

基于不同植被指数的 VSWI 在河南省春季干旱监测中的应用分析

李琪^{1,2} 孙晓宇^{1,2} 王连喜^{1,2} 缪森^{1,2} 吴东丽³

(¹江苏省农业气象重点实验室, 210044, 江苏南京; ²南京信息工程大学应用气象学院, 210044, 江苏南京;

³中国气象局气象探测中心, 100081, 北京)

摘要 干旱是一种常见的自然灾害,严重影响着我国的农业生产,而河南省的春旱发生最为频繁。因此,以河南省为研究区,在分析河南省春季归一化植被指数(NDVI)、增强型植被指数(EVI)以及修正土壤调节植被指数(MSAVI)变化规律的基础上,构建其相应的遥感植被供水指数(VSWI),分析比较了这3种植被指数构建的VSWI在反映土壤干湿状况时的差异,讨论了VSWI_N、VSWI_E以及VSWI_M与长时间序列降水的相关性。结果表明:VSWI与河南春季土壤相对湿度具有一定的正相关关系,VSWI_E、VSWI_M较VSWI_N更适合监测表层水分变化信息,总体来说,VSWI_E效果最好,而且,通过比较春季降水距平百分率(PA)发现,2000年是近30年春季最早的一年。因此,选择利用EVI构建的VSWI监测2000年河南省春季干旱的时空演变规律,利用EVI构建的VSWI_E总体上更适用于监测河南省的春季干旱。

关键词 植被指数; 植被供水指数(VSWI); 春季干旱监测; 遥感应用

干旱一直是对我国农业生产造成巨大危害的主要气象灾害,其在我国的发生范围很广。而河南省是我国非常重要的粮食主产地,受地理环境、过渡型气候条件以及人类活动等因素影响,旱灾已经成为河南省农业生产中最主要的自然灾害,河南省一年四季都可能发生干旱,其中,春季干旱最为频繁^[1],而且,春季降水的不足对作物产量影响也较大^[2]。

目前,不少学者对河南省干旱进行的研究已富有成效,如朱业玉等^[3]分析了河南省干旱发生的频率;竹磊磊等^[4]分析了河南省夏季干旱的气候特征;房稳静等^[5]探讨了冬小麦干旱灾害的发生规律与空间分布规律;李树岩等^[6]研究了河南省1970-2007年约40年的干旱特征;李谢辉等^[7]通过综合气象干旱指数(CI)分析了河南省干旱时空分布规律和趋势。这类研究主要是通过气象干旱指数探讨河南省的干旱时空分布规律,而基于遥感的大面积干旱监测日益发挥着重要作用,如王宗敏等^[1]用遥感指数结合传统气象干旱指数分析近10年来河南省的干旱情况;孙睿等^[8]采用标准化降水指数(SPI)和植被状态指数(VCI)探讨了气象和农业干旱的相

关性;沙莎等^[9]讨论了VCI对气象干旱的滞后效应及干旱监测能力。

遥感数据由于时间分辨率高、覆盖范围广等优点而被应用于干旱监测,基于此国内外已经发展了一系列遥感干旱指数监测方法:植被指数法,如归一化植被指数(NDVI)、距平植被指数(AVI)、VCI;表面温度法,如温度状态指数(TCI);能量平衡法,如表观热惯量(ATI)、作物缺水指数(CWSI)等;综合植被指数和表面温度的方法,如植被供水指数(VSWI)、植被温度状态指数(VTCI)等^[10]。其中,VSWI综合了植被状态和表面温度信息,物理意义明确且形式简单。杨世琦等^[11]通过VSWI方法对2006年重庆特大干旱进行了监测;贺俊杰等^[12]建立了基于VSWI的土壤湿度监测模型。虽然NDVI是当前应用最为广泛的植被指数^[13],但也有其局限性,对此很多学者进行了探讨,杨峰等^[14]利用修正土壤调整植被指数(MSAVI)、绿度植被指数(GNDVI)等5种植被指数分析天山北坡典型退化草地植被覆盖度,进而获得适宜的荒漠草地退化监测的植被指数;杨波等^[15]利用增强型植被指数(EVI)和地表温度LST的复合信息,建立了湖南省干旱遥感监测模型;易佳^[16]利用EVI、NDVI构建了VSWI模型,对重庆市夏季干旱进行了监测。

作者简介:李琪,副教授,主要从事农业气象与生态气象研究
基金项目:公益性行业(气象)专项重大项目专题(GYHY201506-001);国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY2013-06045)

收稿日期:2015-11-13;修回日期:2015-12-15

而且，目前单独针对河南省春季干旱时空分布规律的研究较少，尤其缺少在全球变暖背景下对河南省干旱趋势变化的研究。因此，以河南省为研究区，利用不同的植被指数（NDVI、EVI、MSAVI）构建遥感 VSWI，然后，用土壤墒情站点的观测结果分析比较这 3 种植被指数构建的 VSWI 在反映土壤干湿状况时的差异，最后，利用 VSWI 监测分析河南省春季干旱的时空演变规律，从而为河南省春季干旱的监测、评估以及抗旱减灾提供技术支持。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 植被供水指数 (VSWI)

VSWI 的物理意义为：当作物供水正常时，遥感植被指数和作物冠层温度在一定的生长期保持一定范围内，如果遇到干旱、供水不足作物生长受到影响时，植被指数降低，此时作物无足够水分供给叶表面蒸发，被迫关闭部分气孔，导致作物冠层温度升高^[17]。

目前，实际应用的植被指数很多，其中以 NDVI 应用最广^[18]，但 NDVI 在低植被覆盖区易受土壤背景的影响，在高植被区存在易饱和问题，因此，MSAVI、EVI 被提出^[19]。NDVI、MSAVI、EVI 计算公式如下：

$$NDVI = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (1)$$

$$EVI = \frac{G(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_2 + c_1 \times \rho_1 - c_2 \times \rho_3 + L} \quad (2)$$

$$MSAVI = [(2\rho_2 + 1) - ((2\rho_2 + 1)^2 - 8(\rho_2 - \rho_1))^{1/2}] / 2 \quad (3)$$

式中， ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 分别是 MODIS 传感器的第 1 波段（620~670nm）、第 2 波段（841~876nm）、第 3 波段（459~479nm）反射率。系数 $G=2.5$ 、 $C1=6$ 、 $C2=7.5$ 、 $L=1$ ^[20]。

根据公式 (4)、(5)、(6) 计算植被供水指数 $VSWI_N$ 、 $VSWI_E$ 、 $VSWI_M$ 。

$$VSWI_N = \frac{NDVI}{LST} \quad (4)$$

$$VSWI_E = \frac{EVI}{LST} \quad (5)$$

$$VSWI_M = \frac{MSAVI}{LST} \quad (6)$$

式中 LST 为地表温度，可近似认为是植被的冠层温度； $NDVI$ 、 EVI 、 $MSAVI$ 分别为归一化植被指数、增强型植被指数以及修正的土壤调节植被指数；

$VSWI$ 为植被供水指数，表示植被受旱程度的相对大小， $VSWI$ 值越小作物受旱程度越严重。

1.2 数据来源与处理

气象数据为 1983–2012 年河南省 17 个站点的降水数据，土壤墒情数据为 2012 年河南省 15 个土壤水分自动观测站点的 3 月–5 月逐日 10cm 深度以及 20cm 深度的土壤相对湿度数据。遥感数据为美国国家航空航天局（NASA）官方网站上免费提供的 MODIS 数据产品：2000 年以及 2012 年 3 月 5 日–5 月 31 日的 MOD09A1 和 MOD11A2，其中，MOD11A2 为 MODIS 陆地系列产品中 8d 合成的空间分辨率为 1km 的陆地表面温度产品，MOD09A1 为 8d 合成的空间分辨率为 500m 的地表反射率产品。

2 结果与分析

根据上述公式分别计算出 3 种植被指数 NDVI、MSAVI 以及 EVI，根据 VSWI 模型原理，由 MODIS 遥感影像计算得到研究区内 2012 年 3 月 5 日–5 月 31 日的植被供水指数 $VSWI_N$ 、 $VSWI_E$ 、 $VSWI_M$ ，并从中提取出土壤墒情观测站点的像元值，为接下来与实测土壤水分数据进行对比分析做准备。2012 年河南省气候特征：全省气候条件总体正常，气温接近常年，气象灾害为偏轻年份，但是降水为 2002 年以来最少值。

2.1 河南省春季 NDVI、EVI、MSAVI 的变化规律

图 1 表明，从时间变化上来看，整个春季（3 月 5 日–5 月 31 日）3 种植被指数的平均值在描述植被变化的情况上是相似的，总体呈上升趋势，MSAVI 取值较低，EVI 和 MSAVI 取值较为接近，都在 0.1~0.5，NDVI 取值范围在 0.2~0.7 变化，从 65~97d，NDVI、EVI 和 MSAVI 变化较为缓慢，从 97d 开始快速上升，3 种指数大体上都是缓慢上升

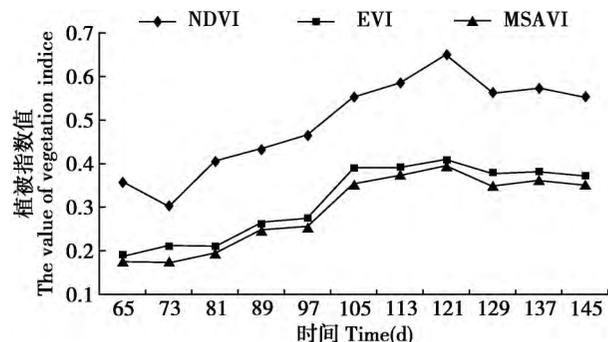


图 1 NDVI、EVI、MSAVI 植被指数值随时间的变化
Fig.1 The changes of NDVI, EVI and MSAVI over time

至 121d (4月30日) 开始下降, 其中, NDVI 变化最为明显, 主要是因为河南省耕地面积比较大, 1月-4月是冬小麦生长期, 5月-6月冬小麦开始变黄进入收割季节。

2.2 遥感监测指数与站点墒情的相关性分析

利用河南省 15 个农业气象观测站点的土壤墒情数据来比较分析监测结果。为确保遥感数据与地面观测数据的匹配性, 以土壤水分观测站点的地理坐标为中心, 选取 3×3 像元窗口大小, 分别计算

出这 9 个 VSWI 像元的平均值作为土壤水分观测点对应的指数, 并计算分布于全省的 15 个气象站点的土壤相对湿度数据和相应位置干旱指数的相关系数。

表 1 为 2012 年 3 月 5 日-5 月 31 日河南省 15 个气象观测站点的遥感监测指数与实测土壤相对湿度 (RSM) 的线性相关性分析结果。由于 MODIS 温度产品数据的生成涉及热红外辐射、地表反射率、地表发射率等因子的计算, 使其易受各种缺值因素

表 1 遥感干旱监测指数 $VSWI_N$ 、 $VSWI_E$ 和 $VSWI_M$ (2012 年) 与不同深度土壤相对湿度的相关性分析
Table 1 Correlation between $VSWI_N$, $VSWI_E$ and $VSWI_M$ (2012) model and soil moisture of different depth

监测时段 Monitoring time	$VSWI_N$ 与 RSM 相关系数 $VSWI_N$ with RSM correlation coefficient		$VSWI_E$ 与 RSM 相关系数 $VSWI_E$ with RSM correlation coefficient		$VSWI_M$ 与 RSM 相关系数 $VSWI_M$ with RSM correlation coefficient		样本量 Sample size
	10cm	20cm	10cm	20cm	10cm	20cm	
3月5日-3月12日	0.1801	0.1017	0.3295*	0.211	0.3382*	0.2203	14
3月13日-3月20日	-	-	-	-	-	-	-
3月21日-3月28日	0.0120	0.1153	0.2983*	0.2504	0.3033*	0.2481	15
3月29日-4月5日	0.0420	0.1007	0.1578	0.1749	0.1619	0.1755	15
4月6日-4月13日	0.0008	0.2086	0.0586	0.3369*	0.0436	0.3386*	15
4月14日-4月21日	0.0054	0.0191	0.0521	0.1316	0.0238	0.0642	12
4月22日-4月29日	0.0120	0.0558	0.0180	0.0944	0.0173	0.0195	15
4月30日-5月7日	-0.0035	0.0045	0.0006	0.0231	0.0004	0.0194	15
5月8日-5月15日	0.0028	-0.0131	-0.0014	0.0009	-0.0020	-0.0001	15
5月16日-5月23日	-0.0178	-0.0069	-0.0310	-0.0168	-0.0339	-0.0173	15
5月24日-5月31日	-0.0011	-0.0016	-0.0190	-0.0422	-0.0259	-0.0443	15

注: - 表示监测时段影像有云覆盖, * 表示 95% 置信度检验水平

Note: - Represents a cloud cover for the monitoring time image. * Indicates a 95% confidence level test

影响, 所以, 存在一些站点遥感监测指数的缺值。

从 VSWI 与 RSM 的相关性分析结果可以看出, VSWI 虽未全部通过显著性检验, 但相对而言与 20cm 土层 RSM 的相关系数较高, 说明 VSWI 较适合监测表层水分变化信息, 对深层土壤的监测能力尚有不足。这是因为表层土壤水分的盈亏是影响植被指数变化的一个重要因子, 而且影响地表温度变化的最大因素之一是浅层土壤的水分状况, 土层越深, 土壤水分的影响越弱。

表 1 中, 使用 8d 合成的植被指数 (NDVI) 与地温数据计算得到的遥感监测指数 $VSWI_N$, 与 10cm 以及 20cm 土层的 RSM 相关性分析中, 11 个监测时段 $VSWI_N$ 均未通过显著性检验, 说明应用 NDVI 在河南省春季开展干旱监测存在一定的局限性。而 $VSWI_E$ 与 10cm 土层 RSM 相关性分析中, 第 1、3 监测时段通过了显著性检验, 在与 20cm 土层

RSM 相关性分析中, 第 5 监测时段通过了显著性检验, 这说明 EVI 对高植被覆盖变化更为敏感, 并能有效处理大气溶胶的影响; $VSWI_M$ 与土壤相对湿度的相关性分析和 $VSWI_E$ 相似, 说明 MSAVI 已部分修正了 NDVI 对土壤背景的敏感性, 在低植被覆盖区能更好地描述植被变化。而相关性普遍不高, 一方面可能是由于地温数据与土壤墒情数据的日变化较大, 用 8d 合成的数据很难模拟或反映出与实测数据相同的状况, 反演精度和精度的可信度受到影响; 另一方面可能是选取的地面气象站点稀疏且空间分布不均匀导致, 而且遥感图像得到的 3×3 像元平均值是一个像元 (500m) 范围内的情况, 以点代面也会产生较大误差。一般来说, VSWI 在植被覆盖度较高的地区应用效果较好, 但是植物叶片气孔的关闭、土壤含水量的滞后效应、光照以及作物种类都会影响该方法的准确性, 此外, 不同时期、

不同地区的 VSWI 与土壤含水量的关系，也不具有普遍意义。但总体来看，VSWI 值与土壤湿度之间存在着正相关关系。VSWI_E 效果最好，VSWI_M 次之，VSWI_N 最不理想。

2.3 VSWI_E、VSWI_M、VSWI_N 与降水的关系分析

2.3.1 VSWI_E、VSWI_M、VSWI_N 与降水距平百分率的关系分析 降水距平指标是将一段时间的降水量与历史同期平均值进行比较，用以反映这段时间降水量偏离正常范围的程度。降水距平百分率 (PA) 也是评估气象干旱程度的一个重要因子，一般定义 90d PA < -20% 为轻度干旱，PA < -50% 则为严重干旱^[20]。

按照研究需要，将河南省分为豫中、豫东、豫南、豫西和豫北 5 个区域，其中，豫北地区站点包括安阳、新乡；豫中地区站点包括郑州、许昌、宝丰；豫东地区站点包括开封、商丘和西华；豫西地区站点包括三门峡、卢氏、孟津和栾川；豫南地区站点包括驻马店、南阳、西峡、固始和信阳。为了统计不同地域空间上降水量的差异，分别统计各个区域 1983-2012 年的春季 PA，其中，2000 年河南省各区域达到了重旱，以豫东最为严重，PA 达 -70.87%。而 2001 年除豫西地区，其他地区也达到了重旱，豫北最为严重，PA 为 -88.8%。通过比较近 30 年春季 PA 发现，2000 和 2001 年是近 30 年春季最早的两年来，如表 2 所示。

表 2 2000 和 2001 年各分区春季降水量距平百分率
Table 2 Sub regional spring precipitation anomaly percentage of 2000 and 2001 %

年份 Year	豫北 Yubei	豫中 Yuzhong	豫东 Yudong	豫西 Yuxi	豫南 Yunan
2000	-63.86	-69.52	-70.87	-60.32	-62.95
2001	-88.80	-86.78	-86.64	-48.91	-61.83

2.3.2 站点遥感指数与降水量相关性分析 降水是影响土壤湿度的重要因素之一，且土壤湿度的变化与平均降水量的变化趋势基本一致。因此，探讨 VSWI 与降水数据的相关关系，能从降水角度对 VSWI 监测土壤湿度的效果进行比较验证。

为了比较相同时域、不同地域条件下 VSWI 与降水量的相关性，在豫北、豫中、豫东、豫西和豫南分别选择新乡、宝丰、商丘、三门峡和西峡 5 个典型站点，分别将 2012 年春季 8d 合成的 VSWI_N、VSWI_E 以及 VSWI_M 遥感指数与相应时间

段的降水量进行比较，VSWI_E 和 VSWI_M 与降水量的对应关系较好，以 VSWI_E 为例见图 2。从图 2 可以看出，VSWI 的变化过程与降水量变化的时间基本一致，无雨或少雨时段的 VSWI 值普遍较低，说明旱情加重；降雨后 VSWI 值升高，说明旱情缓解。但是，干旱除了受到降水影响外，还受气温、地形条件、灌溉等因素的影响，并且降水为离散事件，而土壤水分的散失为连续事件且是缓慢进行的过程，从而使两者之间在时间上存在匹配问题，这造成 VSWI 值的大小与降水总量之间没有明显的相对数量关系。

通过对 VSWI_N、VSWI_E 和 VSWI_M 与土壤相对湿度的相关性进行分析，结果表明 VSWI 值与土壤湿度之间存在着正相关关系，降水是影响土壤湿度的重要因素之一，研究发现，土壤湿度的变化与平均降水量的变化趋势基本一致。因此，探讨 VSWI 与降水数据的相关关系，能从降水角度对 VSWI 监测土壤湿度的效果进行比较验证。

2.4 利用 VSWI 值反演河南省干旱时空分布

动态监测可以及时准确地获取灾害过程信息，从动态监测旱情的变化角度看，VSWI 可以清晰、真实地反映旱情发生、发展和缓解（或加重）的过程。根据前人研究结果，河南省 2000 年 1 月 25 日 - 5 月 7 日长达 100d 以上的时间里，大部分地区出现了有气象记载以来同期从未有过的持续少雨、高温、多风天气^[9]，河南省春季降水量距平分析结果也表明了这种旱情。为探讨基于 MODIS 数据的植被供水指数 VSWI_E 对河南省春季干旱变化趋势的响应情况，分析旱情的发展和空间分布，以河南省为研究对象，以 2000 年 3 月 - 5 月的一次春旱过程为研究对象，以 VSWI_E 为例进行较为详细的分析与描述。

由于国家相关部门没有出台 VSWI 的干旱等级划分标准，因此，根据河南省区域旱情空间分布情况，给出了 2000 年河南省春季相对旱情分级标准，共分适宜、轻旱、中旱、重旱 4 个干旱等级。2000 年春季河南省的干旱呈现干旱出现 - 干旱发生 - 干旱加剧 - 重旱 - 缓解 - 加重这几个阶段，3 月份，河南省北部、西南以及南部开始出现旱情，然后随着时间的推移，在 3 月中旬以及下旬，干旱开始加剧，直至 4 月中旬，干旱开始出现缓解，但是西北部以及中南部干旱较为严重，其他地区都是中旱以

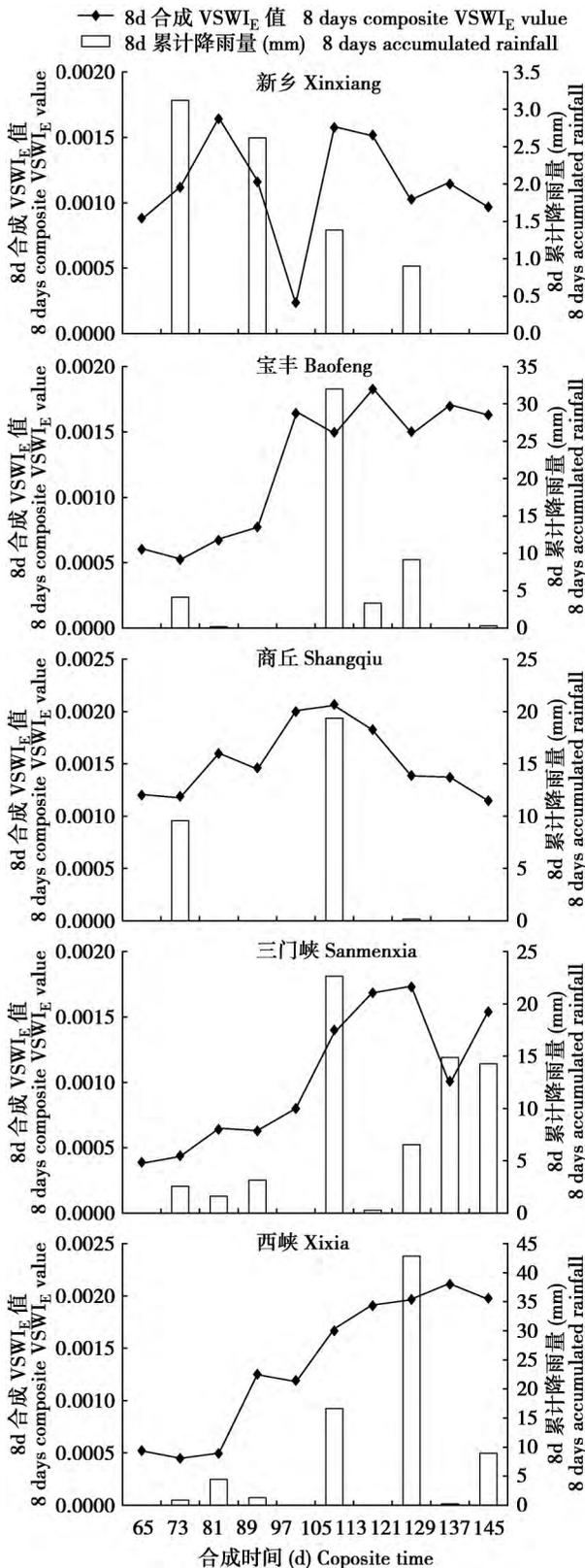


图2 2012年春季典型站点8d合成VSWE与相应时段累计降水量变化
 Fig.2 Typical station VSWE and corresponding time accumulated precipitation of eight days in the spring of 2012

及轻旱, 4月下旬, 西北部干旱逐渐开始缓解, 5月, 全省只有西南部以及南部干旱较为严重, 而在5月下旬, 全省旱情又开始加剧。如表3所示, 对2000年河南省春季VSWE的空间分布图在ENVI中进行了线性拉伸后, 在ARCGIS中进行了重分类, 统计出各个干旱等级像元数所占的百分比, 3月至4月中旬, 旱情逐渐加重, 重旱面积逐渐增加, 水分适宜面积变小, 而4月中旬至5月中旬, 旱情有所缓解, 重旱面积减少, 5月下旬旱情监测结果加重, 通过查阅文献可知河南省5月中下旬, 冬小麦易受高温逼熟影响, 灌浆期缩短, 冬小麦迅速成熟衰老并且进入收割季节^[21], 因此, 旱情监测结果加重可能是由于冬小麦成熟引起植被指数变小所致。

包欣^[22]应用气象干旱指数(SPI3)及VCI进行了河南省2000年的干旱监测研究, 本研究结论与其研究结果大致相符, 部分存在差异可能是由于选取的干旱指标不同所导致的, 而且降水对于植被生物物理特征的改变并非及时发生, 而是需要一个累积的过程^[23]。此外, 降水对土壤湿度仅起到部分影响的作用, 因此, 也只是在一定程度上改变植被的状况。

3 结论与展望

本研究利用3种植被指数NDVI、EVI、MSAVI构建了植被供水指数VSWE, 并利用土壤相对湿度数据对VSWE监测结果进行了验证, 从VSWE与RSM的相关性分析中可以看出, VSWE_E、VSWE_M较适合监测土壤表层水分变化信息。总体上来说, VSWE与土壤相对湿度具有一定的正相关关系, 而利用MSAVI以及EVI构建的VSWE_M与VSWE_E比NDVI构建的VSWE_N更适合用于监测河南省的春季干旱。总体来说, VSWE_E效果最好, VSWE_M次之, VSWE_N最不理想。易佳^[16]利用VSWE_E、VSWE_N对重庆市夏季干旱进行了监测, 结果表明VSWE_E比VSWE_N更适用于干旱监测。本研究结果与之类似, 说明EVI对高植被覆盖区旱情变化更敏感, 在一定程度上效果好于NDVI。

此外, 本研究还分析了不同区域站点VSWE_E、VSWE_N以及VSWE_M与降水量的关系, 总的来说, VSWE的变化过程与降水量变化的时间基本一致。VSWE_E和VSWE_M与降水量的对应关系较好, VSWE_E效果最好。最后, 以2000年河南省春季干旱为例,

表 3 2000 年河南省春季干旱遥感监测统计数据 (像元百分比)
Table 3 Spring drought remote sensing monitoring statistics of Henan province in 2000 (pixel percentage) %

监测时段 Monitoring time	干旱等级 Drought grade			
	适宜 Suitable	轻旱 Light drought	中旱 Medium drought	重旱 Severe drought
3 月 5 日 - 3 月 12 日	11.29	19.36	32.19	37.13
3 月 13 日 - 3 月 20 日	8.45	16.26	20.15	55.12
3 月 21 日 - 3 月 28 日	9.86	22.35	18.81	48.96
3 月 29 日 - 4 月 5 日	4.65	20.27	22.17	52.88
4 月 6 日 - 4 月 13 日	5.96	15.36	21.27	57.40
4 月 14 日 - 4 月 21 日	14.82	25.12	20.53	39.52
4 月 22 日 - 4 月 29 日	10.42	30.82	28.86	29.90
4 月 30 日 - 5 月 7 日	13.07	30.81	25.03	31.09
5 月 8 日 - 5 月 15 日	16.17	28.33	21.89	33.61
5 月 16 日 - 5 月 23 日	7.73	16.04	18.17	58.06

利用 8d 合成的 VSWI_E 进行了干旱监测分析, 所得结论与包欣^[22]的研究结果大致相符, 故利用 EVI 构建的 VSWI_E 总体上更适用于监测河南省的春季干旱。而部分结果存在差异可能是由于选取的干旱指标不同所造成的, 而且, 气象干旱指标与遥感干旱指标间存在着不同步性, 气象干旱不一定等于作物干旱^[24]。

本研究利用遥感影像数据建立干旱指数, 并与土壤相对湿度数据进行对比分析, VSWI 值与土壤相对湿度的相关性总体上不太好, 可能是由于 MODIS 数据与土壤湿度数据在时空尺度上的不一致性导致反演精度不高, 在一定程度上降低了遥感干旱指数与实际土壤墒情的相关性; 也有可能是由于 VSWI 适用于植被覆盖度较高的区域和时间段, 一般在夏季植被生长季与土壤湿度拟合相关性较高。因此, 在今后的研究中可以采用分区域、分时段、分土壤相对湿度或者分 VSWI 值以及采取非线性拟合等方式。

干旱是作物产量的重要限制因素, 也是作物最易遭受的逆境胁迫^[25], 因此, 采用 3 种植被指数构建 VSWI 模型对河南省春季干旱进行了研究, 但常用的植被指数有诸多不足, 因此, 还需要探索其他植被指数, 如叶面积指数 (LAI) 等在干旱监测中的作用, 以便更好地为农业旱情的定量监测提供参考^[20]。本研究所采用的地面土壤湿度数据的数量有限, 样点分布不够均匀, 而且, MODIS 数据与土壤湿度数据时空尺度上的不一致性问题, 都会对遥感干旱监测模型有一定的影响, 针对此类问题, 今后可考虑采用分辨率更高的影像进行分析或者改进精度的方法。此外, 在植被覆盖度较高时, 采用基于

植被供水指数 VSWI 的监测模型效果比较好, 但在作物生长初期或植被覆盖较差时, 还需建立更为精细的遥感综合模型开展春季干旱分农时 (如作物关键生长发育期) 分农区的旱情监测模型, 以此提高干旱监测模型的适用性。本研究构建的春季遥感干旱监测模型综合考虑了前期降水、蒸发等气象要素, 以及当前土壤墒情和作物需水量等多种因子, 还可以在未来气象预报较准确的情况下, 考虑未来降水、蒸散等因子, 进一步开展有关春季农业旱情的预警研究, 从而为我国农业生产提供一定的科学依据。

参考文献

[1]王宗敏,杨海波,计淇才,等.基于MODIS的河南省遥感干旱监测研究.水土保持通报,2012,32(1):139-143.
 [2]赵广才,常旭虹,王德梅,等.农业隐性灾害对小麦生产的影响与对策.作物杂志,2011(5):1-7.
 [3]朱业玉,潘攀,匡晓燕,等.河南省干旱灾害的变化特征和成因分析.中国农业气象,2011,32(2):311-316.
 [4]竹磊磊,常军,张善强,等.河南夏季干旱气候特征分析.气象与环境科学,2012,35(1):49-55.
 [5]房稳静,林文全,赵龙,等.基于土壤墒情的河南省冬小麦干旱灾害特点及评估//中国气象学会.S10气象与现代农业发展.北京:同方知网数字出版技术股份有限公司,2012.
 [6]李树岩,刘荣花,师丽魁,等.基于CI指数的河南省近40a干旱特征分析.干旱气象,2009,27(2):97-102.
 [7]李谢辉,张超,姚佳林.河南省干旱的时空分布规律与趋势分析.西北师范大学学报(自然科学版),2015,51(2):85-91.
 [8]孙睿,唐饶.基于气象和遥感数据的河南省干旱特征分析.自然资源学报,2013,28(4):646-652.
 [9]沙莎,郭妮,李耀辉,等.植被状态指数VCI与几种气象干旱指数的对比—以河南省为例.冰川冻土,2013,35(4):990-998.
 [10]张洁,武建军,周磊,等.基于MODIS数据的农业干旱监测方法对比分析.遥感信息,2012,27(5):48-54.
 [11]杨士琦,易佳,罗肇肇,等.2006年重庆特大干旱期间的遥感监测应用研究.中国农学通报,2010,26(23):325-330.
 [12]贺俊杰,王英舜,李云鹏,等.利用EOS/MODIS植被供水指数监测锡林郭勒地区土壤湿度.中国农业气象,2013,34(2):243-248.
 [13]Goetz S J.Multi-sensor analysis of NDVI,surface temperature and biophysical variables at a mixed grassed land site.International

- Journal of Remote Sensing, 2010, 18(1): 71–94.
- [14]杨峰,李建龙,钱育蓉,等.天山北坡典型退化草地植被覆盖度监测模型构建与评价.自然资源学报, 2012, 27(8): 1341–1347.
- [15]杨波,马苏,王彬武,等.基于MODIS的湖南省农业干旱监测模型.自然资源学报, 2012, 27(10): 1788–1796.
- [16]易佳.基于EOS-MODIS的重庆市干旱遥感监测技术研究.重庆:西南大学, 2010.
- [17]姜亚珍,张瑜洁,孙琛,等.河北省土壤干湿状况遥感监测指数比较.中国农业气象, 2014, 35(6): 675–681.
- [18]Wan Z, Wang P, Li X. Using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index products for monitoring drought in the southern great plains, USA. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(1): 61–72.
- [19]Song Y K, Njoroge J B, Yukihiro M. Drought impact assessment from monitoring the seasonality of vegetation condition using long-term time-series satellite images: a case study of Mt. Kenya region. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(5): 4117–4124.
- [20]杨世琦,高阳,徐永进.基于植被供水指数的重庆夏季干旱状况评估//中国气象学会.创新驱动发展 提高气象灾害防御能力——S2灾害天气监测、分析与预报.北京:同方知网数字出版技术股份有限公司, 2013.
- [21]耿婷,付伟,陈群,等.近20年河南省冬小麦生育期气候资源的时空变化及其适应性研究.麦类作物学报, 2013, 33(4): 652–661.
- [22]包欣.基于多源数据的旱情监测方法研究——以河南示范区为例.淮南:安徽理工大学, 2013.
- [23]李华朋,张树清,高自强,等.MODIS植被指数监测农业干旱的适宜性评价.光谱学与光谱分析, 2013, 33(3): 756–761.
- [24]房世波,齐月,韩国军,等.1961–2010年中国主要麦区冬春气象干旱趋势及其可能影响.中国农业科学, 2014, 47(9): 1754–1763.
- [25]伏毅,戴媛,谭晓荣,等.干旱对小麦幼苗脂类和蛋白质氧化损伤的影响.作物杂志, 2010(3): 45–50.

The Use of Vegetation Supply Water Index (VSWI) based on Different Vegetation Indices in the Spring Drought Monitoring in Henan Province

Li Qi^{1,2}, Sun Xiaoyu^{1,2}, Wang Lianxi^{1,2}, Miao Miao^{1,2}, Wu Dongli³

(¹Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing 210044, Jiangsu, China; ²College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China; ³Meteorological Observation Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract As a common natural disaster, drought seriously threatens the agricultural production, especially the spring drought frequently happens in Henan province. This paper presented a case study of different indices of Vegetation Supply Water Index (VSWI) in Henan drought monitoring in spring. NDVI, EVI and MSAVI were selected to build different VSWI models, which were analyzed the development trend of spring drought. The relationship of three indices and long time series of precipitation were discussed on the meteorological stations. The results showed that, in some extent, there was a positive correlation between three indices and the soil moisture. VSWI_E and VSWI_M were more suitable for monitoring surface soil moisture. Overall speaking, VSWI_E was the best for monitoring spring drought. Furthermore, by comparing the spring precipitation anomaly percentage in Henan province, we found that the year of 2000 was the most severe spring drought year of the recent 30 years. Therefore, VSWI model based on EVI was suitable to monitor the spring drought in Henan province.

Key words Vegetation indices; Vegetation Supply Water Index (VSWI); Spring drought monitoring; Remote sensing application