

杨 鹏,李春强,高 祺,等.多种干旱遥感监测模型在河北地区的适用性研究[J].江苏农业科学,2018,46(16):231-237.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.16.056

多种干旱遥感监测模型在河北地区的适用性研究

杨 鹏¹,李春强²,高 祺¹,张 莹¹,崔生成³

(1. 石家庄市气象局,河北石家庄 050081; 2. 河北省气象科学研究所,河北石家庄 050021;
3. 中国科学院安徽光学精密机械研究所/中国科学院大气成分与光学重点实验室,安徽合肥 230031)

摘要:利用 2010—2015 年中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 地表温度产品数据 (MOD11A2) 和植被指数产品数据 (MOD13A2),基于温度植被干旱指数 (TVDI)、植被供水指数 (VSWI) 和植被状态指数 (VCI) 等 3 种干旱遥感监测模型,分别计算 2010—2015 年河北省中南部地区的干旱指数,利用土壤墒情站 10、20、50 cm 不同深度的土壤相对湿度对模型进行验证。结果表明:TVDI 与 3 个不同深度土壤相对湿度的相关性最高,VSWI 次之,VCI 最差;3 种模型整体上与 20 cm 深土壤相对湿度相关性最高,10 cm 次之,50 cm 最差。综合分析得出,TVDI 模型更适合河北省中南部的干旱监测,在一定程度上能够代表表层土壤水分的空间分布状况;在构建地表温度-植被指数 (T_s-VI) 特征空间时,增强型植被指数 (EVI) 优于 NDVI;TVDI 与降水量呈反相关关系,TVDI 对前期总体降水量的响应较为敏感。最后,将 TVDI 模型应用到 FY3 数据上,发现 FY3 与 MODIS 在干旱监测能力上基本相当,TVDI 空间分布高度一致,有力地证实了 FY3 数据的可靠性和可用性较高。

关键词:干旱遥感监测;土壤相对湿度;MODIS;河北省

中图分类号: S127;S152.7⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)16-0231-07

旱灾是世界上影响较广、造成经济损失较大的自然灾害之一。我国旱灾发生频繁、影响广泛,是可造成农业经济损失的严重气象灾害。我国是农业大国,干旱已严重影响到我国农业可持续发展和粮食安全^[1-3]。河北省作为我国粮食重要产区,加强干旱监测和预报预警能力,为政府制定合理的防旱、抗旱决策提供科学依据迫在眉睫。因此,探讨一种客观、实时、动态的干旱监测方法,了解河北地区的干旱发生和发展

规律及其对农业生产的影响有着重要意义^[4-5]。

卫星遥感技术的发展,为大面积农业干旱客观、实时、动态监测评估提供了一条新途径^[6]。国外利用遥感方法进行土壤表层湿度监测的研究较早,我国从 20 世纪 80 年代中期开始相关研究。随着干旱遥感监测方法的不断发展,出现了热惯量法、作物供水指数法、温度植被干旱指数法、植被状态指数法等监测方法^[7]。Price 提出了表观热惯量法 (ATI),采用可见光、近红外波段反射率和热红外辐射温度差来计算 ATI,并估算土壤水分^[8];Gillies 等利用植被指数和地表温度的三角方法估测土壤有效水分^[9];王鹏新等于 2001 年在三角形特征空间的基础上,提出了条件植被温度指数 (VTCI),用于干旱监测^[10];Sandholt 等基于植被指数和地表温度的关系,提出了温度植被干旱指数 (TVDI),估测监测表层土壤含水量状况^[11]。此后,TVDI 在国内得到了应用,逐渐成为当前旱情遥感监测的主要模型之一^[12-14]。不同干旱遥感监测模型的原理、方法和适用范围不同,为了研究不同干旱遥感监测模型

收稿日期:2017-08-31

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(重大专项)(编号:GYHY201506001);河北省气象局科研开发面上项目(编号:16ky12)。

作者简介:杨 鹏(1986—),男,山东枣庄人,硕士研究生,工程师,主要从事遥感技术应用及农业气象灾害研究。E-mail:fga12345678@163.com。

通信作者:李春强,硕士,研究员级高级工程师,主要从事农业气象和气候变化研究。E-mail:chunql@sohu.com。

的模拟研究[J].高原气象,2012,31(6):1611-1621.

[10]常 鸣,樊少芬,王雪梅.珠三角土地覆被资料优选及在 WRF 模式中的初步应用[J].环境科学学报,2014,34(8):1922-1933.

[11]曹 峥,廉丽姝,顾宗伟,等. WRF 土地利用/覆被数据优选及其在城市热岛模拟中的应用[J].资源科学,2015,37(9):1785-1796.

[12]王咏薇,蒋维楣,郭文利,等.城市布局规模与大气环境影响的数值研究[J].地球物理学报,2008,51(1):88-100.

[13]汪光焘,王晓云,苗世光,等.城市规划大气环境影响多尺度评估技术体系的研究与应用[J].中国科学(D辑:地球科学),2005,35(增刊1):145-155.

[14]王晓云.城市规划大气环境效应定量分析技术[M].北京:气

象出版社,2007.

[15]Chen F Y,Hsu Y C,Lin P L. Investigation of the effects of different land use and land cover patterns on mesoscale meteorological simulations in the Taiwan area[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,2013,52(3):570-587.

[16]何建军,余 晔,刘 娜,等.复杂地形区陆面资料对 WRF 模式模拟性能的影响[J].大气科学,2014,38(3):484-498.

[17]孙 蕊,王晓云,王 颖,等.基于部分气象条件的北京市域空间布局规划方案比较研究[J].科学技术与工程,2014,14(16):11-16.

[18]苗世光,王晓云,蒋维楣,等.城市规划中绿地布局对气象环境的影响——以成都城市绿地规划方案为例[J].城市规划,2013,37(6):41-46.

在河北地区的适用性,本研究选取温度植被干旱指数、植被供水指数(VSWI)和植被状态指数(VCI)3种干旱遥感监测模型进行对比分析,总结出适用于河北地区的遥感干旱监测模型,用于河北地区的干旱遥感监测业务,旨在提高河北地区干旱遥感监测的准确性,为提升河北地区的农业干旱监测、预警水平提供可靠的理论支撑和技术参考。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区介绍

河北省地处 $36^{\circ}05' \sim 42^{\circ}37'N$ 、 $113^{\circ}11' \sim 119^{\circ}45'E$ 之间,属于温带半湿润半干旱大陆性季风气候,大部分地区四季分明,春季干燥多风,夏季炎热多雨,秋季凉爽晴朗,冬季寒冷少雨。地势由西北向东南倾斜,西北部为山区、丘陵和高原,其间分布有盆地和谷地,中南部为广阔的平原。河北平原是华北大平原的一部分,海拔多在 50 m 以下,占全省总面积的 44%。受地形地势以及海拔的影响,河北省冬小麦主要分布在中南部平原地区,主要集中在保定市、廊坊市、沧州市、石家庄市、衡水市、邢台市、邯郸市等地区。考虑到山区地形起伏对遥感数据的可靠性以及模型反演精度的影响,本研究将研究区域选取在河北省中南部平原地区^[15](图1),采用 ENVI5.0 软件从 90 m 数字高程模型(DEM)中沿西部山区提取 100 m 等高线获得研究区域矢量图,将其以东的平原地区作为研究区域,图1给出了研究区域内土壤墒情站点分布,土壤墒情站点资料来源于河北省气象科学研究所。

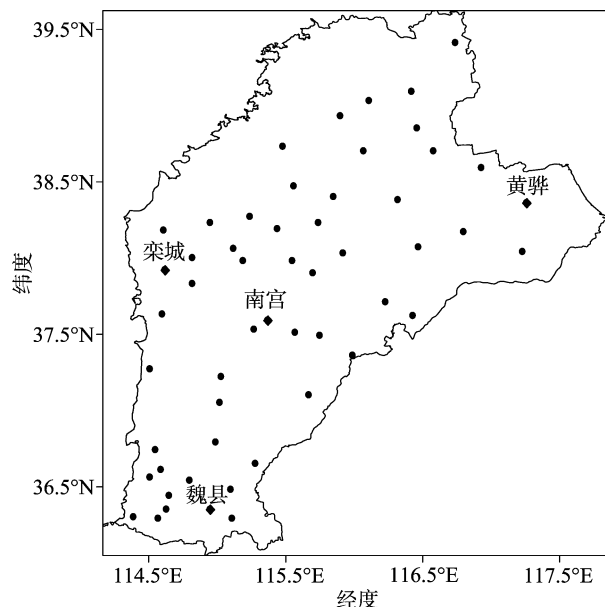


图1 研究区及土壤墒情站点分布

1.2 数据来源

本研究选取的中分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感数据为美国国家航空航天局(NASA)官网上免费提供的MODIS全球植被指数16 d合成产品MOD13A2和地表温度8 d合成产品MOD11A2,空间分辨率均为1 km,投影坐标需要由正弦变化到阿尔伯斯(Albers)等面积投影,时间为2010—2015年3—10月,分别对应2010—2015年065~177、273和289时段(设1月1日的时次为1,以此类推),研究区景号为h27v5,遥感数据处理工具选用ENVI和MRT软件^[16]。

本研究所用的土壤墒情站土壤相对湿度数据和降水量数据均来源于河北省气象局,其中土壤墒情数据分别包含10、20、50 cm不同深度下的土壤相对湿度数据,降水量数据为对应站点的逐日降水量数据。为了与卫星观测时间分辨率保持一致,将逐日的土壤相对湿度数据和降水量数据处理成以16 d为单位的数据序列。

2 理论与方法

2.1 温度植被干旱指数

Sandholt等对 $T_s - NDVI$ (地表温度-归一化植被指数)三角形特征空间进行研究,提出了温度植被干旱指数,要求研究区域必须足够大,涵盖的地表覆盖信息应该从裸土一直变化到完全植被覆盖,土壤水分从缺乏到充足^[11]。当研究区的植被类型和土壤含水量变化较小时,NDVI和 T_s 的散点图呈梯形分布。 $TVDI$ 的表达式:

$$TVDI = \frac{T_s - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}; \quad (1)$$

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

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

式中: T_s 为任意像元的地表温度; T_{\max} 为某一NDVI对应的最高地表温度,对应 $T_s - NDVI$ 特征空间的干边; T_{\min} 为NDVI对应的最低地表温度,对应 $T_s - NDVI$ 特征空间的湿边; a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 分别是干边和湿边的拟合系数。从式(1)可以看出, $TVDI$ 与土壤湿度呈负相关关系, $TVDI$ 越大,土壤湿度越小,越干旱; $TVDI$ 越小,土壤湿度越大,越湿润^[17]。

2.2 植被供水指数

作物在受旱的情况下,植物供水不足,作物冠层通过关闭部分气孔而减少蒸腾量,导致叶面温度升高。因此,在一定生长发育期,作物冠层温度的高低可视为量度作物受旱程度的一种标准。在综合考虑植被指数和地表温度的基础上,提出了植被供水指数^[18],其定义见下式:

$$VSWI = \frac{NDVI}{T_s}. \quad (4)$$

从式(4)可以看出, $VSWI$ 越小,干旱越严重;反之, $VSWI$ 越大,越湿润。

2.3 植被状态指数

作物在生长发育过程中,干旱缺水状态不利于作物生长,植被状态指数是利用卫星监测资料反演的植被指数,可反映作物生长变化状况,进而反映干旱状况。其定义如下^[19]:

$$VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}}. \quad (5)$$

式中: $NDVI_i$ 为某一特定年第*i*时段的NDVI值; $NDVI_{\max}$ 和 $NDVI_{\min}$ 分别为多年同一时段NDVI的最大值和最小值。

3 结果与分析

3.1 构建地表温度-植被指数($T_s - VI$)特征空间

本研究收集了2010—2015年3—10月的植被指数16 d合成产品MOD13A2和地表温度8 d合成产品MOD11A2,基于MOD11A2地表温度数据和MOD13A2植被指数数据,分别提取 T_s 、NDVI、增强型植被指数(EVI),借助ENVI软件对研究区数据进行剪裁工作。由于MOD13A2产品和MOD11A2

产品在时间上不匹配,需要将 8 d 的 MOD11A2 产品采用均值法合成为 16 d 的地表温度值。利用 ENVI/IDL 二次开发编程技术,以 0.01 的 NDVI/EVI 步长间隔,分别提取 2010—2015 年 3—10 月对应的最大、最小地表温度,以最大值、最小值合成法合成通用特征空间干、湿边地表温度^[20~21],通用特征空间合成流程见图 2,利用最小二乘法拟合 $T_s - NDVI$ 和

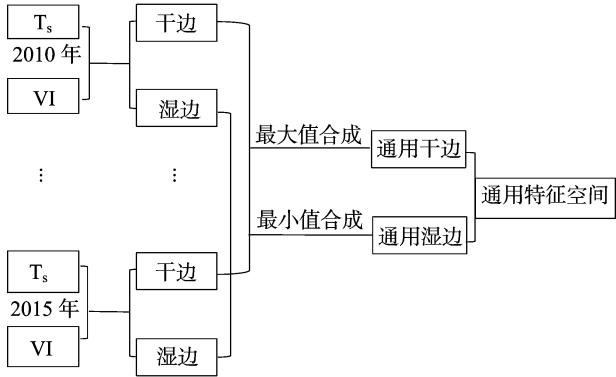


图2 通用特征空间的合成流程

$T_s - EVI$ 通用特征空间干、湿边方程,拟合过程中根据方差逐步排除异常点的干扰,拟合结果如表 1 所示。

研究表明,通用特征空间的干、湿边解决了单一时段特征空间边界不稳定的问题,与单一时段特征空间相比,通用特征空间干、湿边异常点明显减少,拟合结果优于单一时段特征空间。湿边反映作物水分胁迫条件,理论上湿边方程应为 1 条斜率为 0 的水平直线,但由于 MODIS 产品数据生产过程中云剔除的不够精确以及数据预处理的影响,湿边方程有一定的斜率(斜率 > 0)或部分波动,通常情况下干、湿边方程采用线性拟合方式。从表 1 可以看出,干边线性拟合效果好于湿边,湿边斜率大多数小于干边的拟合斜率, EVI 与 T_s 的相关性整体高于 $NDVI$ 与 T_s 的相关性。而且,在高值区 $NDVI$ 较 EVI 更容易达到饱和,从式(6)和式(7)可以看出, $NDVI$ 增强了近红外与红光波段的对比度,其结果增强了低值部分,拟制了高值部分,在高值区容易饱和; EVI 是在 $NDVI$ 基础上的改进,较好地解决了 $NDVI$ 红光饱和、土壤和大气噪声的影响^[22]。由于近红外波段反射率(NIR)对植被较为敏感,图 3 给出了 $NDVI$ 、 EVI 与 NIR 的散点图。

表 1 $T_s - NDVI$ 和 $T_s - EVI$ 特征空间通用干边方程和湿边方程

序号	起始日期	$T_s - NDVI$		$T_s - EVI$	
		干、湿边方程	r^2	干、湿边方程	r^2
065	3 月 6 日	$LST_d = -20.72NDVI + 312.27$	0.866	$LST_d = -22.11EVI + 309.36$	0.906
		$LST_w = 24.85NDVI + 263.43$	0.823	$LST_w = 46.07EVI + 262.68$	0.876
081	3 月 22 日	$LST_d = -15.84NDVI + 313.50$	0.793	$LST_d = -21.47EVI + 312.97$	0.857
		$LST_w = 13.74NDVI + 279.26$	0.662	$LST_w = 14.88EVI + 281.76$	0.753
097	4 月 7 日	$LST_d = -9.66NDVI + 311.57$	0.919	$LST_d = -12.67EVI + 311.01$	0.948
		$LST_w = 7.01NDVI + 282.18$	0.647	$LST_w = 9.45EVI + 282.49$	0.753
113	4 月 23 日	$LST_d = -9.17NDVI + 315.46$	0.809	$LST_d = -13.71EVI + 315.77$	0.764
		$LST_w = 3.60NDVI + 289.92$	0.282	$LST_w = 4.04EVI + 290.41$	0.374
129	5 月 9 日	$LST_d = -17.40NDVI + 322.46$	0.869	$LST_d = -24.09EVI + 322.74$	0.881
		$LST_w = 2.70NDVI + 293.86$	0.435	$LST_w = 3.34EVI + 294.23$	0.483
145	5 月 25 日	$LST_d = -19.56NDVI + 326.80$	0.838	$LST_d = -31.12EVI + 327.84$	0.898
		$LST_w = -1.06NDVI + 297.88$	0.266	$LST_w = 1.85EVI + 296.55$	0.397
161	6 月 10 日	$LST_d = -14.70NDVI + 326.00$	0.699	$LST_d = -21.21EVI + 326.44$	0.820
		$LST_w = 2.97NDVI + 297.38$	0.272	$LST_w = 7.79EVI + 296.55$	0.396
177	6 月 26 日	$LST_d = -9.83NDVI + 327.52$	0.486	$LST_d = -19.72EVI + 329.38$	0.610
		$LST_w = 0.23NDVI + 300.78$	0.204	$LST_w = 1.93EVI + 299.63$	0.395
273	9 月 30 日	$LST_d = -4.24NDVI + 308.28$	0.467	$LST_d = -14.38EVI + 310.36$	0.630
		$LST_w = 3.10NDVI + 289.69$	0.361	$LST_w = 9.02EVI + 288.99$	0.703
289	10 月 16 日	$LST_d = -22.98NDVI + 315.93$	0.830	$LST_d = -25.67EVI + 312.43$	0.856
		$LST_w = 5.29NDVI + 285.66$	0.656	$LST_w = 9.90EVI + 285.71$	0.860

注:表中所列方程均通过 0.01 信度检验。 LST_d 表示干边的的地表温度(K), LST_w 代表湿边的地表温度(K)。

从图 3 可以看出,随着 NIR 的变化, $NDVI$ 在 0.2~0.8 之间拟合效果相对较好,0.8 以上部分基本趋于饱和, EVI 对高植被覆盖区域的变化较 $NDVI$ 更为敏感,因此 EVI 在特征空间中更能体现出植被覆盖的变化情况;与 $NDVI$ 相比, EVI 增强了干旱监测指数的敏感性,能更好地反映土壤湿度的变化情况。

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}; \tag{6}$$

$$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + 6 \times \rho_{red} - 7.5 \times \rho_{blue} + 1}^\circ \tag{7}$$

式中: ρ_{nir} 、 ρ_{red} 、 ρ_{blue} 分别代表近红外波段反射率、红光波段反

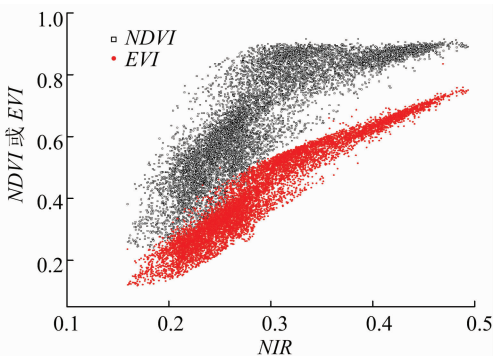


图3 NIR 与 NDVI/EVI 的散点图

射率、蓝光波段反射率。

3.2 与土壤相对湿度(RSM)的相关性

为了分析不同干旱遥感监测模型在河北地区的适用性及适用范围,采用 EVI 分别计算 TVDI、VSWI、VCI 干旱指数,利用土壤墒情站地面 10、20、50 cm 3 种深度土壤相对湿度数据对模型进行验证。以 2015 年 129 时次(5 月 9 日至 5 月 24 日)为例,图 4 为 TVDI、VSWI、VCI 监测结果,图 5 为同一时次 10、20、50 cm 深土壤的相对湿度,可以看出,TVDI、VSWI、VCI 3 种干旱遥感监测模型反演的干旱空间分布情况与土壤墒情站观测结果基本保持一致,出现旱情的地区基本集中在

衡水南部、邢台和邯郸东部以及沧州、廊坊地区。图 6 给出了 2015 年 129 时次(5 月 9 日至 5 月 24 日)TVDI、VSWI、VCI 3 种干旱遥感监测模型与 10、20、50 cm 不同深度土壤相对湿度的相关性。3 种模型与 10、20、50 cm 深土壤相对湿度都具有一定的相关性;3 种模型与 10、20 cm 的相关性明显高于 50 cm,说明 3 种模型均对表层土壤相对湿度更为敏感,可以较好地反映 0~20 cm 表层土壤水分,对深层土壤水分响应效果相对较差,这可能是因为太阳辐射对表层土壤的影响效果强于深层土壤。

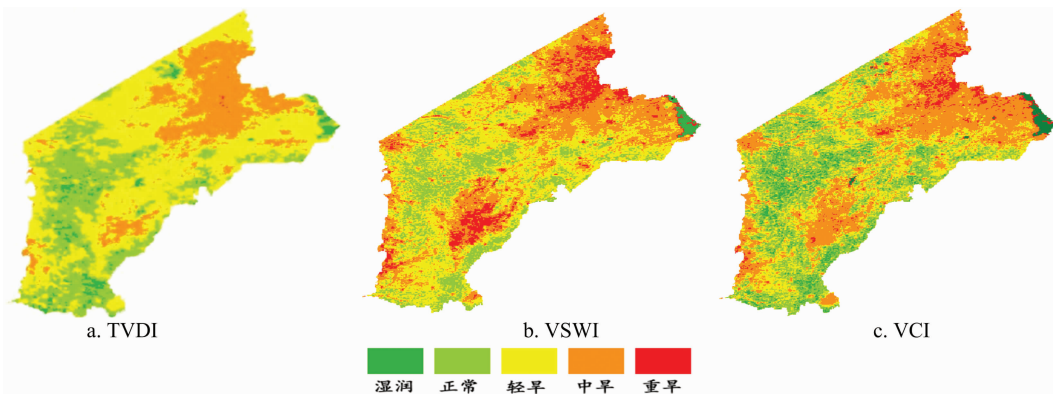


图4 2015 年 129 时次 TVDI、VSWI、VCI 干旱空间分布

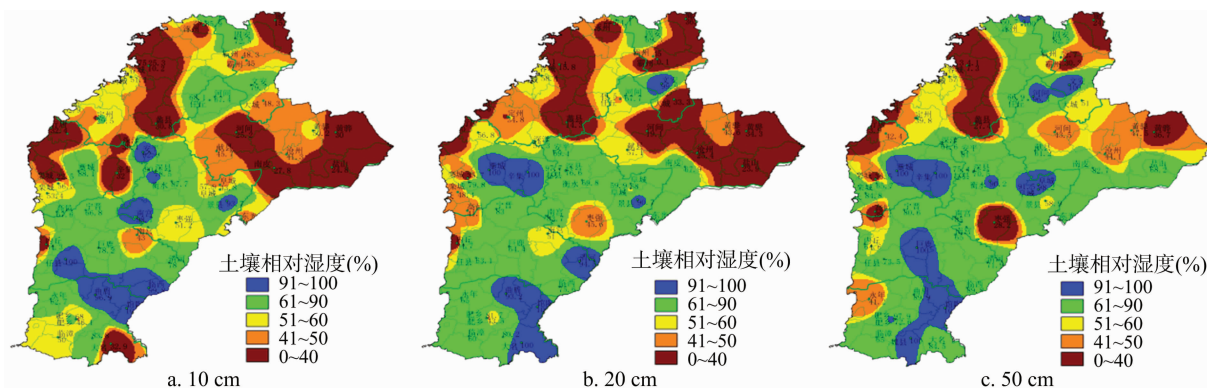


图5 2015 年 129 时次地面观测的 10、20、50 cm 深度土壤相对湿度

从表 2 可以看出,TVDI 与 10、20 cm 土壤相对湿度的相关性整体好于 VSWI、VCI,说明 TVDI 更适合河北省中南部平原地区的干旱监测,VSWI 次之,VCI 最差。分析冬小麦不同生长发育期与不同深度土壤相对湿度的相关性发现,在小麦返青期—拔节期(065、081 时次),植被指数相对较低,TVDI 与 10、20 cm 土壤相对湿度的相关系数与 VSWI 相当,而到了拔节期—抽穗期(097、113 时次)、抽穗期—乳熟期(129 时次)、乳熟期—成熟期(145、161 时次),TVDI 与 RSM 在 10、20 cm 的相关性均高于 VSWI,表明 TVDI 模型在中、高植被覆盖下干旱监测能力优势明显。TVDI、VSWI 综合了植被指数和地表温度 2 种参数,而 VCI 只是植被变化的表征。上述研究结论与前人研究结论存在一定差异,有人研究得出,TVDI 与 10 cm 处 RSM 的相关性优于 20 cm,50 cm 最差,而本研究结果为 20 cm 处 RSM 的相关性优于 10 cm,分析其原因可能是由于前人的土壤相对湿度验证数据为人工观测的,在样本取样时会加入人为判断因素影响,而本研究的验证数据选用

的是 2014 年 10 月以后的自动土壤墒情站观测数据,考虑到设备安装以及田间管理等因素,20 cm 处的数据采集结果较 10 cm 处更稳定,这可能是影响本研究结论与前人结论有所不同的原因。

3.3 对降水量的响应

TVDI 干旱遥感监测模型可以较好地反映表层土壤水分状况,而降水能够引起土壤水分含量的变化,为了比较 TVDI 监测结果与降水量之间的关系,选取栾城区、魏县、南宮市、黄骅市 4 个典型气象站点的降水资料进行分析,4 个站点在研究区域空间上分布较为均匀,且 4 个站点所在区域降水量有明显差异。从图 7 可以看出,总体上,TVDI 对降水量的变化较为敏感,TVDI 与降水量呈反相关关系,在一定时间段降水量较多时,TVDI 值较低,旱情较轻;反之,降水量较少时,TVDI 值较高,旱情变重。TVDI 低值伴随着较高的降水量;TVDI 高值则伴随着较低的降水量。在 065 时次(3 月 6 日至 3 月 21 日)前期均无降水,4 个站点的 TVDI 值都很高,旱情

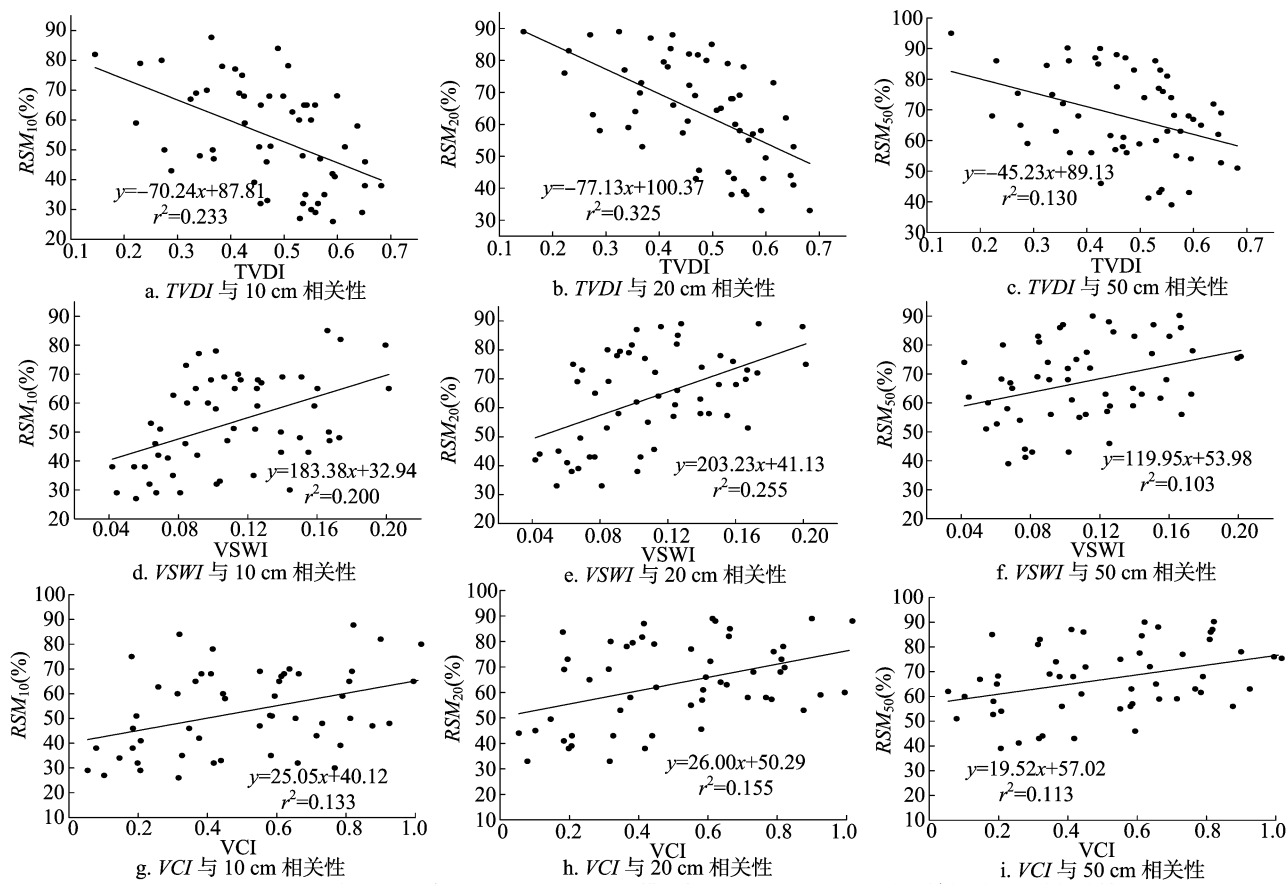


图6 2015 年 129 时次 TVDI、VSWI、VCI 模型与 10、20、50 cm 深度土壤相对湿度的相关性

表 2 河北省冬小麦不同生长发育期 3 种干旱遥感监测模型与不同深度土壤相对湿度的相关性

小麦生长发育期	TVDI 与 RSM 的相关系数			VSWI 与 RSM 的相关系数			VCI 与 RSM 的相关系数			样本数 (个)
	10 cm	20 cm	50 cm	10 cm	20 cm	50 cm	10 cm	20 cm	50 cm	
返青期—拔节期	0.178	0.256	0.163	0.196	0.263	0.132	0.174	0.251	0.186	96
拔节期—抽穗期	0.273	0.369	0.201	0.209	0.278	0.124	0.196	0.168	0.145	101
抽穗期—乳熟期	0.233	0.325	0.130	0.200	0.255	0.103 *	0.133	0.155	0.113 *	55
乳熟期—成熟期	0.227	0.308	0.172	0.198	0.236	0.135	0.142	0.156	0.128	89

注：“*”表示通过 0.05 的信度检验,其余均通过 0.01 信度检验。

较为明显;到了 081 ~ 097 时次(3 月 22 日至 4 月 21 日)栾城、魏县、黄骅、南宫的累积降水量分别为 22.5、47.8、29.6、29.6 mm,降水过程均集中在 3 月 31 日至 4 月 2 日,为 2015 年首场透雨,可以看出,首场透雨对改善土壤墒情、缓解旱情非常有利,气象部门抓住有利时机,在灌溉条件困难的地区开展人工增雨作业是十分必要的。随着前期累积降水量的增大,TVDI 值在一段时间内会保持在一个较低的水平,旱情较轻,即便后期降水量较少,仍不会出现较大的旱情,可见 TVDI 对前期总体降水量的响应较为敏感。

3.4 TVDI 在 FY3 数据上的应用

FY3 系列是我国自主研发的极轨气象卫星,由 FY3A、FY3B 和 FY3C 组成,其搭载的可见光红外扫描辐射计(VIRR)和中分辨率光谱成像仪(MERSI)与 MODIS 一样具备多光谱和高时间分辨率的特点,表 3 给出了 VIRR 和 MODIS 部分波段介绍,其中 VIRR 的第 1、2、7 通道和 MODIS 的第 1、2、3 通道用于反演增强型植被指数 EVI,VIRR 的第 4 和第 5 通道、MODIS 的第 31 和第 32 通道用于反演地表温度,两者的

空间分辨率均为 1 000 m^[23-24]。

为了探讨 FY3 与 MODIS 在干旱监测方面的差异,选用 2017 年 3 月 9 日 14:14 的 FY3B VIRR 数据和 2017 年 3 月 9 日 13:53 的 AQUA 卫星的 MODIS 数据(可以近似认为是同一时次)分别反演河北省中南部平原地区植被指数和地表温度。为了方便计算,使用 FY3B/VIRR 第 4 波段和 AQUA/MODIS 第 31 波段的亮温代替地表温度,由图 8 可以看出,FY3B-VIRR 数据与 AQUA-MODIS 数据在植被指数和地表温度上均具有较好的相关性, r^2 分别为 0.54 和 0.41。

图 9 是利用 TVDI 模型分别反演 FY3B-VIRR 和 AQUA-MODIS 的干旱空间分布,两者的相关性见图 10。可以看出,AQUA-MODIS 与 FY3B-VIRR 的 TVDI 干旱空间分布趋势基本保持一致,FY3B-VIRR 的 TVDI 细节更为明显;两者的 TVDI r^2 为 0.373,AQUA-MODIS 的 TVDI 值比 FY3B-VIRR 的 TVDI 值略偏大;FY3 在干旱监测能力上与 MODIS 基本相当,有力地证实了国产 FY3 卫星数据的可靠性和可用性较高。

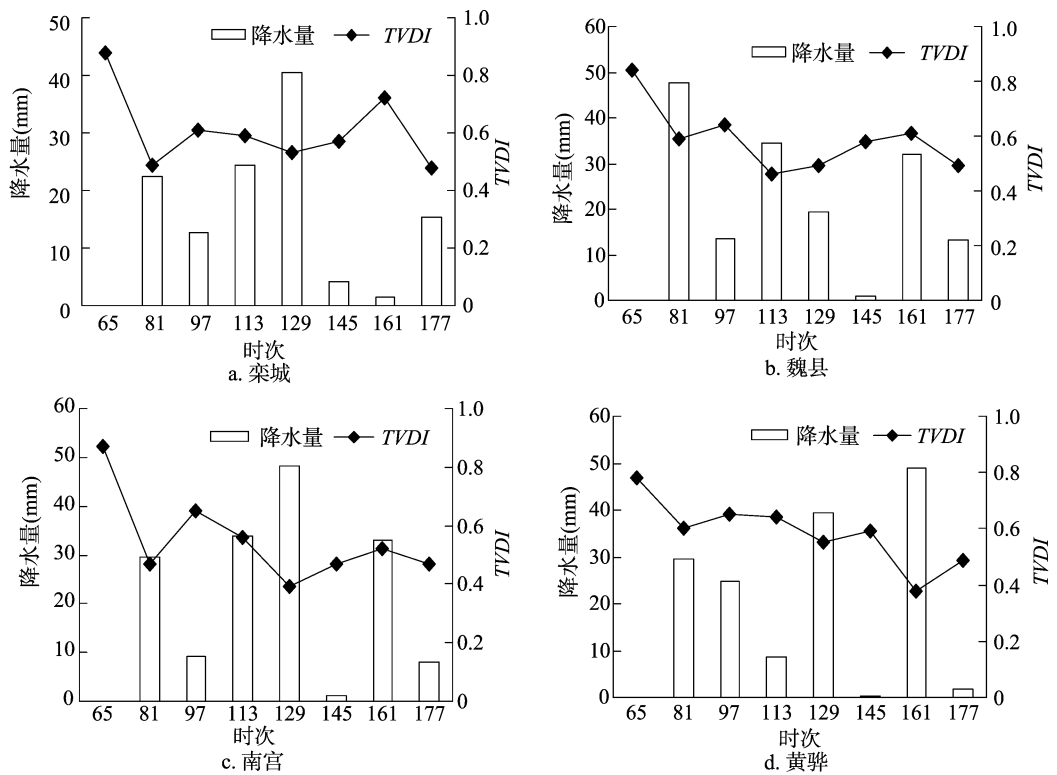


图7 2015 年 3 至 7 月 TVDI 与累积降水量的变化

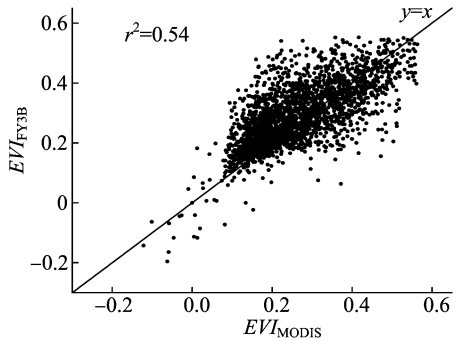
表 3 VIRR 和 MODIS 通道波段

VIRR		MODIS	
通道	波段(μm)	通道	波段(μm)
1	0.58 ~ 0.68	1	0.62 ~ 0.67
2	0.84 ~ 0.89	2	0.841 ~ 0.876
7	0.43 ~ 0.48	3	0.459 ~ 0.479
4	10.3 ~ 11.3	31	10.78 ~ 11.28
5	11.5 ~ 12.5	32	11.77 ~ 12.27

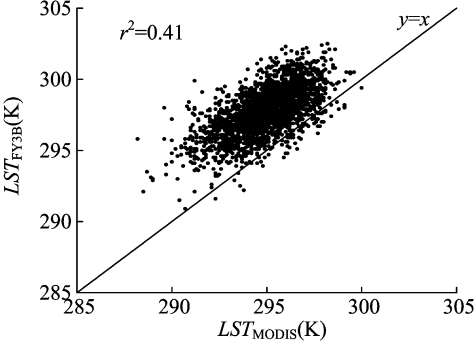
4 结论与讨论

本研究以河北省中南部平原地区为研究区,采用 MODIS 卫星遥感数据,基于植被指数 (NDVI、EVI) 和地表温度 (T_s) 等信息,构建 $T_s - VI$ 特征空间,拟合干边、湿边方程,对比研究了 TVDI、VSWI 和 VCI 等 3 种干旱遥感监测模型在河北地区的适用性,得出以下结论:

(1) TVDI 与不同深度土壤相对湿度的相关性最高,VSWI



a. FY3B 与 MODIS 的 EVI 比较



b. FY3B 与 MODIS 的 LST 比较

图8 AQUA/MODIS 与 FY3B/VIRR 植被指数和地表温度相关性

次之,VCI 最差;3 种模型与 20 cm 深土壤相对湿度相关性最高,10 cm 深土壤的相关性次之,50 cm 深土壤的相关性最差。说明 TVDI 模型更适合河北省中南部的干旱监测。

(2) 在低植被覆盖的情况下,TVDI 与 VSWI 干旱监测能力相当,而在中、高植被覆盖的情况下,TVDI 优势明显;在高值区,NDVI 较 EVI 更容易达到饱和,EVI 对高植被覆盖区域的变化较 NDVI 更为敏感。

(3) 研究 TVDI 与降水量的关系发现,TVDI 与降水量呈

反相关关系,TVDI 对前期总体降水量的响应较为敏感。

(4) FY3 和 MODIS 的干旱空间分布高度一致,FY3 在干旱监测能力上与 MODIS 基本相当。

由于 MODIS 数据为 1 000 m 空间分辨率数据,土壤墒情站地面实测数据为点数数据,两者在空间尺度上差异较大,今后可以考虑引入更高分辨率的遥感数据进行分析。另外,不同干旱遥感监测模型都有其适用性和局限性,考虑到利用植被指数、地表温度等多因子构建的模型结果优于单因子,在今后

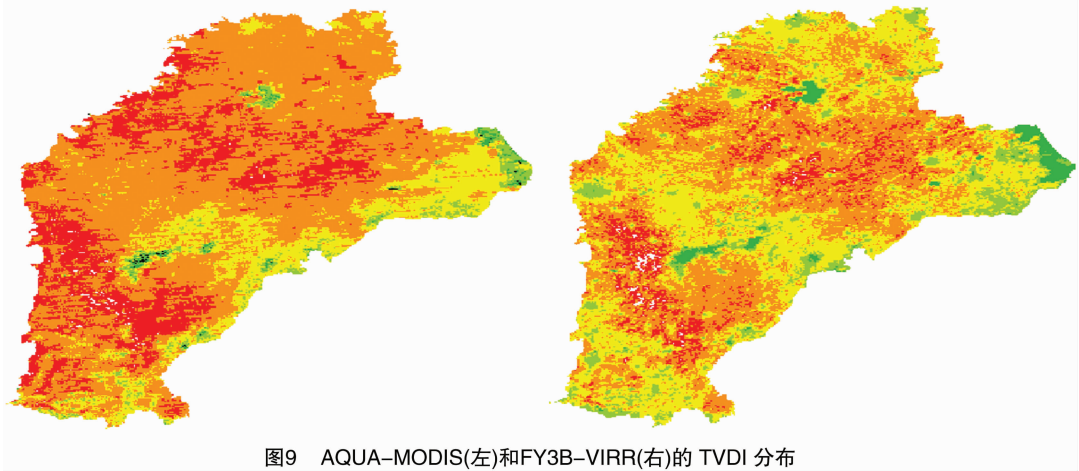


图9 AQUA-MODIS(左)和FY3B-VIRR(右)的 TVDI 分布

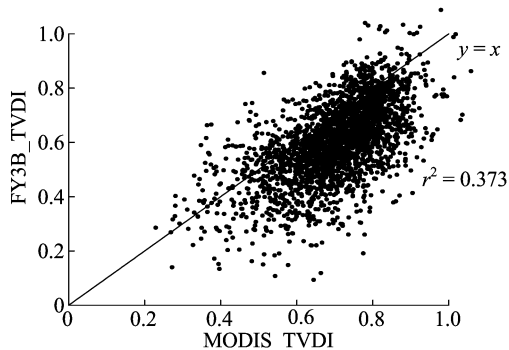


图10 AQUA/MODIS 与 FY3B/VIRR TVDI 的相关性

的模型研究中,应引入其他因子进行模型改进。

参考文献:

- [1]王静爱,孙恒,徐伟,等.近50年中国旱灾的时空变化[J].自然灾害学报,2002,11(2):1-6.
- [2]Sun W, Wang P X, Zhang S Y, et al. Using the vegetation temperature condition index for time series drought occurrence monitoring in the Guanzhong Plain, P R China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(17/18): 5133-5144.
- [3]张树誉,李慧,王鹏新,等.条件植被温差指数干旱监测方法的研究与应用[J].干旱区资源与环境,2014,28(4):118-122.
- [4]王慧慧,周廷刚,杜嘉,等.温度植被旱情指数在吉林省干旱监测中的应用[J].遥感技术与应用,2013,28(2):324-329.
- [5]车少静,李春强,申双和.基于SPI的近41年(1965—2005)河北省旱涝时空特征分析[J].中国农业气象,2010,31(1):137-143.
- [6]郑有飞,程晋昕,吴荣军,等.农业旱情遥感监测的一种改进方法及其应用[J].应用生态学报,2013,24(9):2608-2618.
- [7]李新辉,宋小宁,周霞.半干旱区土壤湿度遥感监测方法研究[J].地理与地理信息科学,2010,26(1):90-93.
- [8]Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(5): 940-948.
- [9]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 radiant temperature[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(15): 3145-3166.
- [10]王鹏新,龚健雅,李小文.条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用[J].武汉大学学报(信息科学版),2001,26(5):412-418.
- [11]Sandholt I, Rasmussen K, Anderson 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.
- [12]李春强,李红军. TVDI 在冬小麦春季干旱监测中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(2): 161-165.
- [13]张喆,丁建丽,李鑫,等. TVDI 用于干旱区农业旱情监测的适宜性[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 220-227.
- [14]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.
- [15]李红军,郑力,雷玉平,等. 植被指数-地表温度特征空间研究及其在旱情监测中的应用[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 170-174.
- [16]姚丹丹,苗放,陈军. 基于 MODIS 的四川省干旱遥感监测不同方法的比较[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(9): 2097-2101.
- [17]刘立文,张吴平,段永红,等. TVDI 模型的农业旱情时空变化遥感应用[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3704-3711.
- [18]王博为,王永前,杨世琦. 基于 FY-3A/VIRR 卫星数据的干旱监测研究——以 2011 年重庆地区为例[J]. 成都信息工程大学学报, 2016, 31(6): 637-644.
- [19]Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection[J]. Advances in Space Research, 1995, 15(11): 91-100.
- [20]于敏,程明虎,刘辉. 地表温度-归一化植被指数特征空间干旱遥感监测方法的改进及应用研究[J]. 气象学报, 2011, 69(5): 922-931.
- [21]于敏,程明虎. 基于 NDVI-Ts 特征空间的黑龙省干旱监测[J]. 应用气象学报, 2010, 21(2): 221-228.
- [22]王秀君,陈健. 基于 LST-EVI 特征空间的土壤水分含量反演[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(1): 46-53.
- [23]韩涛,蒋友严. 基于 FY3/MERSI 数据的干旱监测[J]. 草业科学, 2014, 31(9): 1645-1652.
- [24]权文婷,周辉,李红梅,等. FY3C/MERSI 与 MODIS 的多波段干旱指数反演及对比分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(4): 835-842.