

应用中值融合模型的条件植被温度指数降尺度转换研究

王鹏新¹ 刘 郊¹ 李 俐¹ 张树誉² 解 毅¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 陕西省气象局, 西安 710014)

摘要: 为获得基于 Landsat 卫星遥感数据更为精确的量化干旱监测结果, 以陕西省关中平原为研究区域, 基于 Aqua MODIS 数据反演的 1 km 空间分辨率的条件植被温度指数 (VTCI) 的量化干旱监测结果 (MODIS-VTCI) 和 Landsat OLI/TIRS 数据反演的 30 m 空间分辨率的 VTCI 相对干湿监测结果 (Landsat-VTCI), 应用降尺度的中值融合模型 (MFM) 将基于 MODIS 数据反演的 VTCI 降尺度至 30 m 空间分辨率的 VTCI 量化干旱监测, 并对其结果进行验证。结果表明, 应用降尺度的中值融合模型转换的 VTCI 量化干旱监测结果 (MFM-VTCI) 与 Landsat-VTCI 的空间分布及纹理特征相似, 两者间的相关系数和结构相似度均较大, 均方根误差、差值影像及差值频数分布图所呈现的结果与量化干旱监测结果和相对干湿监测结果间的系统误差相符, 表明 Landsat-VTCI 与 MFM-VTCI 间的可比性较强。MFM-VTCI 与累计降水间的相关性和 MODIS-VTCI 与累计降水间的相关性相近, 均大于 Landsat-VTCI 与累计降水间的相关性, 表明 MFM-VTCI 是量化的干旱监测结果。

关键词: 干旱遥感监测; MODIS 数据; Landsat 数据; 降尺度; 条件植被温度指数; 中值融合模型

中图分类号: S125; TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298 (2017)06-0100-09

Down-scaling Transformation of Vegetation Temperature Condition Index Using Median Fusion Model

WANG Pengxin¹ LIU Jiao¹ LI Li¹ ZHANG Shuyu² XIE Yi¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Shaanxi Provincial Meteorological Bureau, Xi'an 710014, China)

Abstract: Vegetation temperature condition index (VTCI) is proved to be a quantitative drought monitoring approach by using the high temporal resolution remotely sensed data. However, with low temporal resolution data, the monitoring results are relatively wet and dry. A new model called the median fusion model (MFM) was developed for spatially down-scaling the coarse spatial quantitative VTCI (1 km) derived from the moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) data products and the relative VTCI (30 m) derived from the Landsat OLI/TIRS products in the Guanzhong Plain, China to a scale of the quantitative drought monitoring results (30 m) called MFM-VTCI, and their quantifications were proved. The results showed that the good agreements between the MFM-VTCIs and the Landsat-VTCIs were found in terms of correlation coefficient and structural similarity index (SSIM) values, and the two VTCIs had similar spatial distribution and texture features. The root mean square error (RMSE) and the differences between the MFM-VTCIs and the Landsat-VTCIs were consistent with the systematic error between the quantitative drought monitoring results and the relatively wet and dry monitoring results, indicating that it was comparable between the MFM-VTCIs and the Landsat-VTCIs. The correlation coefficients between the MFM-VTCIs and the cumulative precipitation were similar to those between the MODIS-VTCIs and the cumulative precipitation, which were larger than those between the Landsat-VTCIs and the cumulative precipitation, indicating that the down-scaled MFM-VTCIs were quantitative drought monitoring results.

Key words: drought monitoring by remote sensing; MODIS data; Landsat data; down-scaling; vegetation temperature condition index; median fusion model

收稿日期: 2016-10-11 修回日期: 2016-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41371390)

作者简介: 王鹏新 (1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事定量遥感及其在农业中的应用研究, E-mail: wangpx@cau.edu.cn

引言

干旱灾害发生频率高、持续时间长,对环境及农业的危害非常大,是世界上影响最广、造成经济损失最大的自然灾害之一^[1-2]。基于遥感数据的干旱监测方法充分利用了地物表面的光谱、时间、空间和方向信息,具有速度快、周期短、范围广等特点,在农业干旱监测及农作物产量估测等方面发挥着重要作用^[3]。利用遥感数据与地表目标参量,在先验知识和计算机系统的支持下,通过数学模型反演定量化干旱监测指数,是解决大范围旱情监测的有效途径^[4-5]。

王鹏新等^[3]基于归一化植被指数(NDVI)-地表温度(LST)的散点图呈三角形区域分布的条件,提出的条件植被温度指数(VTCI)在干旱监测、预测和作物估产等研究中得到了广泛应用^[6]。孙威等^[7]对VTCI冷、热边界的确定方法进行了完善,应用多年旬NDVI和旬LST产品,确定了每旬多年共同的冷边界和热边界,并对其可行性进行了验证,实现了应用高时间分辨率卫星遥感数据的VTCI的定量化干旱监测。而基于VTCI的定量化干旱监测需要利用时间分辨率较高的传感器,获取丰富的数据源,通过分析多年且大量的数据及某一特定时段干旱情况的整体规律,生成定量化的干旱监测结果^[8]。但基于高时间分辨率的传感器空间分辨率较低,一般适用于大尺度的干旱监测,而空间分辨率较高的传感器,获取同一区域遥感数据信息的周期较长,可获得的数据较少,如2015年3—5月份在覆盖陕西关中平原东部、中部和西部的126/36、127/36和128/36 3个轨道上,仅能获取126/36轨道和127/36轨道各1景有效的Landsat 8 OLI/TIRS影像,128/36轨道上无可数据,故其VTCI只能反映卫星过境时刻的地表干湿情况,仅可作为卫星过境时刻干湿情况的监测指标。因此,对来自不同遥感平台的数据信息进行空间降尺度转换,从而获得一个有较高空间分辨率的定量化干旱监测结果,对地表的定量化干旱监测研究具有重要意义。

国内外已有学者利用不同方法进行了降尺度转换研究。KUSTAS等^[9]假设在不同空间分辨率下LST和NDVI之间的负相关是恒定的,提出了DisTrad算法,并成功将千米级的日常地温监测提高到百米级。聂建亮等^[10]利用基于DisTrad算法改进后的TsHARP温度降尺度方法^[11]将1 km空间分辨率的Aqua MODIS数据反演的LST降尺度至500 m。然而,该方法的尺度因子为NDVI,对于下垫面地物

类型复杂的区域来说,不同层次上对应的最优尺度因子可能并不是NDVI或者并不唯一^[12]。MERLIN等^[13-14]基于1 km空间分辨率MODIS数据的土壤蒸发率将40 km分辨率的SMOS(Soil moisture and ocean salinity)土壤湿度数据降尺度转换至4 km,并运用混合二维导数降尺度方法和指数模型相结合的方法使尺度转换后的土壤湿度精度得到了很大提高。KIM等^[15]结合UCLA(University of California at Los Angeles)法将Merlin法进行精简,利用AMSR-E的土壤湿度产品(SM)和MODIS数据反演的土壤湿度指数(SW)提出一个空间尺度下推方法,将空间分辨率为25 km的AMSR-E土壤湿度下推至1 km。PENG等^[16]利用CCI(Climate change initiative)SM产品和MODIS反演的VTCI数据,提出一个基于UCLA法的尺度下推模型,将25 km空间分辨率的CCISM尺度下推至5 km,并通过与云南省的实测SM数据对比验证了该方法的可行性。WANG等^[17]基于UCLA法以MODIS遥感数据反演的温度植被干旱指数(TVDI)为降尺度因素,建立PKU降尺度转换模型,将青藏高原25 km空间分辨率的SM尺度下推至1 km空间分辨率。

鉴于关中平原鲜有降尺度转换的研究及VTCI在关中平原干旱监测研究中的广泛应用,本文利用关中平原2014—2015年的3—5月份的Aqua MODIS和Landsat OLI/TIRS卫星遥感数据,以VTCI作为降尺度转换因素,利用中值融合降尺度转换模型(Median fusion model, MFM)和Landsat OLI/TIRS卫星遥感数据反演的VTCI相对干湿监测结果(Landsat-VTCI),将Aqua MODIS卫星遥感数据反演的VTCI定量化干旱监测结果(MODIS-VTCI)从1 km空间分辨率降尺度转换至30 m。将应用中值融合模型转换的VTCI(MFM-VTCI)分别与Landsat-VTCI和MODIS-VTCI作对比分析,并对MFM-VTCI定量化干旱监测结果进行验证,以期为关中平原的定量化干旱监测提供技术支持。

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

关中平原位于陕西省中部的渭河流域,南靠秦岭,北接黄土高原,西起宝鸡大散关,东至潼关,东西长约400 km,总面积约55 300 km²,包括西安市、铜川市、宝鸡市、咸阳市、渭南市5市及杨凌示范区^[18-19]。该地区属大陆性季风气候,处于暖温带半湿润与半干旱气候的过渡地带,降水主要集中在夏季,年平均降水量为500~700 mm,气温南高北低,年平均气温为6~13℃,因此冬春发生干旱的可能

性相对较大^[20-21]。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 数据来源

选用2014—2015年的3—5月份覆盖陕西省关中平原东部、中部和西部区域6景Landsat 8 OLI/TIRS数据(126/36轨道上获取的日期为2014年3月17日和2014年5月4日,127/36轨道上获取的日期为2014年5月11日和2015年4月28日,128/36轨道上获取的日期为2014年3月15日和2014年5月18日),以及这些数据获取时间所在旬的Aqua MODIS 1 km空间分辨率的数据产品。Landsat 8 OLI/TIRS数据过境周期为16 d,空间分辨率为30 m。Aqua MODIS数据空间分辨率为1 km(本研究使用的相关数据产品的空间分辨率为926.6 m),过境周期为1 d。

1.2.2 数据处理

1.2.2.1 MODIS数据的处理

采用Landsat卫星数据过境日期所在旬的Aqua MODIS日地表反射率产品(MYD09GA)和日LST产品(MYD11A1),应用日地表反射率产品计算日NDVI。基于日NDVI和日LST,应用最大值合成技术分别生成每年3—5月份的旬NDVI和旬LST最大值合成产品^[2,7-8];应用旬NDVI和旬LST合成产品计算VTCI^[3,22]。

$$V = \frac{L_{\max}(N_i) - L_{\min}(N_i)}{L_{\max}(N_i) + L_{\min}(N_i)} \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad L_{\max}(N_i) = a + bN_i \quad (2)$$

$$L_{\min}(N_i) = a' + b'N_i \quad (3)$$

式中 N_i ——研究区域内,第*i*个时期某一像素的NDVI值

$L_{\max}(N_i)$ ——研究区域内,当 N_i 等于某一特定值时的所有像素地表温度的最大值

$L_{\min}(N_i)$ ——研究区域内,当 N_i 等于某一特定值时的所有像素地表温度的最小值

a, b, a', b' ——待定系数

生成MODIS-VTCI时,需利用基于多年某一旬的NDVI和LST最大合成产品,应用最大值合成技术分别生成多年的旬NDVI和旬LST最大值合成产品;对多年某一旬的LST最大值合成产品,逐像素取最小值,生成多年旬LST最大-最小值合成产品^[7],并以此计算VTCI,获得2014—2015年每年以旬为单位的VTCI。由于Aqua MODIS数据获取周期短、时间分辨率高,数据源丰富,故应用MODIS数据监测干旱时可以综合考虑多年间每旬的干旱情况

整体规律。多年的遥感反演数据可以生成一个较为稳定的特征空间,这个特征空间在较长的时间周期内被认为是比较准确的,能够客观地反映某一时期的干旱情况。因此,MODIS-VTCI干旱监测结果是一种定量的干旱监测指标。

1.2.2.2 Landsat数据的处理

对选用的Landsat卫星遥感数据进行辐射校正和几何校正等预处理,其中辐射校正包括辐射定标和大气校正。

(1) 归一化植被指数的计算

应用Landsat 8 OLI数据的近红外波段(第5波段, ρ_{NIR})和红光波段(第4波段, ρ_R)的反射率计算NDVI。

$$N = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (4)$$

(2) 亮度温度的计算

应用Landsat 8的第10波段的辐射亮度计算亮度温度(Brightness temperature, T_{10})^[23-24]。

$$T_{10} = \frac{1\ 321.08}{\ln\left(1 + \frac{774.89}{L_{10}}\right)} \quad (5)$$

式中 L_{10} ——第10波段的辐射亮度

与Aqua MODIS数据不同,由于Landsat数据获取周期较长,易受云的干扰等,其可用数据较少且无法生成NDVI和LST合成产品,故只能应用Landsat OLI/TIRS卫星过境时刻的数据计算NDVI和BT,并根据VTCI计算方法生成Landsat-VTCI。单景Landsat-VTCI计算结果反映的是卫星过境当地的地表干湿情况,其特征空间在短时期内是相对变化的。因此,Landsat-VTCI是一种相对干湿的监测指标,即相对干湿监测结果。

1.2.3 坐标转换

Aqua MODIS数据投影方式为Lambert投影,而Landsat数据应用UTM投影方式。由于两者投影坐标系不同,在应用两种遥感数据作尺度转换之前需要先对这两种遥感数据的坐标进行转换。具体实现方法为:首先,通过Lambert反解算法将MODIS数据的平面坐标转换成经纬度坐标,以经纬度坐标作为中间变量,再通过UTM正解算法将经纬度坐标转换成Landsat数据下的平面坐标,实现两种遥感数据投影方式的坐标转换。

1.3 中值融合模型

降尺度的中值融合模型(MFM)是以某一MODIS-VTCI像素对应的Landsat-VTCI像素局部窗口中每个Landsat-VTCI像素与该局部窗口内所有Landsat-VTCI像素的中值(若某些像素的VT

值相等,则依次排列)之商作为降尺度转换因子,即

$$V_{D_{(i+1)31+k},(j-1)31+1}} = V_{M_{ij}} \frac{V_{L_{kl}}}{V_m} \quad (6)$$

式中 $V_{D_{(i+1)31+k},(j-1)31+1}}$ ——降尺度转换的 VTCI
 $V_{M_{ij}}$ ——第 i 行第 j 列的基于 MODIS 数据的
 量化干旱监测结果
 $V_{L_{kl}}$ ——与某一 MODIS - VTCI 像素对应的第
 k 行第 l 列 ($k = 1, 2, \dots, 31; l = 1, 2, \dots, 31$) 基于 Landsat 数据的 VTCI
 相对干湿结果
 V_m ——与 MODIS - VTCI 对应的 Landsat 数据
 局部窗口内 VTCI 的中值

选取时间范围相对应的 MODIS - VTCI 和 Landsat - VTCI 数据,对 MODIS - VTCI 影像数据的研究区域裁剪后通过坐标转换的方法找到对应 Landsat 数据的平面坐标,以此 Landsat - VTCI 数据的平面坐标所在的像素为中心,向上、下、左、右 4 个方向分别扩展 15 个像素,形成 31 像素 \times 31 像素的局部窗口,利用中值融合模型对 MODIS 数据反演的量化 VTCI 值降尺度转换至 30 m 空间分辨率的干旱监测结果。

应用于研究区域内气象网站观测的旬降水资料对 MFM - VTCI 量化干旱监测结果进行验证。选取覆盖关中平原的 6 景影像中的旱作实验样点,根据样点的经纬度坐标计算其在影像上的像素坐标,以每个样点所在像素为中心的 3×3 模板的 VTCI 平均值作为该样点所在地的 VTCI 值,用线性相关分析的方法研究降水量与 VTCI 间的关系,其中降水量设置为以旬为单位的累计降水量。

1.4 降尺度转换结果的精度评价方法

1.4.1 相关系数

相关系数的计算公式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{Di} - \bar{V}_D)(V_{Li} - \bar{V}_L)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{Di} - \bar{V}_D)^2 \sum_{i=1}^n (V_{Li} - \bar{V}_L)^2}} \quad (7)$$

式中 n ——转换后的 VTCI 样本数
 \bar{V}_L ——未转换的 Landsat - VTCI 平均值
 \bar{V}_D ——转换后的 VTCI 平均值
 V_{Di} ——转换后的 VTCI
 V_{Li} ——未转换的 Landsat - VTCI

1.4.2 均方根误差

均方根误差(RMSE)可以衡量待评价数据与参考数据之间的偏差,本文运用 RMSE 分析 MFM - VTCI 量化干旱监测结果与 Landsat - VTCI 相对干湿监测结果间的系统误差,计算方法为

$$R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (V_{Di} - V_{Li})^2} \quad (8)$$

1.4.3 结构相似度

利用 WANG 等^[25]提出的结构相似度(SSIM),以 Landsat - VTCI 影像作为参考数据,MFM - VTCI 作为待评价影像,根据 SSIM 计算方法得到 Landsat - VTCI 与 MFM - VTCI 数据的结构相似度。即

$$S(V_D, V_L) = l(V_D, V_L)c(V_D, V_L)s(V_D, V_L) \quad (9)$$

$$\text{其中 } l(V_D, V_L) = \frac{2\mu_{V_D}\mu_{V_L} + C_1}{\mu_{V_D}^2 + \mu_{V_L}^2 + C_1} \quad (10)$$

$$c(V_D, V_L) = \frac{2\delta_{V_D}\delta_{V_L} + C_2}{\delta_{V_D}^2 + \delta_{V_L}^2 + C_2} \quad (11)$$

$$s(V_D, V_L) = \frac{\delta_{V_D, V_L} + C_3}{\delta_{V_D}\delta_{V_L} + C_3} \quad (12)$$

$$C_3 = C_2/2$$

式中 $l(V_D, V_L)$ ——亮度比较函数

$c(V_D, V_L)$ ——对比度比较函数

$s(V_D, V_L)$ ——结构比较函数

μ_{V_D} ——MFM - VTCI 影像均值

μ_{V_L} ——Landsat - VTCI 影像均值

δ_{V_D} ——MFM - VTCI 影像标准差

δ_{V_L} ——Landsat - VTCI 影像标准差

δ_{V_D, V_L} ——MFM - VTCI 影像和 Landsat - VTCI 影像协方差

C_1, C_2, C_3 ——用于避免分式出现异常情况引入的常量

本文中,考虑 VTCI 的值域范围($[0, 1]$)及其对 SSIM 值的影响,所以令 $C_2 = C_1 = 0.0001$ 。简化式(9)~(12)得到

$$S(V_D, V_L) = \frac{(2\mu_{V_D}\mu_{V_L} + C_1)(2\delta_{V_D, V_L} + C_2)}{(\mu_{V_D}^2 + \mu_{V_L}^2 + C_1)(\delta_{V_D}^2 + \delta_{V_L}^2 + C_2)} \quad (13)$$

通过比较 V_D 和 V_L 间的相关系数、均方根误差及结构相似度评价尺度转换的效果。Landsat - VTCI 与 MFM - VTCI 之间相关系数和结构相似度越大,降尺度转换效果越好。均方根误差越大,系统误差越大,说明与 Landsat - VTCI 所反映的地表干湿情况的差异越大。

2 结果与分析

2.1 降尺度转换 VTCI 的精度评价

应用纹理特征及结构相似度、相关系数及截距、RMSE 及差值等指标对 MFM 的转换效果进行评价。对 6 景 MODIS - VTCI 利用 MFM 进行降尺度转换得到 MFM - VTCI,并与同一区域范围的 Landsat -

VTCI 进行相关性分析(表 1),发现 Landsat - VTCI 与 MFM - VTCI 间的相关系数(表 1)变化范围为 0.403 4 ~ 0.783 7,其中 2015 年 4 月下旬(127/36)的 Landsat - VTCI 与 MFM - VTCI 间的相关系数最大,2014 年 5 月中旬(127/36)的 Landsat - VTCI 与 MFM - VTCI 间的相关系数最小,但二者间的相关性均能达到显著水平,表明 MFM 降尺度转换效果较好。

表 1 Landsat - VTCI 与 MFM - VTCI 间的相关系数、均方根误差及结构相似度

Tab.1 Correlation coefficients and root mean square errors between MFM - VTCIs and Landsat - VTCIs and their structural similarity

时间	相关系数	结构相似度	均方根误差	截距
2014 年 3 月中旬(126/36)	0.667 5	0.620 4	0.16	0.14
2014 年 5 月上旬(126/36)	0.669 7	0.596 3	0.18	0.43
2014 年 5 月中旬(127/36)	0.403 4	0.363 7	0.16	0.36
2015 年 4 月下旬(127/36)	0.783 7	0.779 6	0.08	0.14
2014 年 3 月中旬(128/36)	0.651 1	0.485 9	0.09	0.16
2014 年 5 月中旬(128/36)	0.699 2	0.716 6	0.13	0.26

从 6 景 Landsat - VTCI 与 MFM - VTCI 间的纹理特征及结构相似度来看,两者间的空间分布和纹理特征均相似,有一定的结构相似度,变化范围为 0.363 7 ~ 0.779 6。其中,2014 年 5 月上旬(126/36)MFM - VTCI 影像中黄河与渭河交汇处及黄河和渭河的水域范围和水体形状呈现与 Landsat - VTCI 影像基本一致;2014 年 3 月中旬(128/36)及 2015 年 4 月下旬(127/36)MFM - VTCI 影像中,渭河水体形状呈现较为清晰,水域范围较为明显,均与 Landsat - VTCI 所呈现出的特征相吻合,表明 MFM 适用于关中平原的降尺度转换研究。

综合分析 3 景 Landsat - VTCI 与 MFM - VTCI 的干旱监测结果(图 1)可以看出,两者间的均方根误差(表 1)和差值(图 1c、1g、1k)均较大,说明两者间存在较大的系统误差。Landsat - VTCI 与 MFM - VTCI 间的系统误差越大,RMSE 越大,则 VTCI 的差值集中分布于 $[-1, 0]$ 或 $[0, 1]$ 之间。Landsat - VTCI 与 MFM - VTCI 间的系统误差越小,RMSE 越小,则 VTCI 的差值集中分布于 0 左右。若 VTCI 的差值集中分布于 $[-1, 0]$ 之间,说明该研究区域 Landsat - VTCI 比 MFM - VTCI 整体偏大。反之, VTCI 的差值集中分布于 $[0, 1]$ 之间,说明该研究区域 Landsat - VTCI 比 MFM - VTCI 整体偏小。其中,2014 年 3 月中旬(128/36)的 RMSE(表 1)较大,为 0.16, VTCI 的差值集中分布于 $[-0.45, 0.25]$ 之间,

差值频数分布直方图峰值处 VTCI 差值为 -0.15(图 1),说明 2014 年 3 月中旬 Landsat - VTCI 偏大,即 Landsat - VTCI 相对干湿监测结果比 MFM - VTCI 量化干旱监测结果偏湿润。2014 年 5 月上旬(126/36)的均方根误差较大,为 0.18, VTCI 的差值集中分布于 $[0, 0.55]$ 之间,差值频数分布直方图峰值处 VTCI 差值为 0.21,说明 2014 年 5 月上旬该研究区域 Landsat - VTCI 比 MFM - VTCI 小,即 Landsat - VTCI 相对干湿监测结果比 MFM - VTCI 量化干旱监测结果所呈现的地表干湿情况较干旱。而 2015 年 4 月下旬(127/36)的均方根误差最小,为 0.08, VTCI 的差值集中分布于 $[-0.22, 0.22]$ 之间,差值频数分布直方图峰值处 VTCI 差值为 0,说明 2015 年 4 月下旬 Landsat - VTCI 与 MFM - VTCI 大小相近,即 Landsat - VTCI 相对干湿监测结果与 MFM - VTCI 量化干旱监测结果干湿程度相同。

另, Landsat - VTCI 与 MFM - VTCI 间的截距变化范围为 0.14 ~ 0.43(表 1),其中 2015 年 4 月下旬(127/36)的 Landsat - VTCI 与 MFM - VTCI 间的截距最小,说明 2015 年 4 月下旬 Landsat - VTCI 与 MFM - VTCI 间的偏差最小,2014 年 5 月上旬(126/36)的 Landsat - VTCI 与 MFM - VTCI 间的截距最大,说明 2014 年 5 月中旬(126/36) Landsat - VTCI 与 MFM - VTCI 间的偏差最大,该结果与均方根误差的分析结果一致。

2.2 降尺度转换 VTCI 的定量化验证

干旱受多种因素的影响,其中降水量是一个主要的制约因素,同时降水量与 VTCI 干旱监测结果有一定的相关性^[8]。Landsat - VTCI 是相对干湿监测结果,仅能反映卫星过境时刻的地表干湿情况,与其他时期的干旱情况的可比性差,故 Landsat - VTCI 与降水量之间的可比性较小。而 MODIS - VTCI 是定量化干旱监测结果,能够反映一段时期内的地表干旱情况,故 MODIS - VTCI 与降水量之间有较大的可比性。为此选取覆盖关中平原东、中、西部的 6 景影像中的 11 个旱作样点的 26 个实验样本(不同日期的相同旱作样点视为多个样本),应用降水数据对 MFM - VTCI 定量化干旱监测结果进行验证, VTCI 与累计降水量和累计降水距平间的相关系数越大,定量化干旱监测结果越准确。累计降水量从卫星过境日期以旬为单位向前推算,以 2014 年 3 月中旬为例,2 个月时间尺度的累计降水量为 2014 年 1 月下旬至 3 月中旬的累计降水量。累计降水距平值为 1975—2015 年(41 年)间累计降水时间的降水量与对应时间的平均降水量数据之间的差值。

通过分析 MFM - VTCI、MODIS - VTCI 和

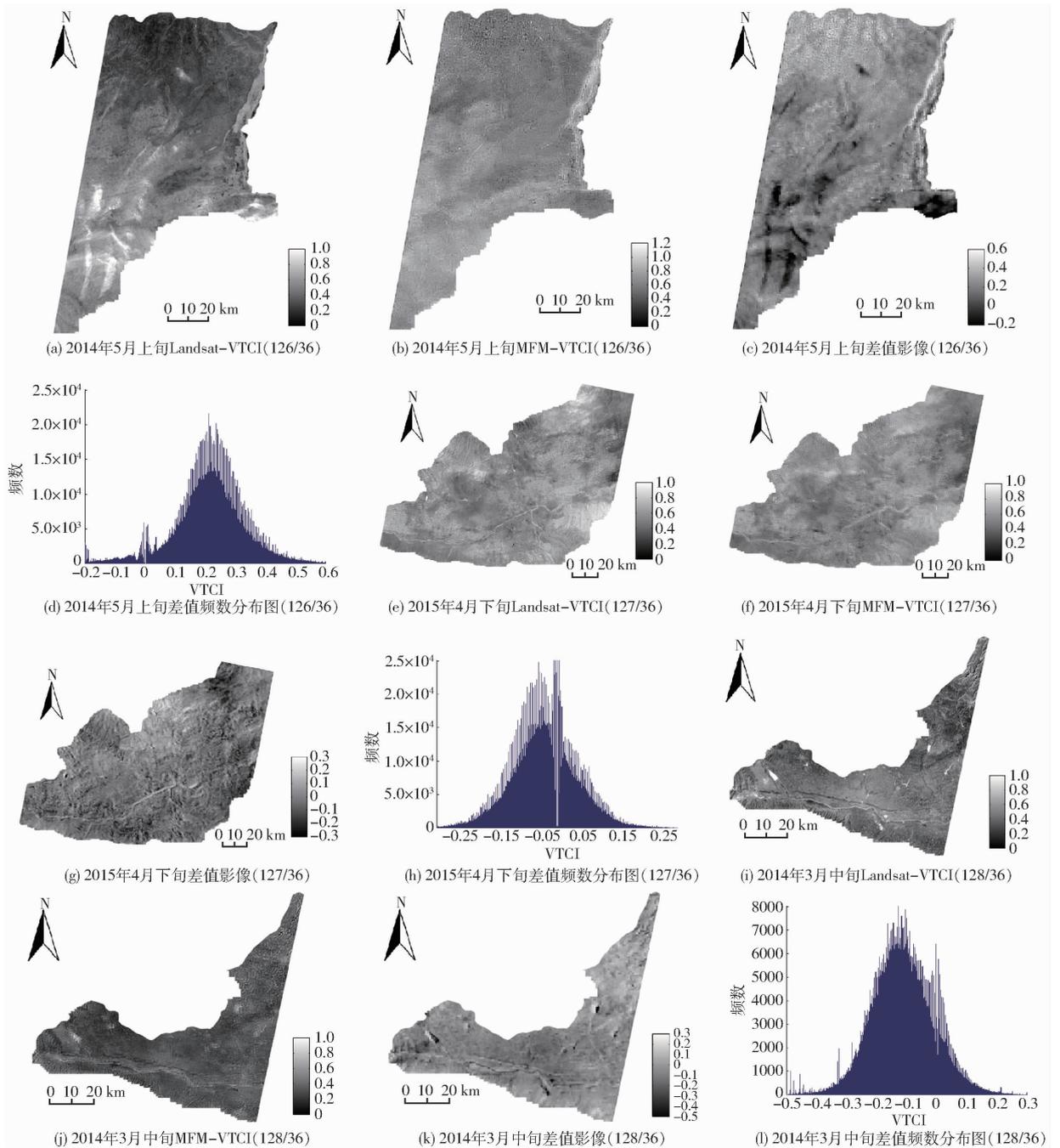


图 1 Landsat - VTCI 与 MFM - VTCI 监测结果及二者的差值

Fig. 1 Drought monitoring results of MFM - VTCIs, Landsat - VTCIs and their differences

Landsat - VTCI 与不同时间尺度的累计降水量 (表 2) 和累计降水距平 (表 3) 之间相关性发现, MFM - VTCI 和 MODIS - VTCI 与不同时间尺度的累计降水量和累计降水距平之间的相关性均大于 Landsat - VTCI。其中, 累计降水时间为 10 d 时, MFM - VTCI、MODIS - VTCI 和 Landsat - VTCI 与累计降水量之间的相关性均未达到显著水平 ($P > 0.05$); 当累计降水时间为 20 d 时, MFM - VTCI 和 MODIS - VTCI 与累计降水量之间的相关系数分别为 0.548 7 和 0.546 1, 均达极显著水平 ($P < 0.01$), 而 Landsat - VTCI 与此时间尺度的累计降水量间的

相关系数为 0.378 0, 未达到显著水平 ($P > 0.05$), 说明当累计降水时间为 20 d 时, MFM - VTCI 和 MODIS - VTCI 与累计降水量之间的相关性高于 Landsat - VTCI, MFM - VTCI 干旱监测结果与 Landsat - VTCI 相比精度有所提高。当累计降水时间为 30 d 时, MFM - VTCI、MODIS - VTCI 和 Landsat - VTCI 与累计降水量之间的相关系数均达显著水平 ($P < 0.05$), 说明三者与累计降水量之间的相关性均较高。MFM - VTCI 与累计降水时间分别为 60 d、90 d 和 180 d 时的累计降水量之间的相关系数均达极显著水平 ($P < 0.001$) 且大于 Landsat -

表2 VTCI与累计降水量间的线性相关系数

Tab.2 Linear correlation coefficients between cumulative precipitation and VTCIs

累计时间/d	Landsat - VTCI	MFM - VTCI	MODIS - VTCI
10	0.081 9	0.083 3	0.078 4
20	0.378 0	0.548 7*	0.546 1*
30	0.537 9*	0.489 0*	0.485 0*
60	0.675 8***	0.865 3***	0.874 7***
90	0.659 5***	0.872 2***	0.883 5***
180	0.662 5***	0.833 5***	0.840 5***

注：*和***表示统计显著性水平分别为0.05和0.001，下同。

表3 VTCI与累计降水距平间的线性相关系数

Tab.3 Linear correlation coefficients between cumulative anomaly precipitation and VTCIs

累计时间/d	Landsat - VTCI	MFM - VTCI	MODIS - VTCI
10	0.036 8	0.035 8	0.049 4
20	0.297 3	0.508 6**	0.519 7**
30	0.445 7*	0.451 5*	0.458 1*
60	0.559 6**	0.846 0***	0.849 0***
90	0.518 4**	0.838 2***	0.844 0***
180	0.389 5*	0.730 8***	0.735 9***

注：**表示统计显著性水平为0.01。

VTCI,说明当累计降水时间为60 d、90 d和180 d时,MFM - VTCI和MODIS - VTCI与累计降水量之间的相关性高于Landsat - VTCI。VTCI与不同时间尺度的累计降水距平之间的相关性和VTCI与不同时间尺度的累计降水量之间的相关性结果相近,MFM - VTCI和MODIS - VTCI与累计降水时间分别为20 d、30 d、60 d、90 d和180 d的累计降水距平之间的相关性均大于Landsat - VTCI。这些结果表明MFM - VTCI与MODIS - VTCI一致,能够客观地反映一段时期内的地表干旱情况,其干旱监测结果是

定量化的。且MFM - VTCI与MODIS - VTCI的干旱监测结果的精度比Landsat - VTCI高,二者的近实时性也好于Landsat - VTCI。

2.3 降尺度转换VTCI的定量化干旱监测

从MFM - VTCI与MODIS - VTCI的结构特征来看,MODIS - VTCI影像所呈现的结构特征较为模糊,而MFM - VTCI影像的结构特征较为清晰,且水体形状及河域趋势均比MODIS - VTCI明显。以2014年3月中旬(128/36)为例(图2),MODIS - VTCI影像(图2b)中的渭河仅能呈现部分水体形状,河流趋势模糊不清。而MFM - VTCI影像(图2e)中,渭河的水体形状及河流趋势均清晰可见。

从Landsat - VTCI、MFM - VTCI和MODIS - VTCI的干旱监测结果来看,MFM - VTCI干旱监测结果与MODIS - VTCI定量化干旱监测结果所反映的关中平原地表干湿情况一致,与Landsat - VTCI稍有差异。其中,2014年3月中旬(128/36)Landsat - VTCI(图1i)影像较亮,表明VTCI较大,地表干旱程度较轻。而MFM - VTCI(图2b)与MODIS - VTCI(图2a)影像均偏暗,VTCI均偏小,说明该时期地表偏干旱。

从MFM - VTCI和MODIS - VTCI的频数分布图(图2c、2f)可以看出,二者VTCI频数分布情况相似。其中,2014年3月中旬(128/36)MODIS - VTCI集中分布于[0.2,0.5]之间,峰值处VTCI为0.3,VTCI均整体偏小,说明关中平原该时期地表偏干旱。MFM - VTCI集中分布于[0.15,0.55]之间,峰值处VTCI为0.3,与MODIS - VTCI相近。这一结果表明,MFM - VTCI能够准确地反映关中平原的干旱情况。

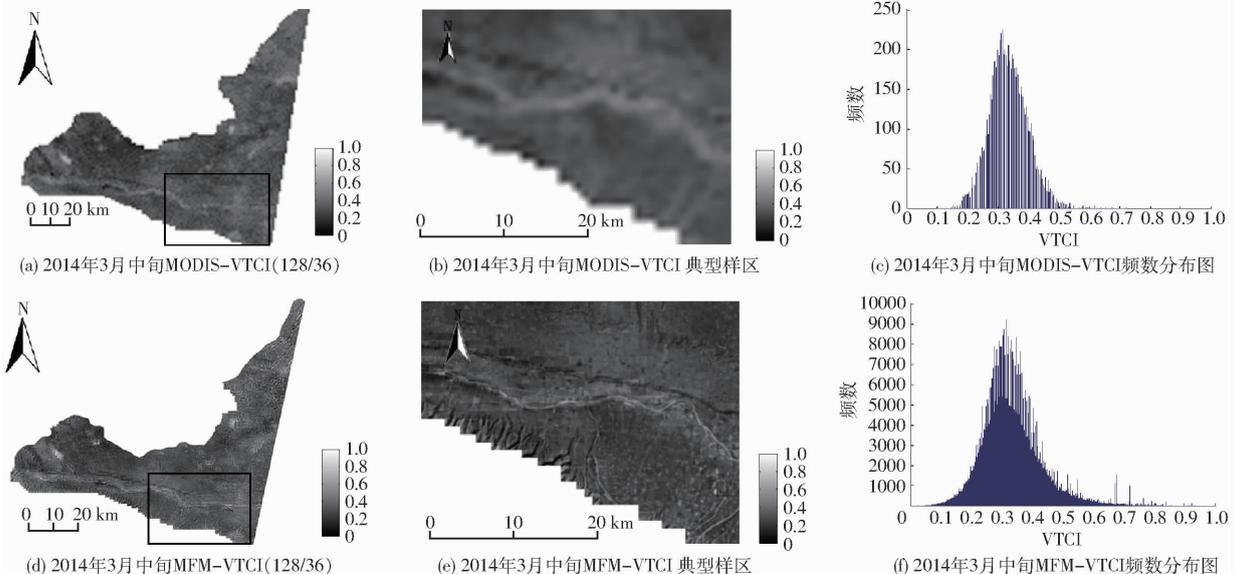


图2 MFM - VTCI和MODIS - VTCI干旱监测结果及频数分布图

Fig.2 Drought monitoring results of MFM - VTCIs, MODIS - VTCIs and their frequency distributions

3 讨论

鉴于干旱的严重性及破坏性,干旱监测的研究非常重要,条件植被温度指数(VTCI)量化的干旱监测结果能够较大程度地解决这一问题。但由于各传感器特点不同,单时相传感器能够获取的有效数据较少,反演得到的VTCI不能实现量化干旱监测。而利用多时相传感器获取的大量数据反演得到的量化干旱监测结果空间分辨率较低,不能精确地反映地表干湿情况。降尺度的中值融合模型能够基于有限的Landsat可用数据,将MODIS数据降尺度转换得到与Landsat数据相同空间分辨率的量化干旱监测结果。MFM-VTCI能够准确反映不同时期的地表干旱情况,对关中平原的干旱监测有重要的应用价值。

此外,由于Landsat-VTCI为相对干湿监测结果,而MODIS-VTCI为量化干旱监测结果,二者之间存在一定的系统误差,MFM-VTCI中包含一小部分像素的VTCI值大于1,为正常结果。在未来的降尺度转换模型研究中应优化降尺度转换因子,以减少转换的VTCI值大于1的现象。

4 结论

(1)应用降尺度的中值融合模型对关中平原6景MODIS-VTCI进行降尺度转换,其转换结果MFM-VTCI均与Landsat-VTCI在纹理特征、空间分布等方面基本一致,与Landsat-VTCI间的相关系数和结构相似度均较大,均方根误差的变化范围与相对干湿监测结果和量化干旱监测结果的系统误差相符,表明中值融合模型降尺度转换效果较好。

(2)MFM-VTCI与降水量间的相关性和MODIS-VTCI相近,二者与降水量间的相关性均大于Landsat-VTCI与降水量数据间的相关性,且与Landsat-VTCI相比,MFM-VTCI干旱监测结果的精度有较大的提高,表明MFM-VTCI是量化的干旱监测结果,可以作为关中平原干旱监测的定量指标。

(3)MFM-VTCI影像空间分辨率较高,纹理特征和空间分布均比MODIS-VTCI更为清晰,其干旱监测结果与MODIS-VTCI量化干旱监测结果所呈现出的地表干旱情况相同,表明MFM-VTCI量化干旱监测结果较为准确,能够为关中平原的量化干旱监测提供技术支持。

参 考 文 献

- 刘英,马保东,吴立新,等. 基于NDVI-LST双抛物线特征空间的冬小麦旱情遥感监测[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 55-63. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120510. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.05.010.
LIU Ying, MA Baodong, WU Lixin, et al. Drought remote sensing for winter wheat based on double parabola NDVI-LST space [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 55-63. (in Chinese)
- 黄友昕,刘修国,沈永林,等. 农业干旱遥感监测指标及其适应性评价方法研究进展[J/OL]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 186-195. http://www.tcsae.org/nygexb/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151625&journal_id=nygexb. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.025.
HUANG Youxin, LIU Xiuguo, SHEN Yonglin, et al. Advances in remote sensing derived agricultural drought monitoring indices and adaptability evaluation methods[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 186-195. (in Chinese)
- 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 Xiaowen. 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)
- 顾行发,田国良,李小文,等. 遥感信息的量化[J]. 中国科学, 2005, 35(增刊1): 1-10.
GU Xingfa, TIAN Guoliang, LI Xiaowen, et al. The quantification of remote sensing information[J]. Science in China, 2005, 35(Suppl.1): 1-10. (in Chinese)
- 李小文,王祎婷. 定量遥感尺度效应刍议[J]. 地理学报, 2013, 68(9): 1163-1169.
LI Xiaowen, WANG Yiting. Prospects on future developments of quantitative remote sensing[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(9): 1163-1169. (in Chinese)
- 田苗,王鹏新,韩萍,等. 基于SARIMA模型和条件植被温度指数的干旱预测[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 109-116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130221&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.021.
TIAN Miao, WANG Pengxin, HAN Ping, et al. Drought forecasts based on SARIMA models and vegetation temperature condition index[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 109-116. (in Chinese)
- 孙威,王鹏新,韩丽娟,等. 条件植被温度指数干旱监测方法的完善[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 22-26.
SUN Wei, WANG Pengxin, HAN Lijuan, et al. Further improvement of the approach to monitoring drought using vegetation and temperature condition indexes from multi-years' remotely sensed data[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(2): 22-26. (in Chinese)

- 8 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, 29(3): 67 - 72.
LIN Qiao, WANG Pengxin, ZHANG Shuyu, et al. Drought monitoring and category of vegetation temperature condition index using Aqua - MODIS data[J]. Remote Sensing Information, 2014, 29(3): 67 - 72. (in Chinese)
- 9 KUSTAS W P, NORMAN J M, ANDERSON M C, et al. Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 85(4): 429 - 440.
- 10 聂建亮, 武建军, 杨曦. 基于地表温度-植被指数关系的地表温度降尺度方法研究[J]. 生态学报, 2011, 31(17): 4961 - 4969.
NIE Jianliang, WU Jianjun, YANG Xi. Downscaling land surface temperature based on relationship between surface temperature and vegetation index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(17): 4961 - 4969. (in Chinese)
- 11 AGAM N, KUSTAS W P, ANDERSON M C, et al. Utility of thermal sharpening over Texas high plains irrigated agricultural fields[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2007, 112(D19): 5208 - 5210.
- 12 郭会敏, 宫阿都, 何汝艳. 遥感地表温度空间分辨率降尺度研究[J]. 遥感信息, 2015, 30(4): 29 - 36.
GUO Huimin, GONG Adu, HE Ruyan. Spatial downscaling research of the remotely land surface temperature [J]. Remote Sensing Information, 2015, 30(4): 29 - 36. (in Chinese)
- 13 MERLIN O, WALKER J P, CHEHBOUNI A, et al. Towards deterministic downscaling of SMOS soil moisture using MODIS derived soil evaporative efficiency[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(10): 3935 - 3946.
- 14 MERLIN O, AL BITAR A, WALKER J P, et al. An improved algorithm for disaggregating microwave-derived soil moisture based on red, near-infrared and thermal-infrared data[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(10): 2305 - 2316.
- 15 KIM J, HOGUE T S. Improving spatial soil moisture representation through integration of AMSR - E and MODIS products[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(2): 446 - 460.
- 16 PENG Jian, LOEW A, ZHANG Shiqiang, et al. Spatial downscaling of satellite soil moisture data using a vegetation temperature condition index[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(1): 558 - 566.
- 17 WANG Jun, LING Ziwei, WANG Yang, et al. Improving spatial representation of soil moisture by integration of microwave observations and the temperature-vegetation-drought index derived from MODIS products[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2016, 113: 144 - 154.
- 18 申建, 常庆瑞, 李粉玲, 等. 2000—2013 年关中地区耕地复种指数遥感动态监测[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 280 - 287. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160837&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.037.
SHEN Jian, CHANG Qingrui, LI Fenling, et al. Dynamic monitoring of cropping index in Guanzhong area using remote sensing in 2000—2013[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 280 - 287. (in Chinese)
- 19 王鹏新, 孙辉涛, 王蕾, 等. 基于 4D - VAR 和条件植被温度指数的冬小麦单产估测[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 263 - 271. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160337&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.037.
WANG Pengxin, SUN Huitao, WANG Lei, et al. Winter wheat yield estimation based on four-dimensional variational assimilation method and remotely sensed vegetation temperature condition index [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 263 - 271. (in Chinese)
- 20 白雪娇, 王鹏新, 解毅, 等. 基于结构相似度的关中平原旱情空间分布特征[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 345 - 351. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151147&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.047.
BAI Xuejiao, WANG Pengxin, XIE Yi, et al. Spatial distribution characteristics of droughts in Guanzhong Plain based on structural similarity[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 345 - 351. (in Chinese)
- 21 杨文峰, 李星敏, 卢玲. 基于能量平衡的蒸散遥感估算模型的应用研究[J]. 西北农林科技大学学报, 2013, 41(2): 46 - 52.
YANG Wenfeng, LI Xingmin, LU Ling. Application of remote sensing model based on energy balance to estimate evapotranspiration[J]. Journal of Northwest A&F University, 2013, 41(2): 46 - 52. (in Chinese)
- 22 SUN Wei, WANG Pengxin, ZHANG Shuyu, et al. Using the vegetation temperature condition index for time series drought occurrence monitoring in the Guanzhong Plain, PR China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(17 - 18): 5133 - 5144.
- 23 ROZENSTEIN O, QIN Zhihao, DERIMIAN Y, et al. Derivation of land surface temperature for Landsat 8 TIRS using a split window algorithm[J]. Sensors, 2014, 14(4): 5768 - 5780.
- 24 WANG Fei, QIN Zhihao, SONG Caiying, et al. An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared sensor data[J]. Remote Sensing, 2015, 7(4): 4268 - 4289.
- 25 WANG Zhou, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600 - 612.