Result from remote sensing monitoring for drought was consistent with the meteorological drought index. After analyzing the correlation between remote sensing drought index and meteorological drought index in different periods and regions of He'nan Province, four indices were found to have spatiotemporal adaptability. The research provides a technological support for drought monitoring.

**Keywords:** remote sensing monitoring; precipitation anomaly; drought index; He'nan Province; MODIS

在灾害频发的今天,干旱因其持续时间长,影响范围广,灾害损失大等特点逐渐成为当前世界影响最为严重的自然灾害之一。所以对干旱状况进行监测,掌握其发生、发展规律及影响因子之间的关系,为决策部门提供科学合理的依据,对于减少旱灾的损失是十分必要的。传统的干旱监测方法测点少,代表性差,同时受人力和物力等客观因素的限制,对于较大面积和实时的旱情信息较难掌握,而基于 MODIS 数据的遥感干旱监测以其时效性、客观性、廉价性及监测范围广等固有优势在干旱监测中起到越来越重要

的作用。目前运用遥感监测干旱的方法很多,其中主要的是利用遥感植被指数来间接反映干旱状况。潘卫华等<sup>[1]</sup>运用 MODIS 数据和气象资料,结合福建省建立了基于植被供水指数法的干旱监测模型对福建省的干旱分布情况进行分析;齐述华等<sup>[2]</sup>运用 MODIS 数据计算全国范围的水分亏缺指数,并对其适应条件等加以分析;Kogan<sup>[3]</sup>表明在苏丹南部 VCI 比 NDVI 能更好地解释一般的或月降雨百分比之间的关系等。河南省是中国的农业大省,粮棉油等农产品产量均居全国前列,而对农业影响最为严重的灾害之

收稿日期:2011-03-28

修回日期:2011-04-29

资助项目:水利部公益性行业科研专项“灾难性洪旱回溯模拟及对策评估关键技术研究”(201001078)

作者简介:王宗敏(1964—),男(汉族),河南省荥阳市人,教授,博士生导师,主要从事水利信息技术与计算网络研究。E-mail:zmwang@zzu.edu.cn.

一是干旱,因此本文运用遥感影像对河南省进行干旱监测,即运用传统干旱指数与多种常用基于遥感的干旱指数分别对河南省近年来的干旱状况进行分析,总结其干旱分布状况及发展规律,并分析传统干旱指数和基于遥感的干旱指数之间的相关性,比较在不同的时域和区域各种基于遥感的干旱指数的适用性,为基于遥感干旱监测提供技术支持。

## 1 数据来源与方法

### 1.1 数据来源

1.1.1 气象数据 根据研究需要按照行政区划把河南省分为豫中、豫东、豫南、豫西和豫北 5 个区域,其中豫中是指河南省内包括省会郑州、许昌、漯河、平顶山在内的城市;豫东指河南省内郑州以东地区包括开封、商丘、周口在内的城市;豫南是指省会郑州以南,包括南阳、信阳,驻马店在内的城市;豫西是指河南省内、省会郑州以西地区,包括洛阳、三门峡在内的城市;豫北是指河南省内黄河以北的地区,包括新乡、安阳、焦作、濮阳、鹤壁 5 个地级市,济源 1 个省管县级市。据从中国地面气候资料月值数据集中得到的河南省内测站点 2000—2009 年的降水量、相对湿度等气象数据,按照上面的分区结果分别统计出各个分区的年降水量、月平均降水量、降水量距平百分率等,以用来统计并分析河南省干旱的地域分布情况。

1.1.2 遥感数据 MODIS(moderate resolution imaging spectroradiometer)是美国 NASA 对地观测系统系列遥感卫星平台上的主要传感器,它具有 36 个光谱通道,每 1~2 d 可以获取一次全球地表数据<sup>[4]</sup>,因其波段范围广,数据更新频率快,在全球实施免费接收等优点在研究中具有重要的实际意义。本文对得到的 2000—2009 年的河南省 MODIS 植被指数影像 MOD 13A 3 及地表面温度影像 MOD 11A 2 首先运用 MRT 进行重投影,从 Integerized sinusoidal (ISIN) grid 投影转化为较常用的 UTM 投影,投影带为 49。然后用 ENVI 镶嵌、剪切等处理后得到河南省的遥感影像,根据各指数计算公式得出常用遥感干旱指数影像数据。

### 1.2 干旱指数模型

1.2.1 降水量距平指数( $P_a$ ) 气象干旱指标主要有降水量距平百分率、标准化降水指数、帕默尔干旱指数、相对湿润指数等单项干旱指数以及综合气象干旱指数,其中降水量距平百分率只需要降水量就可以计算得到,其资料获取相对容易,方法简单易行,因此本文选取降水量距平百分率来分析河南省的干旱状况<sup>[5]</sup>。降水量距平百分率( $P_a$ )的定义是:

$$P_a = (P - P_{AVG}) / P_{AVG} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $P$ ——某时段降水量; $P_{AVG}$ ——常年同期平均降水量。

该式表明某时段的降水量与常年同期平均降水量之差与常年同期平均降水量相比的百分率,是一个传统的旱情指标,它表征某时段降水量较常年值偏多或偏少,能直观反映降水异常引起的干旱,在气象日常业务中多用于评估月、季、年发生的干旱事件。

1.2.2 归一化植被指数(NDVI) NDVI(normalized difference vegetation index)的定义是:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{RED}) / (\rho_{NIR} + \rho_{RED}) \quad (2)$$

式中: $\rho_{NIR}$ 、 $\rho_{RED}$ ——地物在近红外波段和可见红光波段的反射率。由遥感信息计算的植被指数可以反映植物的长势,而归一化植被指数这种表达形式在一定程度上可以减少太阳高度角、大气状态和非星下点观测带来的误差,归一化植被指数因与植被覆盖度、叶面积指数、生物量和生产力等性状具有良好的相关性,而被广泛应用于较大范围植被分布状况的监测<sup>[6]</sup>,同时由于供水是否充足会影响植物的长势,因此归一化植被指数可以间接地反映旱情,但突然缺水到其改变植被状况是一个渐进过程,所以 NDVI 影像在时间上有一定滞后。

1.2.3 距平植被指数(AVI) AVI(anomaly vegetation index)的定义是:

$$AVI = NDVI_i - NDVI_{AVG} \quad (3)$$

式中: $NDVI_i$ ——特定年某一时期(如旬、月等)NDVI 的值; $NDVI_{AVG}$ ——多年该时期 NDVI 的平均值。AVI 是以植被指数(NDVI)多年的月(旬)平均值为基础,然后用当前时期的植被指数(NDVI)减去同一时期植被指数(NDVI)多年的平均值,计算得出 AVI 的变化范围,即正、负距平值。正距平表示植被生长较一般年份好,负距平表示植被生长较一般年份差,即旱情出现,一般而言,距平植被指数为  $-0.1 \sim -0.2$  表示旱情出现,  $-0.3 \sim -0.6$  表示旱情严重<sup>[7-8]</sup>。

1.2.4 植被状态指数(VCI) VCI(vegetation condition index)的定义是<sup>[9]</sup>:

$$VCI = (NDVI_i - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (4)$$

式中: $NDVI_i$ ——某一特定年第  $i$  个时期的 NDVI 值; $NDVI_{max}$ ——研究年限内第  $i$  个时期 NDVI 的最大值; $NDVI_{min}$ ——所研究年限内第  $i$  个时期 NDVI 的最小值。 $NDVI_{max} - NDVI_{min}$  是在研究年限内第  $i$  个时期植被指数的最大值与最小值之差,它在一定意义上表示了 NDVI 的最大变化范围,反映了研究区植被的生长环境;分子在一定意义上表示了某一特定年第  $i$  个时期的当地气象信息,若  $NDVI_i$  与  $NDVI_{min}$  相差很小,表示该时期的作物与植被覆盖最差情况很

相似,即生长状况很差。VCI 是基于 NDVI 通过计算变化而来,因此对植被的监测效果相对要比 NDVI 好,但是在作物播种或收割后的时间段里,VCI 的监测效果不太理想<sup>[10]</sup>。

1.2.5 温度状态指数(TCI) TCI (temperature condition index)的定义是:

$$TCI = (T_{s_{max}} - T_{s_0}) / (T_{s_{max}} - T_{s_{min}}) \quad (5)$$

式中:  $T_{s_0}$ —— $s_0$  时期的亮度温度值;  $T_{s_{max}}$ ,  $T_{s_{min}}$ ——第  $s_0$  时期亮度温度的历史最大值和历史最小值。TCI 是基于植被冠层或土壤表面温度随着水分胁迫的增加而增加的原理,是一个无量纲的量,其变化范围为  $0 \sim 1$ , 0 为水分胁迫最厉害的情况,1 为水分状况最好的情况<sup>[11]</sup>。如果一个时期内既包含干的年份又包含湿的年份,并且植被生长主要与可得到的水分有关,那么 VCI 和 TCI 将在干旱监测中发挥

重要的作用,但 TCI 受云、传感器等成像环境的影响较大,同时很难消除季节变化带来的地表温度的差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 基于降水量距平的干旱分析

对气象资料中的逐月降水量数据进行计算得到各测站点逐年降水量数据,然后求取各测站点的年降水量均值,根据降水量距平百分率的公式可以计算出 2000—2009 年河南省各测站点逐年降水量距平百分率,进而算出河南省整体逐年降水量距平百分率(表 1)。从表 1 中可以看出,2001,2002,2006—2009 年这 6 a 的年均降水量均小于多年平均降水量,即发生了不同程度的干旱,其余几年降水相对充足,其中降水最为充足的是 2003 年。

表 1 河南省各年降水量距平  $P_a$  百分率

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
$P_a/\%$	22.39	-30.00	-12.70	35.47	0.18	7.63	-10.04	-0.87	-9.01	-3.06

为了统计不同地域空间上降水量的差异,以河南省行政区划为基础,分别统计各个区域 2000—2009 年的年降水量距平百分率(表 2),在各个区域的 2001,2002,2006—2008 年均发生了不同程度的干旱。其中,豫中、豫东、豫南和豫西地区最早的年份均为 2001 年,而豫北地区最早的年份为 2002 年;豫东、豫中和豫西地区降水最充沛的年份为 2003 年,而豫南和豫北地区则为 2000 年。

表 2 各分区年降水量距平百分率 %

年份	豫中	豫东	豫南	豫西	豫北
2000	15.77	18.14	31.55	2.74	43.80
2001	-26.06	-27.42	-41.18	-25.07	-14.14
2002	-18.71	-25.62	3.32	-14.60	-39.95
2003	32.19	45.15	26.44	44.13	39.92
2004	11.01	18.33	-17.62	5.39	13.74
2005	-2.91	2.39	17.25	6.59	-1.06
2006	2.51	-12.93	-12.16	-8.57	-16.60
2007	-3.17	-0.03	6.90	-6.31	-23.28
2008	-18.27	-6.92	-3.44	-12.13	-7.12
2009	7.65	-11.10	-11.06	7.84	4.69

根据 2000—2009 年各个测站点的逐月降水量数据计算出河南省的逐月降水量均值,从而计算出降水距平百分率。根据中华人民共和国气象干旱等级标准规定,降水量距平百分率以月尺度度量干旱时,  $-40\% < P_a$  为无旱,  $-60\% < P_a \leq -40\%$  为轻旱,  $-80\% < P_a \leq -60\%$  为中旱,  $-95\% < P_a \leq -80\%$  为重旱,  $P_a < -95\%$  为特旱。据此统计 2000—2009

年各月干旱出现频数,结果显示 1 月份旱情出现 5 次,而其中重旱出现 3 次,均高于研究年限内其他月份干旱发生频率,即 1 月份是最易发生干旱的月份。同样,根据逐月降水量可以计算出河南省 5 个分区的降水距平百分率,统计各区域各月干旱出现频数,结果显示豫中、豫东、豫南、豫西、豫北地区冬季是干旱灾害的高发期,1 月份也是干旱发生频率最高的月份。

### 2.2 遥感干旱指数分析

图 1 以 2003 年和 2008 年为例表示河南省 1 月的常用基于遥感的干旱指数的旱情监测结果,干旱指数数值越小表示旱情越严重。从图 1 中可以看出,豫北和豫西地区各基于遥感的干旱指数值较低,说明这些区域植被覆盖率较低甚至没有植被覆盖,即这些地区的降水量相对稀少;而其他地区特别是豫南地区各基于遥感的干旱指数值相对较高,植被覆盖率达到了一定的程度,降水相对充足。

通过遥感影像与表 3 中各数值的综合分析可以得出,NDVI 影像变化不明显;AVI 的监测精度较 NDVI 有一定的提高;因为 1 月份作物生长特点,VCI 的监测效果不太理想。

### 2.3 月遥感干旱指数与降水量的相关性

为了比较相同时域、不同地域条件下常用基于遥感的干旱指数值与降水量的相关性,以月为尺度分析各个分区基于遥感的干旱指数和降水量之间的相关性。首先以河南省 NDVI 遥感影像为基础计算出河

南省各研究区 2000—2009 年的逐月 AVI, VCI 遥感影像数据, 然后对每年相同月的遥感影像数据求平均, 即可得到河南省研究年限内月平均遥感指数值; 用同样的方法通过地表温度影像数据计算出 TCI, 并对 TCI 和河南省月降水量数据分别求月平均值。然

后以月平均降水量为横坐标, 以基于遥感的干旱指数为纵坐标表示出两者之间的相关性, 为了便于比较, 把各基于遥感的干旱指数值均标准化到 0~100, 并作图分析月均降水量与各基于遥感的干旱指数之间的相关性如图 2 所示。

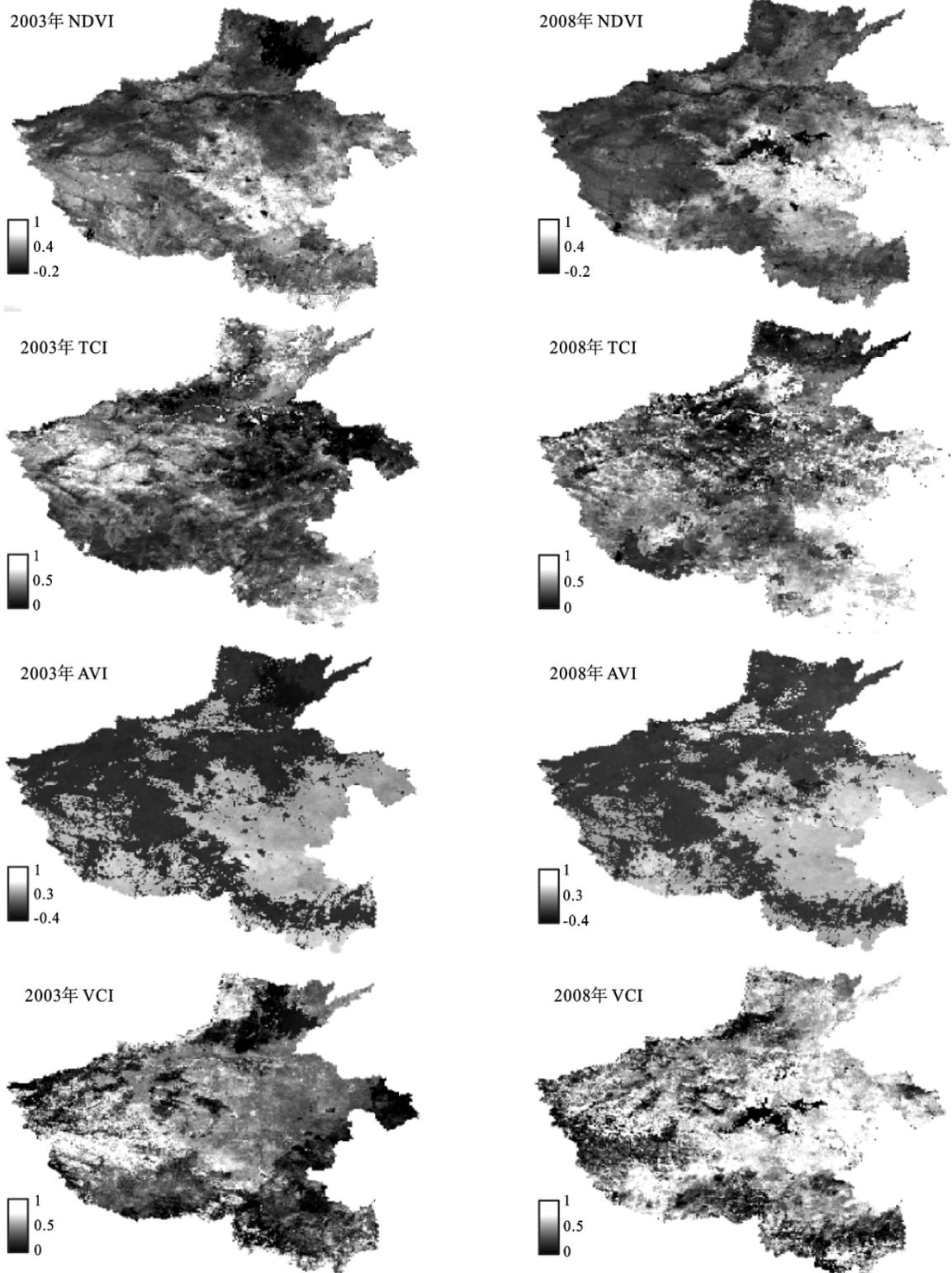


图 1 河南省 2003, 2008 年 1 月份基于遥感的干旱指数监测结果

注: NDVI 的变化范围是 -1~1, VCI 和 TCI 的变化范围是 0~1, 指数值越小说明干旱越严重。

表 3 2003,2008 年 1 月份河南省及各分区降水量和遥感植被指数值

区域	2003 年 1 月份					2008 年 1 月份				
	降水量	NDVI	AVI	VCI	TCI	降水量	NDVI	AVI	VCI	TCI
全省	9.14	0.28	0.22	0.47	0.38	26.30	0.36	0.30	0.70	0.67
豫中	8.20	0.31	0.27	0.57	0.37	24.97	0.36	0.32	0.70	0.58
豫东	11.17	0.30	0.34	0.39	0.22	28.03	0.49	0.53	0.86	0.78
豫南	14.46	0.33	0.35	0.46	0.38	54.14	0.38	0.40	0.62	0.75
豫西	6.43	0.26	0.08	0.49	0.51	16.55	0.28	0.10	0.64	0.67
豫北	5.45	0.21	0.04	0.42	0.43	7.80	0.31	0.14	0.68	0.58

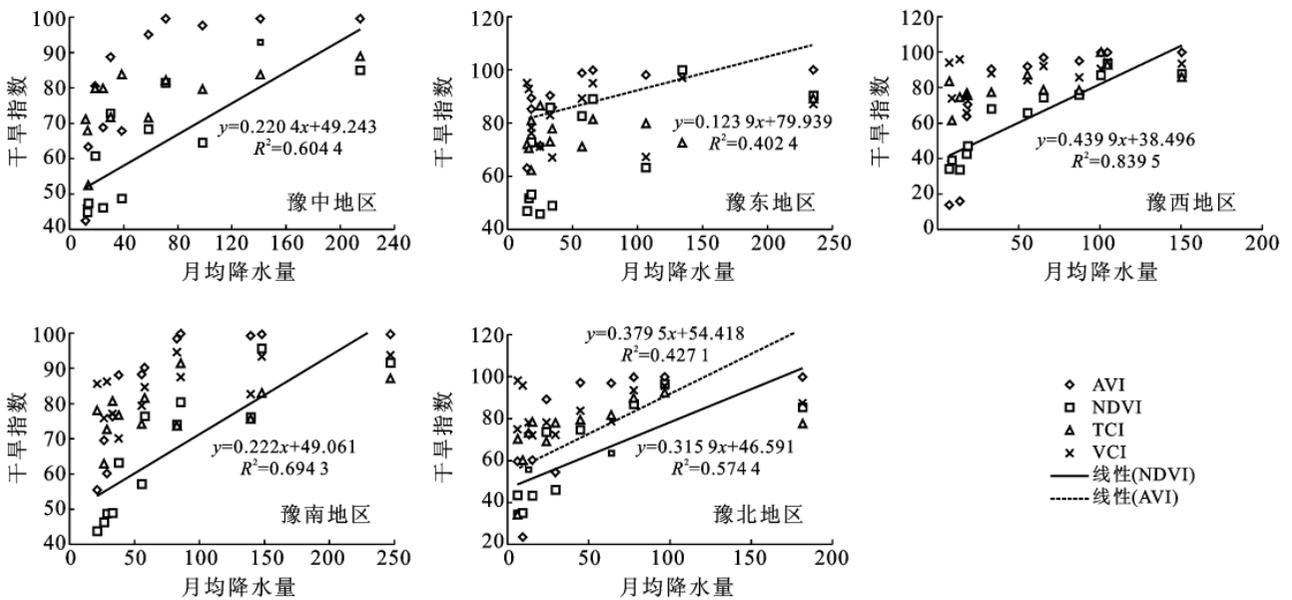


图 2 各分区月平均降水量与不同基于遥感的干旱指数的相关性

从图 2 中可以看出:豫东地区 AVI 指数与月平均降水量间的相关性最好,但其相关性仅为 0.4024;其余地区的 NDVI 指数与月平均降水量的相关性最好,相关性均大于 0.5,其中豫西地区相关性最高达 0.8395,因此当以月为尺度分析各地区干旱状况时用 NDVI 和 AVI 预测干旱准确性较高,但不同地区运用 NDVI 反映干旱指数的精度会有差异。

### 3 结论

以河南省为例,运用 MODIS 影像数据及气象干旱资料对 2000—2009 年河南省的降水量、降水距平百分率及基于遥感的干旱指数 (NDVI, AVI, VCI, TCI) 监测结果进行了分析,并对不同时域和地域条件下的干旱状况进行了总结。2000,2003 年降水较为充沛,而 2001,2002,2008 年均发生了不同程度的干旱,其中豫中、豫东、豫南和豫西地区最早的年份均为 2001 年,而豫北地区为 2002 年。豫东、豫中和豫西地区降水最充沛的年份为 2003 年,而豫南和豫北地区则为 2000 年。最容易发生干旱的月份为 1 月份。以遥感监测干旱,豫西和豫北地区植被覆盖率较低,豫南植被覆盖率较高,表明在豫西和豫北地区均

发生了一定程度的干旱,而豫南地区降水相对充足,这与用传统干旱指数分析的结果基本一致。当以多年月平均为研究时间尺度时,NDVI 和 AVI 与月平均降水量的相关性较好,用它来监测干旱具有较高的精度。此外,不同的基于遥感的干旱指数具有不同的适用条件,当时域、地域条件不同时各基于遥感的干旱指数的监测精度也会发生变化,因此综合利用多种干旱指数进行分析对提高监测精度,科学合理地预报旱情具有重要的意义。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] 潘卫华,陈家金,陈惠,等. 基于 MODIS 数据的福建省干旱遥感动态监测分析[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(4):1015-1019.  
 [2] 齐述华,张源沛,牛铮,等. 水分亏缺指数在全国干旱遥感监测中的应用研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(3):367-372.  
 [3] Kogan F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in nonhomogenous areas [J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(8):1405-1420.  
 [4] 徐冠华,田国良,王超,等. 遥感信息科学的进展和展望 [J]. 地理学报, 1996, 51(5):397-406.

本上同步波动,周期具有一致性,但变化趋势和速率有所差异。气温总体上呈增加趋势,北坡气温倾向率为  $0.24\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,南坡为  $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ;20 世纪 80 年代中期以后,年均温呈极显著的增加趋势,特别是北坡地区气温倾向率高达  $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,从 1993 年开始,秦岭北坡地区的升温幅度大于南坡地区,2007—2009 年 3 a 间北坡年均温已高于南坡。

(2) 秦岭南北坡地区的春、秋、冬三季的气温呈显著的增加趋势,尤其在 20 世纪 90 年代后增暖趋势明显。冬季增暖最为迅速,尤其体现在北坡地区,其气温倾向率为  $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ;春季增暖速度仅次于冬季;夏季气温则呈不显著的微弱减少趋势,但 1983—2009 年近 27 a 间秦岭夏季气温呈上升趋势。整体上看在春、秋、冬三季的气温均为南坡高于北坡,两地区四季气温差值逐渐减小;在 50 a 尺度和 25 a 尺度上季均温变化趋势有所不同,近 25 a 来各季均温都表现出上升趋势。

(3) 近 50 a 来秦岭南坡地区的年降水量呈不明显的减少趋势,年降水量变化的倾向率是  $-14.7\text{ mm}/10\text{ a}$ ,秦岭北坡地区的年降水量呈微弱的增加趋势,导致南北降水量差值减少,两地区气温趋同化;1995 年以前,两地区年均降水量均呈下降趋势,但 1995 年以后秦岭南北坡年均降水量均有所增加,且北坡降水量增加速度更快,其降水量变化趋向率高达  $262.3\text{ mm}/10\text{ a}$ ,说明近 15 a 来秦岭北坡地区气候具有暖湿化趋势。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] 韩淑云. 气候变化对人类现实生活的影响[J]. 城市减灾,

2005(1):25-27.

- [2] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. IPCC, 2001: Climate change 2001 [C] // Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al (Eds). The Climate Change Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2001:156-159.
- [3] Houghton J T, Callander B A, Varney S K. IPCC. Climate change, the science of climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992, 1995: 223-224.
- [4] 延军平,郑宇. 秦岭南北地区环境变化响应比较研究[J]. 地理研究, 2001,20(5):576-582.
- [5] 孙华,白红英. 基于 SPOT VEGETATION 的秦岭南坡近 10 年来植被覆盖变化及其对温度的响应[J]. 环境科学学报, 2010,30(3):649-654.
- [6] 严中伟,杨赤. 近几十年中国极端气候变化格局[J]. 气候与环境研究, 2002,2(3):267-272.
- [7] 张超,杨秉廉. 计量地理学基础[M]. 北京:高等教育出版社,1989:86-100.
- [8] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007:37-39.
- [9] 施雅凤,沈永平,胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002,24(3): 219-226.
- [10] 刘德祥,董安祥,陆登荣. 中国西北地区近 43 年气候变化及其对农业生产的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005,23(2):195-201.
- [11] 严中伟,杨赤. 近几十年中国极端气候变化格局[J]. 气候与环境研究, 2002,2(3):267-272.

(上接 143 页)

- [5] 黄晚华,杨晓光,李茂松,等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58 a 演变特征[J]. 农业工程学报, 2010,26(7):50-59.
- [6] 崔林丽,史军,肖风劲,等. 中国东部 NDVI 的变化趋势及其与气候因子的相关分析[J]. 资源科学, 2010, 32(1):124-131.
- [7] 陈维英,乾广,永伟. 距平植被指数在 1992 年特大干旱监测中的应用[J]. 遥感, 1994,9(2):106-112.
- [8] 张芳. 基于 MODIS 的陕西省干旱遥感监测研究[D]. 西

安:陕西师范大学,2008.

- [9] 李星敏,郑有飞,刘安麟. 我国用 NOAA/AVHRR 资料进行干旱遥感监测的方法综述[J]. 中国农业气象, 2003,24(3):38-41.
- [10] 齐述华. 干旱监测遥感模型和中国干旱时空分析[D]. 北京:中国科学院研究生院,2004.
- [11] 王鹏新,龚健雅,李小文,等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型[J]. 地球科学进展, 2003,18(4): 527-533.