

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.05.010

基于 NDVI-ST 双抛物线特征空间的冬小麦旱情遥感监测*

刘英¹ 马保东² 吴立新³ 林亚卫¹

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;
2. 东北大学测绘遥感与数字矿山研究所, 沈阳 110004;
3. 北京师范大学减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

【摘要】 以河南省冬小麦旱情遥感监测为例,利用 MODIS/AQUA 卫星产品的归一化植被指数(NDVI)、增强型植被指数(EVI)、叶面积指数(LAI)和地表温度(ST)数据,分析了 NDVI-ST 和 EVI-ST 的特征空间,发现 NDVI-ST 和 EVI-ST 的特征空间具有双抛物线型特征。将其与三角形 NDVI-ST、EVI-ST 及 LAI-ST 特征空间进行对比分析,并将得到的温度植被干旱指数(TVDI)数据与土壤湿度进行相关性分析,揭示双抛物线型 NDVI-ST 特征空间能更好地反映地表 10 cm 土壤水分状况。以双抛物线型 NDVI-ST 特征空间得到的 TVDI 作为旱情遥感监测指标,评估了 2011-02-26~2011-05-16 河南省冬小麦旱情,并与当地气象站降雨数据对比,揭示了 2011 年春天河南省旱情发展的总体时空特点。

关键词: 冬小麦 旱情 遥感监测 温度植被干旱指数 双抛物线型

中图分类号: S127; S165+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)05-0055-09

Drought Remote Sensing for Winter Wheat Based on Double Parabola NDVI-ST Space

Liu Ying¹ Ma Baodong² Wu Lixin³ Lin Yawei¹

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China
2. Institute for Geoinformatics and Digital Mine Research, Northeastern University, Shenyang 110004, China
3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract

Take the drought remote sensing for winter wheat in He'nan province as an example, the normalized difference vegetation index (NDVI), enhanced vegetation index (EVI), leaf area index (LAI) and land surface temperature (ST) data from MODIS/AQUA were applied to analyze NDVI-ST space and EVI-ST space. It was discovered that NDVI-ST and EVI-ST spaces were double parabola as compared with NDVI-ST, EVI-ST and LAI-ST triangle or trapezoidal space. The relationship between TVDI and soil moisture was analyzed with the obtained TVDI derived from the spaces. The results show that the NDVI-ST double parabola space is better than the others to reflect the 10 cm-depth soil moisture. Based on the TVDI obtained from the NDVI-ST double parabola space, the drought situation in He'nan province, from February 26, 2011 to May 16, 2011 was evaluated. Compared with the raining data observed by local weather stations, the general spatio-temporal features of the drought situation of winter wheat in He'nan in the spring of 2011 was revealed.

Key words Winter wheat, Drought, Remote sensing, Temperature vegetation dryness index, Double parabola curvature

收稿日期: 2011-06-30 修回日期: 2011-11-03
* 地表过程与资源生态国家重点实验室(北京师范大学)资助项目(2009-KF-16)
作者简介: 刘英, 博士生, 主要从事干旱、土壤水分遥感监测研究, E-mail: liuying712100@163.com

引言

卫星遥感因其监测范围广、多时相、多光谱等特点,近年被广泛用于旱情监测^[1]。旱情遥感监测方法主要有温度植被干旱指数法(temperature vegetation dryness index,简称 TVDI)、热惯量法、微波法等,其中 TVDI 被广为采用。国外 Price^[2]、Carlson 等^[3]研究发现当植被覆盖和土壤湿度变化范围较大时,以归一化植被指数(normalized difference vegetation index,简称 NDVI)为横轴和以地表辐射温度(ST)为纵轴的散点图特征空间呈三角形;Moran 等^[4]则认为 NDVI-ST 特征空间呈梯形;Sandholt 等^[5]提出了 TVDI 计算方法;Naira^[6]、Chi-Farn等^[7]分别用 TVDI 监测了 Mackenzie 流域和 Mekong Delta 水稻区的土壤水分状况,得出 TVDI 与降水量呈负相关关系。

国内,王鹏新等^[8]提出条件植被温度指数(vegetation temperature condition index,简称 VTCI);孙丽等^[9]用 TVDI 和植被供水指数(vegetation supply water index,简称 VSWI)监测了中国冬小麦旱情,对比表明 TVDI 比 VSWI 更能体现区域旱情变化趋势;Han Lijuan 等^[10]指出当 NDVI 达到饱和后,

可用叶面积指数 I_c (leaf area index, 简称 LAI) 的 LAI-ST 特征空间代替 NDVI-ST 特征空间;Yuan Lu 等^[11]建立了增强型植被指数(enhanced vegetation index,简称 EVI)的 EVI-ST 特征空间并监测广西旱情,指出改进型 TVDI 能有效评估旱情变化状况。

NDVI-ST 特征空间虽经不断改进,但主要局限为三角形和梯形两种。本文以河南省冬小麦旱情遥感监测为例,应用 MODIS/AQUA 卫星数据分析揭示 NDVI-ST、EVI-ST 特征空间具有双抛物线型特征,并考察据此计算的 TVDI 用于河南省冬小麦旱情遥感的监测效果。

1 研究区域

河南省是我国农业大省,土地利用类型以耕地为主,耕地约占全省土地面积 69.18% (图 1),是我国冬小麦、夏玉米等粮食作物的主要产区。整个生长季节小麦需水量约 450 mm^[12];立春后,小麦进入返青期,需水量明显增加;随气温回升,田间蒸发量加大,旱情可能迅速发展,对小麦返青生长和分蘖极为不利,进而危及夏粮丰收。因此,河南省冬小麦旱情遥感监测意义重大。

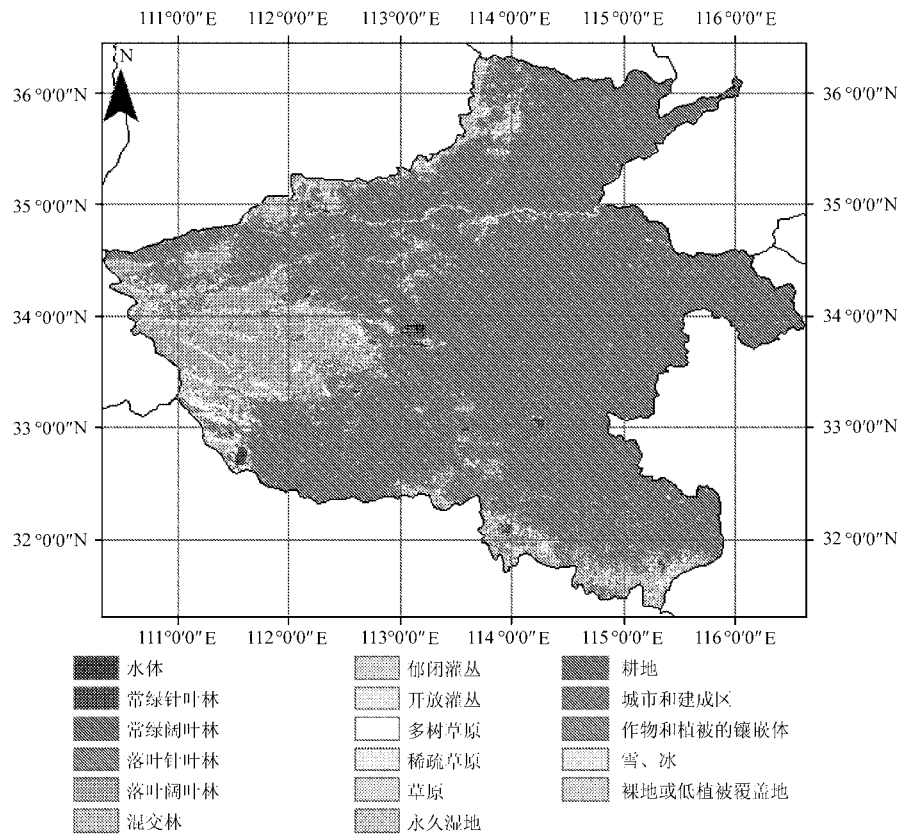


图 1 河南省土地利用类型

Fig. 1 Land use type in He'nan province

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

MODIS/AQUA 卫星数据从 NASA WIST 网站下载。采用 2011-02-26~2011-05-16 的数据产品 MYD13A2、MYD11A2 和 MYD15A2，以此监测 2011 年春天河南省冬小麦旱情变化。

从 MYD13A2 中获取 16 d 合成的 NDVI 和 EVI 数据，从 MYD11A2 和 MYD15A2 中分别获取 8 d 合成的 ST 和 LAI 数据，并将 MODIS 数据从 Sinusoidal 投影转换为地理经纬度投影。为使 ST、LAI 与 NDVI 和 EVI 数据时间分辨率保持一致，利用最大值合成法将 ST 和 LAI 进行 16 d 合成，进而获得 2011-02-26~2011-05-16 河南省每 16 d 的 NDVI、EVI、ST 和 LAI 数据。利用 JAVA 语言编程，以 0.01 为步长提取了研究区每个 NDVI、EVI 和 LAI 值（精度 0.001）所对应的最高、最低地表温度。

2.2 旱情分析方法

Sandholt 等^[5] 基于 NDVI-ST 三角形或梯形特征空间，提出了温度植被干旱指数 (TVDI)，计算公式为

$$I_T = \frac{T_s - T_{smin}}{T_{smax} - T_{smin}}$$

式中 I_T ——温度植被干旱指数 (TVDI)

T_s ——地表温度, K

T_{smin} ——相同 NDVI 的最小地表温度，对应 NDVI-ST 特征空间的湿边

T_{smax} ——相同 NDVI 的最大地表温度，对应 NDVI-ST 特征空间的干边

T_{smax} 和 T_{smin} 可通过 NDVI-ST 特征空间干、湿边模拟得到，即

$$T_{smax} = a_1 + b_1 I_N$$

$$T_{smin} = a_2 + b_2 I_N$$

式中 $a_1、b_1、a_2、b_2$ ——干湿边方程拟合系数

I_N ——归一化植被指数 (NDVI)

显然，TVDI 的取值范围是 0 到 1。TVDI 越大， T_s 越接近干边，越干旱；反之 TVDI 越小， T_s 越接近湿边，越湿润。

以往研究利用 NDVI-ST 三角形或梯形特征空间计算 TVDI 的原理为： T_{smax} 与 NDVI 呈线性关系，随着 NDVI 的增加， T_{smax} 线性减小；且一般认为^[9,11,13]：当 NDVI 小于 0.15 时，陆地表面是裸地，线性拟合时不予考虑。本文研究发现：当 NDVI 小于 0.15 时，存在随 NDVI 减少而 T_{smax} 非线性减少的现象 (图 2)，这与传统的三角形或梯形 NDVI-ST 特征空间认知是相背的。根据河南省 MODIS 数据

分析 NDVI 小于 0.15 部分的土地利用类型，得 NDVI 小于 0.15 部分主要为水体、建设用地和耕地，其中耕地约占 22.39%。如将 NDVI 小于 0.15 部分在特征空间拟合中去掉，发现此时 NDVI-ST 特征空间呈现明显三角形。

利用此特征空间分析河南省旱情，并与双抛物线型 NDVI-ST 特征空间计算的旱情进行对比，发现两者计算的旱情状况相似，但在土壤湿度数据 (soil moisture，简称 SM) 与 TVDI 进行相关性分析时，发现双抛物线型 NDVI-ST 特征空间 TVDI 值与 SM 的相关系数基本上均高于三角形 NDVI-ST 特征空间 TVDI 值与 SM 的相关系数。故认为耕地虽只约占到 NDVI 小于 0.15 部分的 22.39%，但把 NDVI 小于 0.15 部分考虑进来整体计算双抛物线型 NDVI-ST 特征空间，更能真实反映地表状况。

因此，本文将 NDVI 扩展到 0.15 以内，提出了 NDVI-ST 和 EVI-ST 的双抛物线型特征空间及其 TVDI 计算方法。 $T_{smax}、T_{smin}$ 的干、湿边模拟算法为

$$T_{smax} = a_1 I_N (I_E)^2 + b_1 I_N (I_E) + c_1$$

$$T_{smin} = a_2 I_N (I_E)^2 + b_2 I_N (I_E) + c_2$$

式中 $c_1、c_2$ ——干湿边方程拟合系数

I_E ——增强型植被指数 (EVI)

3 结果与分析

3.1 NDVI-ST、EVI-ST 和 LAI-ST 特征空间

处理得到了 NDVI-ST、EVI-ST 和 LAI-ST 特征空间干、湿边散点图 (图 2)。可见：NDVI-ST、EVI-ST 特征空间均呈双抛物线型， R^2 最大值达到了 0.9 以上。利用 2006—2010 年 2 月 26 日~5 月 16 日的 NDVI、EVI、LAI 和 ST 数据对双抛物线型特征空间进一步验证。可得，NDVI-ST 特征空间干边均为极大值向下开口抛物线，湿边为极小值向上开口的抛物线；总体上，EVI-ST 特征空间干边均为极大值向下开口的抛物线，湿边抛物线在 03-30~04-30 向下开口，其余时期向上开口，具有上下对应关系。

2011-02-26~2011-03-29，LAI-ST 特征空间呈明显三角形，而后呈明显梯形，这与 Han Lijuan 等^[10] 提出的早期植被覆盖度比较低时应采用三角形特征空间，随着植被覆盖度增加应采用梯形特征空间的观点相吻合。随入春转暖，植被指数增加 (图 3)，NDVI-ST 和 LAI-ST 特征空间中的湿边散点图由双曲线渐变为近似水平线 (图 2)。

3.2 TVDI 与土壤湿度相关性分析

尽管本文采用的 1 km 分辨率 MODIS 数据与气象站点数据难以在空间上精确对应，但气象站点数

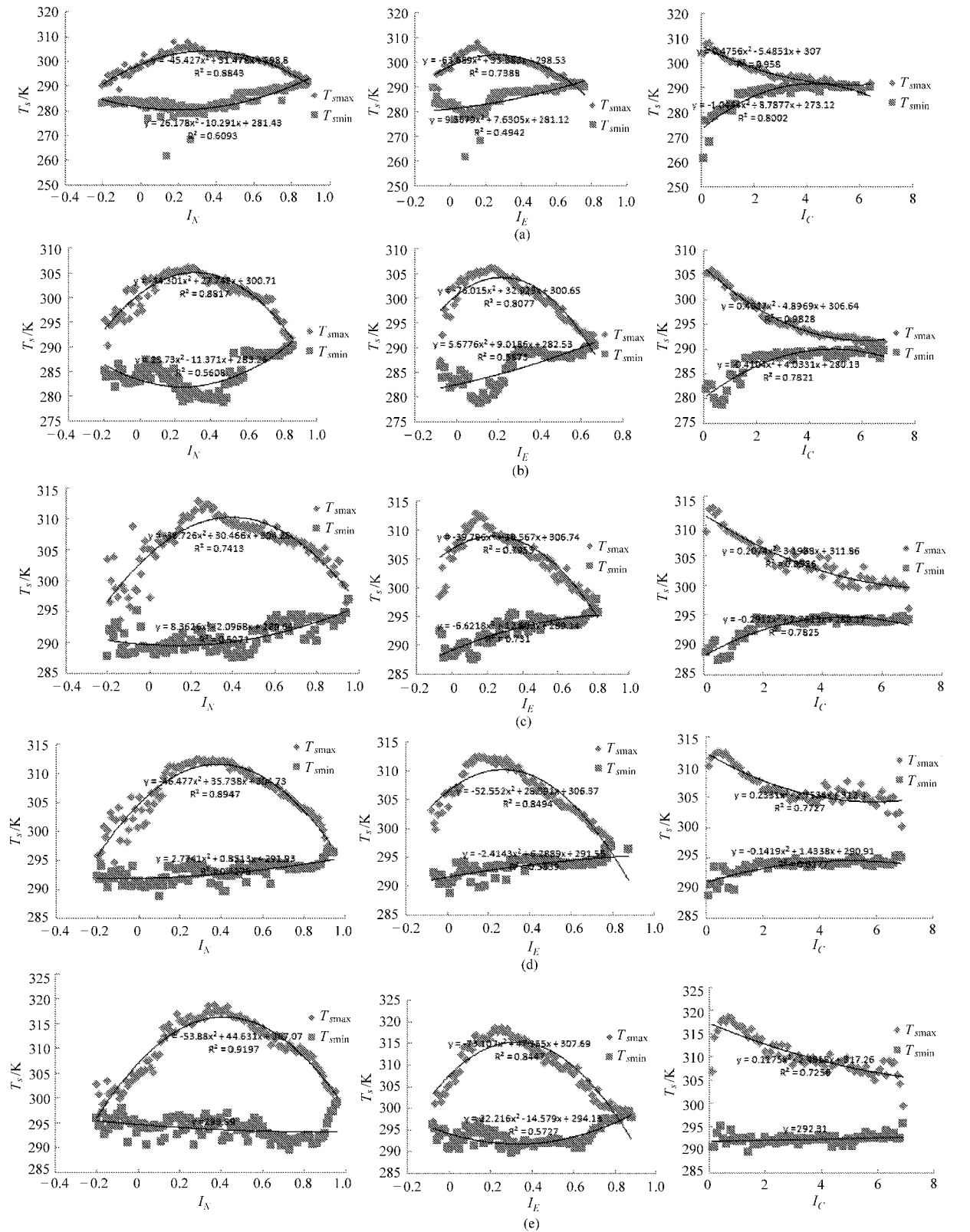


图2 河南省NDVI-ST、EVI-ST和LAI-ST特征空间干、湿边散点图

Fig.2 Scatter plots of dry and wet edges in NDVI-ST, EVI-ST and LAI-ST space of He'nan province

(a) 2011-02-26 ~ 2011-03-13 (b) 2011-03-14 ~ 2011-03-29 (c) 2011-03-30 ~ 2011-04-14
(d) 2011-04-15 ~ 2011-04-30 (e) 2011-05-01 ~ 2011-05-16

据代表的是一定范围的平均气象特点。因此,可利用气象站数据对遥感反演的TVDI进行验证^[9]。利用河南省17个气象站点观测的10 cm和20 cm深度土壤湿度数据与其对应的3×3像元的TVDI平均值进行相关性分析。以SM为横坐标,以双抛物线型NDVI-ST、EVI-ST特征空间及三角形LAI-ST

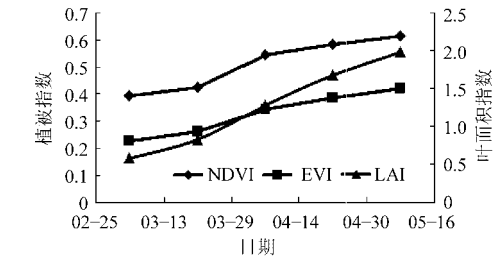


图 3 河南省春天植被指数变化图

Fig. 3 Vegetation indexes change of He'nan in spring

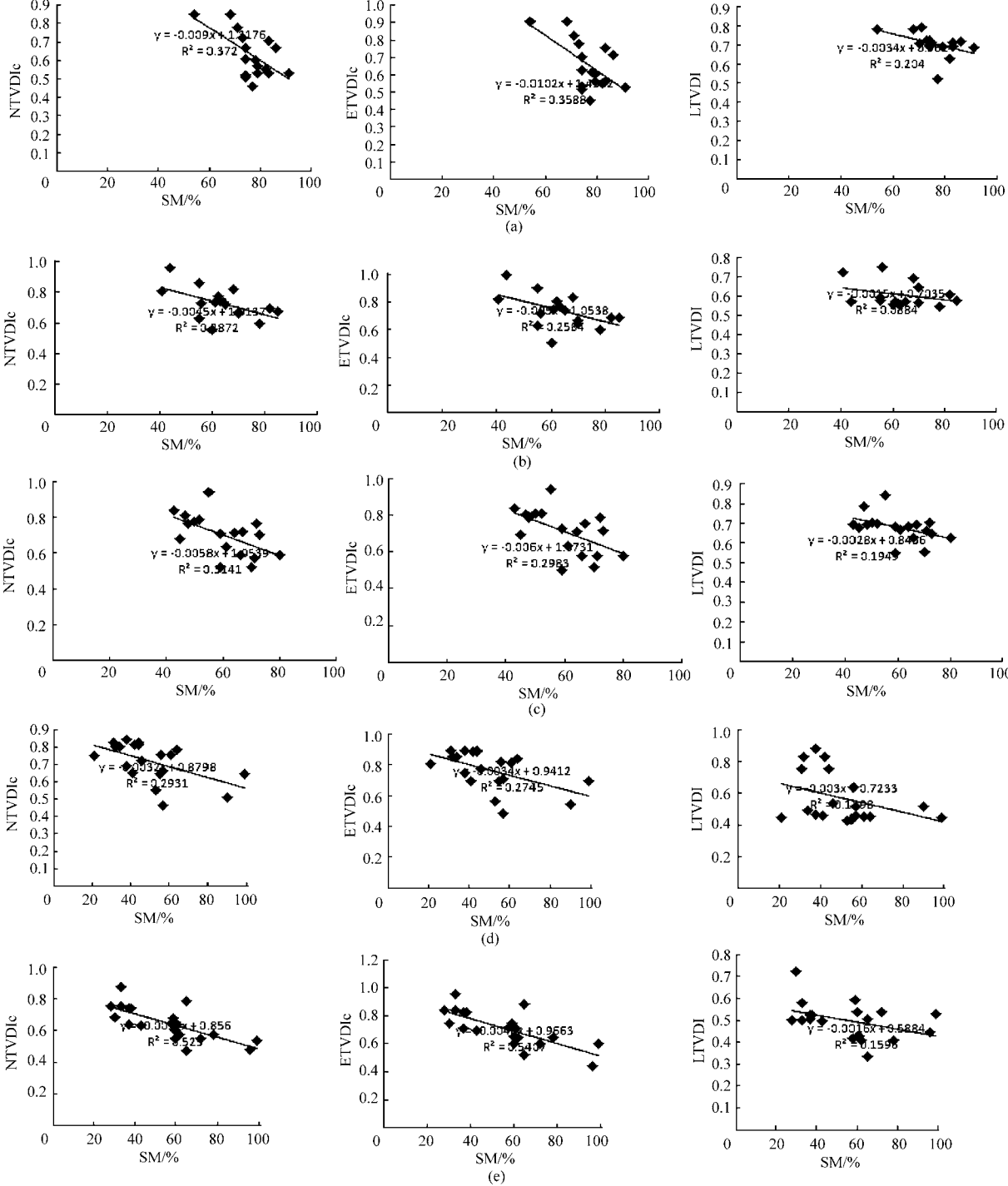


图 4 10 cm 深度土壤湿度与 TVDI 的关系

Fig. 4 Relationship between soil moisture in depth 10 cm and TVDI

(a) 2011-02-26 ~ 2011-03-13 (b) 2011-03-14 ~ 2011-03-29 (c) 2011-03-30 ~ 2011-04-14

(d) 2011-04-15 ~ 2011-04-30 (e) 2011-05-01 ~ 2011-05-16

特征空间反演得到的 NTVDI_c、ETVDI_c、LTVDI 为横坐标,构建了 SM-TVDI 散点图(图 4、5),并计算其相关系数(表 1、2)。

由图 4、5 和表 1、2 可知:随 TVDI 增大,10 cm、20 cm 深度土壤湿度均呈明显减小趋势。经 *F* 检验发现,各时期 NTVDI_c、ETVDI_c 与 10 cm 深度 SM 的回归方程均通过了显著性检验(*p* = 0.05),且前者的拟合度更高;LTVDI 和 10 cm 深度 SM 的回归方程

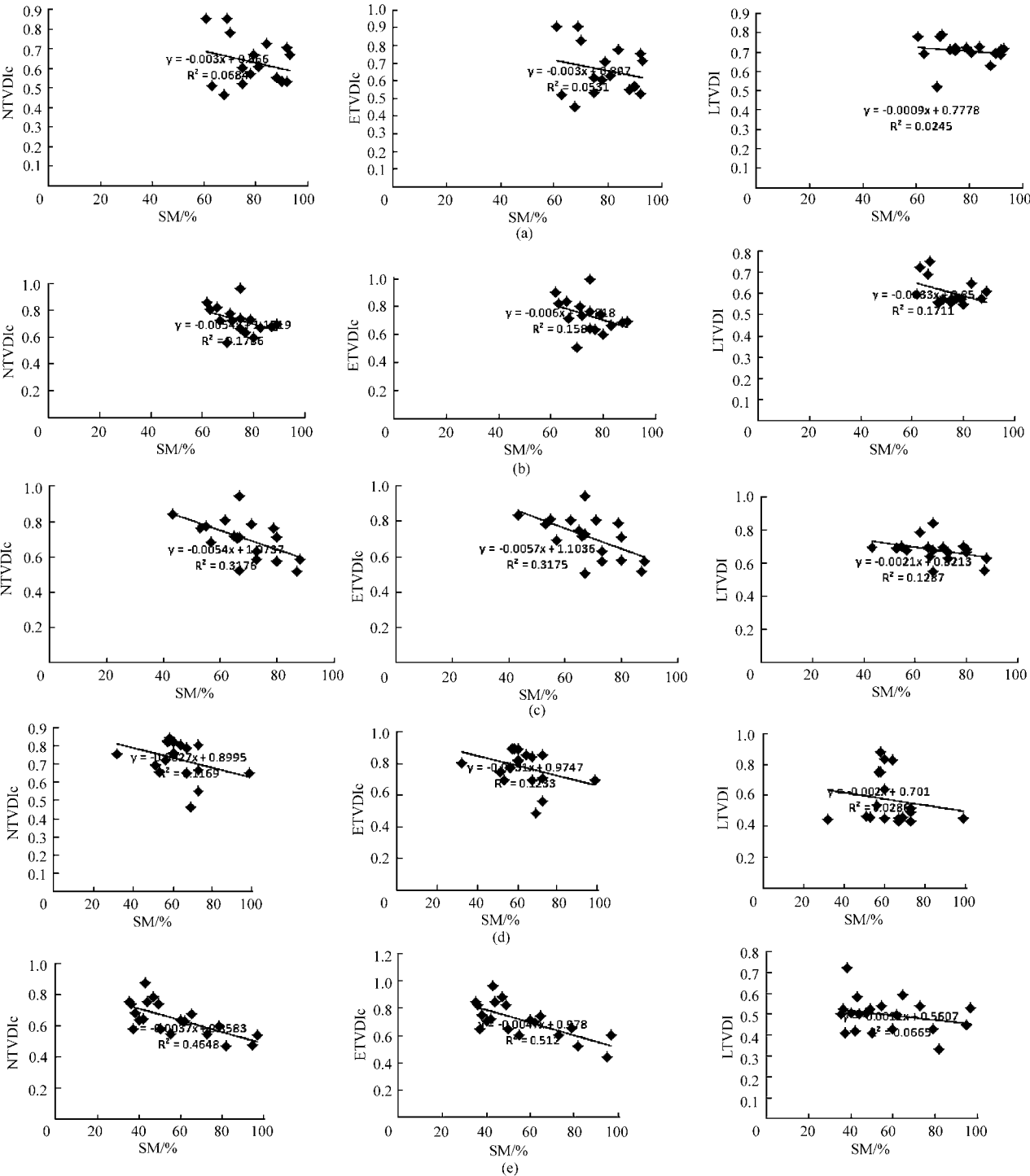


图5 20 cm 深度土壤湿度与 TVDI 的关系

Fig.5 Relationship between soil moisture in depth 20 cm and TVDI

(a) 2011-02-26 ~ 2011-03-13 (b) 2011-03-14 ~ 2011-03-29 (c) 2011-03-30 ~ 2011-04-14
(d) 2011-04-15 ~ 2011-04-30 (e) 2011-05-01 ~ 2011-05-16

表1 TVDI 与 10 cm 深度土壤湿度线性相关系数 R^2

Tab.1 Linear correlation R^2 between TVDI and 10 cm soil moisture

时间	NTVDIc	NTVDIt	ETVDIc	ETVDIt	LTVDI
2011-02-26 ~ 2011-03-13	0.372 0 ***	0.298 4 **	0.358 8 **	0.265 6 **	0.204 0 *
2011-03-14 ~ 2011-03-29	0.287 2 **	0.242 9 *	0.258 4 **	0.274 7 **	0.088 4
2011-03-30 ~ 2011-04-14	0.314 1 **	0.129 8	0.298 3 **	0.174 0	0.194 9 *
2011-04-15 ~ 2011-04-30	0.293 1 **	0.277 1 **	0.274 5 **	0.295 4 **	0.139 8
2011-05-01 ~ 2011-05-16	0.527 0 ***	0.618 3 ***	0.540 7 ***	0.632 6 ***	0.159 6

注:***、**、* 分别表示通过 99%、95%、90% 显著性检验。

表 2 TVDI 与 20 cm 深度土壤湿度线性相关系数 R^2

Tab.2 Linear correlation R^2 between TVDI and 20 cm soil moisture

时间	NTVDIc	NTVDIt	ETVDIc	ETVDIt	LTVDI
2011-02-26~2011-03-13	0.068 4	0.074 4	0.053 1	0.046 9	0.024 5
2011-03-14~2011-03-29	0.178 6	0.194 7 *	0.158 0	0.185 8 *	0.171 1
2011-03-30~2011-04-14	0.317 6 **	0.134 3	0.317 5 **	0.145 8	0.128 7
2011-04-15~2011-04-30	0.116 9	0.079 1	0.123 3	0.098 4	0.028 6
2011-05-01~2011-05-16	0.478 6 ***	0.348 8 **	0.512 0 ***	0.412 4 ***	0.066 5

注：***、**、* 分别表示通过 99%、95%、90% 显著性检验。

只有两个时期通过了显著性检验 ($p = 0.1$) ; 20 cm 深度 SM 与 TVDI 的回归方程只有很少部分通过了显著性检验。总体来看,双抛物线型 NDVI-ST 特征空间在监测旱情方面优于 EVI-ST 和 LAI-ST 特征空间;NTVDIc、ETVDIc、NTVDIt (来自三角形 NDVI-ST 特征空间)、ETVDIt (来自三角形 EVI-ST 特征空间)和 LTVDI 均能反映 10 cm 深度土壤水分状况,可用于 10 cm 深度土壤湿度和旱情遥感监测与评估;在监测 10 cm 深度土壤水分状况方面,NTVDIc 优于 ETVDIc,而 ETVDIc 优于 LTVDI; NTVDIc 优于 NTVDIt,而 ETVDIc 与 ETVDIt 则在不同时期各有优劣。

进一步利用 2010、2011 年 10 cm 和 20 cm 深度土壤湿度数据与 2010 年 TVDI 进行相关分析,发现 2010 年 TVDI 不仅与当期土壤湿度数据具有显著线性相关关系,且与 2011 年土壤湿度数据存在线性相关关系。故用双抛物线型特征空间进行干旱监测是合理可行的。

3.3 旱情遥感分析

利用双抛物线型 NDVI-ST 特征空间计算的 TVDI 分析冬小麦旱情情况。将干旱状况划分成 5 类^[13],即极湿润(TVDI 为 0~0.2);湿润(TVDI 为 0.2~0.4);正常(TVDI 为 0.4~0.6);干旱(TVDI 为 0.6~0.8);极干旱(TVDI 为 0.8~1)。利用 ArcGI S9.3,制作了河南省 2011-02-26~2011-05-16 旱情等级时空分布图(图 6),并利用实时日降水数据进行了验证。揭示河南省旱情的动态变化特点为:

(1) 2011-02-26~2011-03-13:旱情主要分布在西部、东北部和南部局地。2011-02-27、2011-03-01 分别有一次覆盖全省的降水:最大降水量分别为 16.88 mm、14.9 mm,但主要在豫东;最小降水量为 1.69 mm、1.02 mm,主要在豫西。因此,豫西旱情未能有效缓解。

(2) 2011-03-14~2011-03-29:西部和东北部局地干旱加重。2011-03-20~2011-03-21 虽有降水,但降水量均值只有 4.36 mm 和 9.77 mm,降水很快被蒸发和吸收,未能有效缓解旱情。

(3) 2011-03-30~2011-04-14:旱情仍主要集中在西部,东部旱情得到缓解。2011-04-03 有几乎覆盖全省的降水,且最大降水量主要集中在东部地区,故豫西旱情仍未能缓解。

(4) 2011-04-15~2011-04-30:西部局地旱情得到缓解,但豫南旱情加重。2011-04-21 除南部地区外全省有一次降水,但最大降水主要集中在东北部。

(5) 2011-05-01~2011-05-16:全省旱情普遍得到缓解。2011-05-03、2011-05-10、2011-05-11 各有一次几乎覆盖全省的降水,有效满足了冬小麦抽穗灌浆期对水分的需求,缓解了旱情。

进一步分析了双抛物线型 NDVI-ST 特征空间干边(其决定了区域干旱程度)的主轴、顶点、焦点参数、顶点的曲率半径随干旱发展变化的规律。通过计算干边的主轴、顶点、焦点参数、顶点的曲率半径发现:干旱情况越严重,干边的曲率半径、焦点跨度(指干边抛物线与 x 轴交点之间的绝对距离)越小;反之,随着干边的曲率半径、焦点跨度的增加,干旱比例越大(指 TVDI 大于 0.6 的像元占总像元数的比例),旱情也越严重(图 7)。

4 结束语

利用 MODIS/AQUA 卫星遥感产品 NDVI、EVI、LAI 和地表温度(ST)数据,对 2011 年春季河南省冬小麦旱情进行了遥感监测与分析,表明 NDVI-ST、EVI-ST 和 LAI-ST 三角形或梯形特征空间并不能完整描述植被指数与地表辐射温度的关系。本文将 NDVI 扩展到 0.15 以内,提出 NDVI-ST 和 EVI-

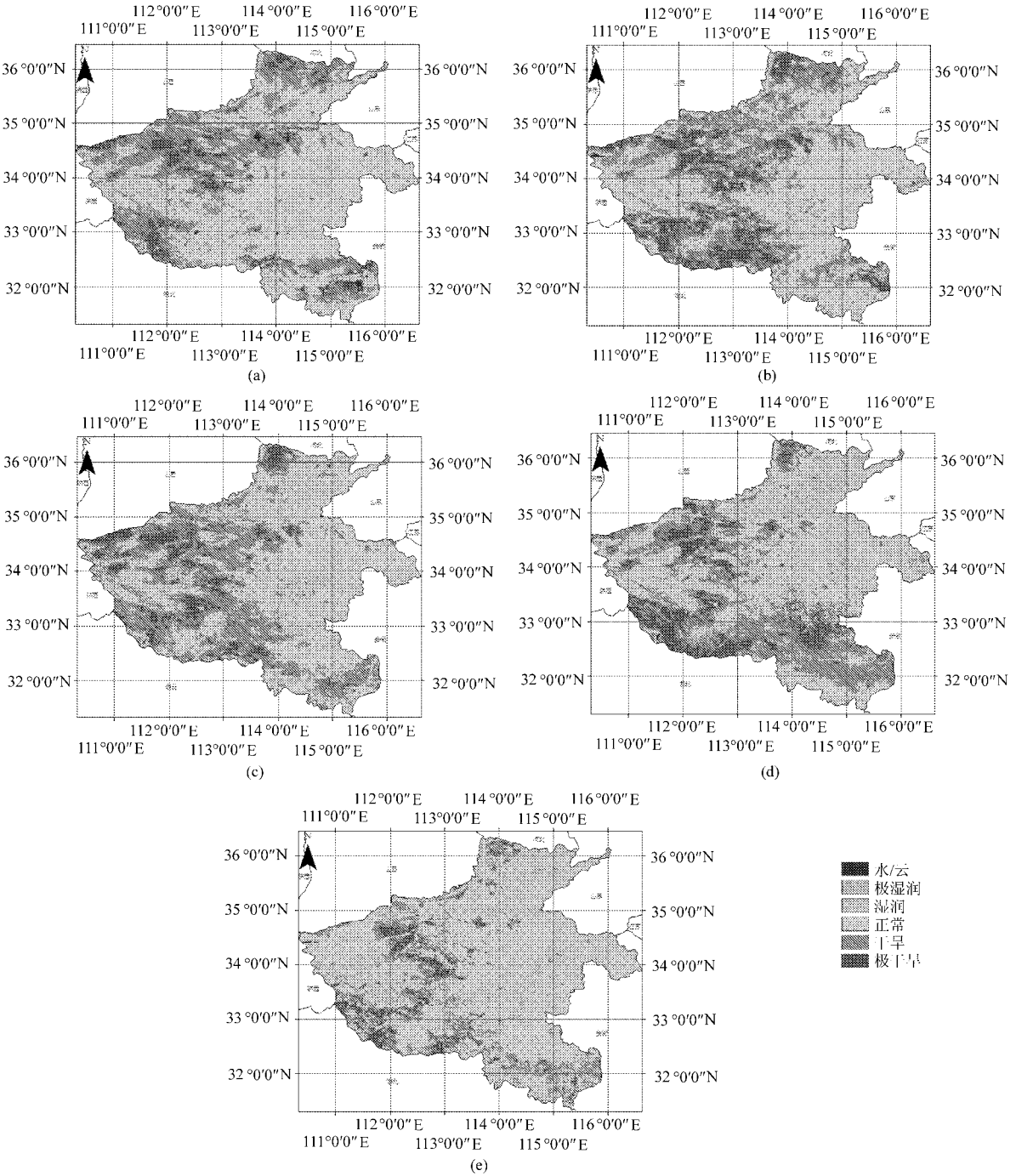


图 6 河南省旱情等级时空变化图

Fig. 6 Drought grade spatio-temporal variation in He'nan province

(a) 2011-02-26 ~ 2011-03-13 (b) 2011-03-14 ~ 2011-03-29 (c) 2011-03-30 ~ 2011-04-14
(d) 2011-04-15 ~ 2011-04-30 (e) 2011-05-01 ~ 2011-05-16

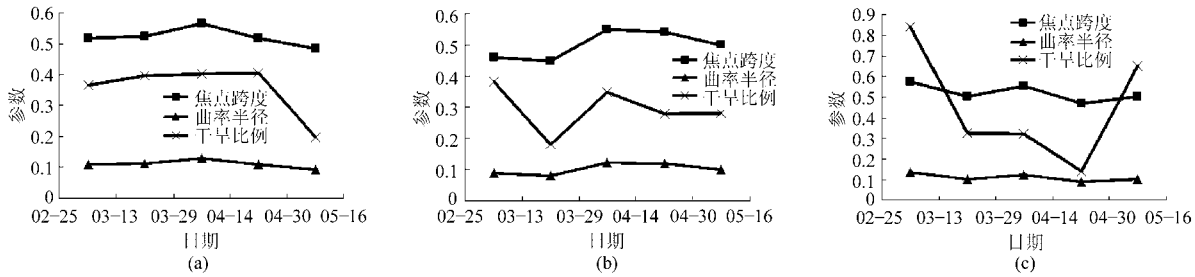


图 7 河南省干边抛物线相关参数与干旱状况关系

Fig. 7 Relationship between parameters of dry parabola edges and drought conditions in He'nan province

(a) 2011 年 (b) 2010 年 (c) 2009 年

ST 双抛物线型特征空间,尤其是用于冬小麦早春 (植被覆盖指数较低)旱情监测时前者优于后者。以双抛物线型特征空间得到的 TVDI 反映地表土壤湿度时,其效果 10 cm 深度优于 20 cm 深度。

参 考 文 献

1 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.
Li Chunqiang, Li Hongjun. The application of TVDI in drought monitoring for winter wheat in spring [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2008, 23(2):161~165. (in Chinese)

2 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.

3 Carlson T N, Gillies R R, Perry E M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover [J]. Remote Sensing Review, 1994, 9(1~2):161~173.

4 Moran M, Clarke T, Inoue Y, et al. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index [J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 49(3):246~263.

5 Inge Sandholta, Kjeld Rasmussena, Jens Andersenb. 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.

6 Naira C, Robert L, Ramata M, et al. Surface soil moisture status over the Mackenzie river basin using a temperature/vegetation index [C] // Proceedings of the 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007: 1 846~1 848.

7 Chen Chi-Farn, Son Nguyen-Thanh, Chang Li-Yu, et al. Monitoring of soil moisture variability in relation to rice cropping systems in the Vietnamese Mekong Delta using MODIS data [J]. Applied Geography, 2011, 31(2): 463~475.

8 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.
Wang Pengxin, Gong Jianya, Li Xiawen. Vegetation-temperature condition index and its application for drought monitoring [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(5):412~418. (in Chinese)

9 孙丽,王飞,吴全. 干旱遥感监测模型在中国冬小麦区的应用[J]. 农业工程学报,2010,26(1):243~249.
Sun Li, Wang Fei, Wu Quan. Drought monitoring by remote sensing in winter-wheat-growing area of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(1):243~249. (in Chinese)

10 Han Lijuan, Wang Pengxin, Yang Hua, et al. Study on NDVI-Ts space by combining LAI and evapotranspiration [J]. Science in China: Series D: Earth Sciences, 2006, 49(7):747~754.

11 Yuan Lu, Heping Tao, Hua Wu. Dynamic drought monitoring in Guangxi using revised temperature vegetation dryness index [J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2007, 12(4):663~668. (in Chinese)

12 吴忠东,王全九. 微咸水连续灌溉对冬小麦产量和土壤理化性质的影响[J]. 农业机械学报,2009,41(9):36~43.
Wu Zhongdong, Wang Quanju. Effect of saline water continuous irrigation on winter wheat yield and soil physicochemical property [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 41(9):36~43. (in Chinese)

13 王纯枝,毛留喜,何延波,等. 温度植被干旱指数法(TVDI)在黄淮海平原土壤湿度反演中的应用研究[J]. 土壤通报, 2009,40(5):998~1 005.
Wang Chunzhi, Mao Liuxi, He Yanbo, et al. Application of temperature-vegetation dryness index (TVDI) in estimation of soil moisture in the HHH Plain [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009,40(5):998~1 005. (in Chinese)