

基于点扩散函数的条件植被温度指数降尺度转换方法

王鹏新^{1,2} 刘 郊^{1,2} 李 俐^{1,2} 张树誉³ 解 毅^{1,2}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 农业部农业灾害遥感重点实验室, 北京 100083;

3. 陕西省气象局, 西安 710014)

摘要: 以陕西省关中平原为研究区域, 基于 MODIS 数据反演的条件植被温度指数 (VTCI) 的定量化干旱监测结果 (MODIS-VTCI) 和基于 Landsat 数据反演的 VTCI 相对干湿监测结果 (Landsat-VTCI), 应用点扩散函数 (PSF) 将 930 m 空间分辨率的 MODIS-VTCI 降尺度转换至 30 m, 并对降尺度转换的 VTCI 进行定量化验证。结果表明, 降尺度转换的 VTCI 与 Landsat-VTCI 间的相关系数和结构相似度均较大, 降尺度转换的 VTCI 与累计降水量间的相关性和 MODIS-VTCI 与累计降水量间的相关性相近, 且均高于 Landsat-VTCI 与累计降水量间的相关性, 说明降尺度转换的 VTCI 既考虑了 Landsat-VTCI 的空间变异, 又保持了 MODIS-VTCI 较为准确的定量化干旱监测特性。

关键词: 降尺度; 条件植被温度指数; 点扩散函数; 空间变异; 反演

中图分类号: S125; TP79 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)12-0165-09

Downscaling Transformation Method for Vegetation Temperature Condition Index Based on Point Spread Function

WANG Pengxin^{1,2} LIU Jiao^{1,2} LI Li^{1,2} ZHANG Shuyu³ XIE Yi^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Remote Sensing for Agri-Hazards, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China

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

Abstract: The vegetation temperature condition index (VTCI) has been widely used in drought monitoring, which is in the assumption that their shape of the scatter plots of normalized difference vegetation index (NDVI) and land surface temperature (LST) was a triangular at a regional level. Based on the vegetation temperature condition index (VTCI) drought monitoring results retrieved from the moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) data products (MODIS-VTCI) and the relative VTCI derived from the Landsat OLI/TIRS products (Landsat-VTCI) in the Guanzhong Plain, China, the MODIS-VTCI was transformed from a coarser resolution of 930 m to a finer resolution of 30 m by using the point spread function, called PSF-VTCI, and the PSF-VTCIs were validated for their quantification. The results showed that there was good agreement between the PSF-VTCIs and the Landsat-VTCIs terms of their correlation coefficient and structural similarity index. The correlation coefficients between the PSF-VTCIs and the cumulative precipitation were similar to those between the MODIS-VTCIs and the cumulative precipitation, which were both larger than those between the Landsat-VTCIs and the cumulative precipitation, indicating the PSF-VTCIs were not only related to the space heterogeneity of the Landsat-VTCIs but also the accurate quantitative drought monitoring results of the MODIS-VTCIs.

Key words: downscaling; vegetation temperature condition index; point spread function; spatial heterogeneity; retrieval

引言

条件植被温度指数 (Vegetation temperature

condition index, VTCI) 综合了归一化植被指数 (NDVI) 和地表温度 (LST), 是一种重要的干旱监测方法, 在干旱监测、预测和作物估产等研究中得到了

广泛应用^[1]。传统的干旱监测方法不仅费时费力,监测成本较高,而且在空间代表性以及采样周期上都具有一定的局限性^[2-3],而基于遥感数据的干旱监测,具有速度快、周期短、范围广、可近实时等特点,使其在农业干旱监测研究中具有非常重要的意义^[4]。

由于地表空间异质性的存在,应用多源遥感数据的地表信息时,需要以尺度转换的方式对不同时、空尺度的遥感数据进行整合。李小文^[5]认为尺度理论、尺度转换方法与尺度效应问题是定量遥感研究的大方向之一。AMAN等^[6]运用数量统计方法,发现高空间分辨率上NDVI平均值与低空间分辨率上相应位置的NDVI值基本呈线性关系。JIN等^[7]用主导覆盖类面积百分比来表征地表异质性,通过校正因子 R 构建各覆盖类尺度转换方法,实现了基于LAI的升尺度转换。DUAN等^[8]提出了一种基于地理加权回归的算法,并将MODIS LST从990 m降尺度转换至90 m,结果表明该方法能有效地表征地表空间异质性,尺度转换效果较好,但转换过程较为复杂。KIM等^[9]利用UCLA(University of California at Los Angeles)法以每个AMSR-E的土壤湿度产品(SM)像素对应的MODIS数据反演的土壤湿度指数(SW)的均值作为降尺度转换因子,将空间分辨率为25 km的AMSR-E土壤湿度下推至1 km。王鹏新等^[10]应用中值融合模型将基于Landsat数据反演的VTCI相对干湿结果和MODIS数据反演的量化干旱监测结果降尺度转换至Landsat数据空间分辨率的量化干旱监测结果,但基于均值和中值的尺度转换方法虽计算过程较为简便,却忽略了地表空间异质性对尺度转换的影响。刘学军等^[11]以不同尺度的点扩散函数(Point spread function, PSF)作为模板,通过其与原始DEM的卷积实现了不同分辨率DEM的升尺度转换,并证实PSF法受地形复杂度影响较小,尺度转换效果好。

考虑到PSF尺度转换方法能保持原数据的自相关性和空间异质性^[11],且利用PSF的尺度转换研究主要集中在升尺度转换,本文以陕西省关中平原为研究区域,应用PSF对关中平原2014—2016年3—5月份基于Aqua MODIS卫星遥感数据反演的VTCI(MODIS-VTCI)和Landsat 8卫星遥感数据反演的VTCI(Landsat-VTCI)进行空间降尺度转换,将MODIS-VTCI量化干旱监测结果从930 m降尺度转换至30 m(PSF-VTCI),并对降尺度的转换效果进行评价和验证,以期获得更为精确的量化干旱监测结果。

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,地理位置在 $106^{\circ}18' \sim 110^{\circ}38' E, 33^{\circ}35' \sim 35^{\circ}52' N$,区域总面积约55 833.9 km²。关中平原南靠秦岭,北部接壤黄土高原,西起宝鸡,东至潼关,西窄东宽,地势西高东低,地势平坦,土质肥沃,有泾、渭等河流提供水源,土地利用率高,适宜农业生产^[12]。该区域属典型的大陆性季风半湿润气候区,年平均降水量为500~700 mm,年平均气温为6~13℃^[4]。20世纪90年代以来,关中平原整体上气候暖干化特征显著,同时关中暖春、暖冬化、春旱、伏旱等也愈加显著^[13]。

1.2 数据处理

1.2.1 Landsat 数据的处理

选用2014—2016年3—5月份覆盖陕西关中平原东部、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2015年5月23日,127/36轨道上获取的日期为2015年4月28日和2016年3月13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)。首先对这些OLI/TIRS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^[14],再进行NDVI的计算和LST的反演。

(1) NDVI 的计算

应用Landsat 8 OLI数据近红外波段(第5波段)和红光波段(第4波段)的反射率计算NDVI^[10]。

(2) LST 的反演

应用Landsat 8的第10、11波段亮度温度(T_{10} 、 T_{11})反演LST(T_s)^[15-16]的方法为

$$T_s = A_0 + A_1 T_{10} - A_2 T_{11} \quad (1)$$

式中 T_{10} 、 T_{11} ——第10、11波段的亮度温度

A_0 、 A_1 、 A_2 ——系数

$$T_i = \frac{K_{2i}}{\ln\left(1 + \frac{K_{1i}}{L_i}\right)} \quad (i = 10, 11) \quad (2)$$

式中 L_i ——Landsat 8第*i*波段的辐射亮度

K_1 、 K_2 ——常数,从OLI/TIRS数据的头文件中获取

$$A_0 = \frac{-62.806D_{11}(1 - C_{10} - D_{10})}{D_{11}C_{10} - D_{10}C_{11}} + \frac{-67.173D_{10}(1 - C_{11} - D_{11})}{D_{11}C_{10} - D_{10}C_{11}} \quad (3)$$

$$A_1 = 1 + \frac{D_{10}}{D_{11}C_{10} - D_{10}C_{11}} + \frac{0.434D_{11}(1 - C_{10} - D_{10})}{D_{11}C_{10} - D_{10}C_{11}} \quad (4)$$

$$A_2 = \frac{D_{10}}{D_{11}C_{10} - D_{10}C_{11}} + \frac{0.470D_{10}(1 - C_{11} - D_{11})}{D_{11}C_{10} - D_{10}C_{11}} \quad (5)$$

其中 C_i 、 D_i 是由地表比辐射率 ε_i 和大气透射率 τ_i 所确定的参数。

$$C_i = \varepsilon_i \tau_i \quad (i = 10, 11) \quad (6)$$

$$D_i = (1 - \tau_i)[1 + (1 - \varepsilon_i)\tau_i] \quad (i = 10, 11) \quad (7)$$

根据覃志豪等^[17]对自然表面的比辐射率估计方法对 ε_i 进行估算, 将自然表面的像素简单看作是由不同比例的植被冠层和裸土组成的混合像素。当归一化植被指数 NDVI 小于 0.2 时, 该像素被认为是完全由裸土覆盖(第 10、11 波段的比辐射率分别为 0.967 67、0.977 67); 当归一化植被指数 NDVI 大于 0.5 时, 该像素被认为是完全由植被覆盖(第 10、11 波段的比辐射率分别为 0.986 72、0.989 90); 当归一化植被指数 NDVI 小于等于 0.5 大于等于 0.2 时, 该像素被认为是混合像素, 其比辐射率^[15]的计算方法为

$$\varepsilon_{10} = 0.986 72P_v R_v + 0.967 67(1 - P_v)R_s \quad (8)$$

$$\varepsilon_{11} = 0.989 9P_v R_v + 0.977 9(1 - P_v)R_s \quad (9)$$

其中
$$P_v = \frac{N - N_s}{N_v - N_s} \quad (10)$$

$$R_v = 0.933 2 + 0.058 5P_v \quad (11)$$

$$R_s = 0.990 2 + 0.106 8P_v \quad (12)$$

式中 N_v ——完全植被覆盖像素的归一化植被指数, 为 0.5

N_s ——完全裸土覆盖像素的归一化植被指数, 为 0.2

P_v ——植被覆盖度

R_v ——植被温度比率

R_s ——裸土温度比率

采用与 Landsat 8 影像获取日期相同且过境时刻相近的 MODIS L1B Calibrated Radiances 产品, 通过其第 2、19 波段反射率 ρ_2 、 ρ_{19} 的比值计算大气含水率 ω ^[17]

$$\omega = \left(0.02 - \frac{\ln \frac{\rho_{19}}{\rho_2}}{0.6321} \right)^2 \quad (13)$$

通过中纬度夏季大气模式估算 Landsat 8 TIRS 第 10、11 波段的大气透射率^[15]

$$\tau_{10} = -0.113 4\omega + 1.033 5 \quad (14)$$

$$\tau_{11} = -0.154 6\omega + 1.007 8 \quad (15)$$

1.2.2 MODIS 数据的处理

选用 Landsat 卫星数据过境日期所在旬的 Aqua MODIS 遥感数据产品, 包括日地表反射率产品 (MYD09GA) 和日 LST 产品 (MYD11A1), 应用日地表反射率产品计算日 NDVI。应用最大值合成技术对日 NDVI 和日 LST 数据进行合成处理, 分别生成每年 3—5 月份以旬为单位的 NDVI 和 LST 最大值合成产品; 基于多年某一旬的 LST 最大合成产品, 应用最大合成技术分别生成多年的旬 NDVI 和 LST 最大值合成产品; 对多年某一旬的 LST 最大值合成产品再进行逐像素取最小值, 生成多年旬 LST 最大-最小值合成产品^[18]。通过上述方法确定冷、热边界后, 根据 VTCI 计算方法, 生成 2014—2016 年 3—5 月份以旬为单位的 VTCI。

1.2.3 VTCI 的生成

条件植被温度指数 V 的计算方法为^[1]

$$V = \frac{L_{\max}(N_i) - L_{\min}(N_i)}{L_{\max}(N_i) + L_{\min}(N_i)} \quad (16)$$

其中
$$L_{\max}(N_i) = a + bN_i \quad (17)$$

$$L_{\min}(N_i) = a' + b'N_i \quad (18)$$

式中 N_i ——研究区域内, 第 i 个时期某一像素的归一化植被指数

$L_{\max}(N_i)$ ——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, 被称作 VTCI 的热边界

$L_{\min}(N_i)$ ——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, 被称作 VTCI 的冷边界

a 、 b 、 a' 、 b' ——待定系数

Aqua MODIS 卫星空间分辨率为 930 m (本研究使用的相关数据产品的空间分辨率为 926.6 m), 其时间分辨率高, 数据获取周期为 1 d, 数据源较为丰富, 使得其干旱监测结果能够综合多年间每旬的干旱情况。同时, 基于多年间以旬为单位的遥感反演数据特征空间较为稳定, 该特征空间在较长的时间周期内被认为是比较准确的, 可以客观地反映某一时期的干旱情况。因此, MODIS-VTCI 为量化的干旱监测结果。

与 Aqua MODIS 不同, Landsat 卫星数据空间分辨率为 30 m, 其获取周期较长, 过境周期达 16 d, 且受云的干扰较为严重, 有效数据较少且不提供地表反射率和 LST 产品, 因此在计算 Landsat-VTCI 时, 利用 Landsat OLI/TIRS 卫星过境时刻的数据计算得到 NDVI 和 LST, 根据 VTCI 计算方法生成。单景 Landsat-VTCI 计算结果反映的是卫星过境当天的地表干湿情况, 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^[10]。

1.2.4 坐标转换

Aqua MODIS 数据和 Landsat 数据投影方式分别为 Lambert 投影和 UTM 投影,因此,在应用两种遥感数据进行尺度转换之前需要先对这两种遥感数据的坐标进行转换。具体实现过程为: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。

2 点扩散函数条件植被温度指数降尺度转换方法

2.1 降尺度转换的过程

空间降尺度转换是将遥感影像从低空间分辨率转换到高空间分辨率。由于低空间分辨率遥感影像中的一个像素可以看作是高空空间分辨率的遥感影像中对应位置的多个像素的特征值^[19],因此假设一个 MODIS-VTCI 和对应位置的多个 Landsat-VTCI 的特征值之比等于每个降尺度转换的 VTCI 与每个 Landsat-VTCI 之比,从而获取 MODIS-VTCI 的空间降尺度转换结果。鉴于一个 MODIS-VTCI 表示的区域范围与 31 像素 × 31 像素 Landsat-VTCI 表示的区域范围大体一致,故以 31 像素 × 31 像素的 Landsat-VTCI 为一个局部窗口,对研究区域的 MODIS-VTCI 数据进行降尺度转换。即

$$V_D((i-1) \times 31 + l, (j-1) \times 31 + d) = V_M(i, j) \frac{V_L(l, d)}{V'_L(l, d)} \quad (19)$$

式中 V_D ——降尺度转换的 VTCI

$V_M(i, j)$ ——第 i 行第 j 列的基于 MODIS 数据的定量化干旱监测结果

$V_L(l, d)$ ——与某一 MODIS-VTCI 像素对应的第 l 行第 d 列 ($l = 1, 2, \dots, 31; d = 1, 2, \dots, 31$) 的基于 Landsat 数据的 VTCI 相对干湿结果

(l, d) ——特征值的平面坐标

$V'_L(l, d)$ ——与某一 MODIS-VTCI 像素对应的 Landsat-VTCI 局部窗口的特征值

2.2 点扩散函数的原理

考虑到空间变异是遥感影像尺度转换中不可回避的影响因素,因此利用能够充分表征地表空间异质性的点扩散函数 (PSF) 获取局部窗口特征值。

PSF 的原理是通过加权函数实现 Landsat 影像上不同位置的 VTCI 的距离加权,即以 Landsat-VTCI 局部窗口的中心 VTCI 的距离权重值为最大,使用加权函数以由中心向外 VTCI 距离权重值逐渐减小的赋权方式,计算 VTCI 的距离权重;再利用 PSF 与 Landsat-VTCI 进行卷积^[20],从而获得每个 Landsat-VTCI 局部窗口的特征值

$$V'_L(l, d) = \iint P(l-u, d-v) V_L(u, v) dkdl \quad (20)$$

式中 (u, v) ——局部窗口内 Landsat-VTCI 的平面坐标

$V_L(u, v)$ ——Landsat 数据在 (u, v) 处反演的 VTCI 的相对干湿结果

其中 $P(l, d) = k \exp\left(-\frac{l^2 + d^2}{2\sigma^2}\right)$ (21)

式中 k ——传感器的系统增益,由于数据预处理过程中考虑了系统的增益,取 $k = 1$

σ ——PSF 半径, 2σ 为 MODIS 数据的空间分辨率

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 × 31 像素的局部窗口,利用 PSF 对 MODIS 数据反演的定量化 VTCI 值降尺度转换至 30 m 空间分辨率的干旱监测结果。

2.3 降尺度转换结果的定量化验证方法

在关中平原东、中、西部地区选取 11 个旱作样点的 27 个实验样本(不同日期的相同旱作样点视为多个样本),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,并通过 PSF-VTCI 与以旬为单位的累计降水量、累计降水距平间的相关性分析,验证 PSF-VTCI 定量化干旱监测结果。累计降水时间的降水量从卫星过境日期以旬为单位向前推算,例如,分析 2016 年 3 月中旬的相关性时,累计 30 d 的降水时间为 2016 年 2 月 21 日—2016 年 3 月 20 日的累计降水量。累计降水距平为 1975—2016 年(42 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。

2.4 降尺度转换结果的定量评价指标

为了对降尺度转换模型的精度进行定量评价,选用相关系数(r)和结构相似度(SSIM)^[10,21]等参数

作为评价指标对降尺度转换的 VTCI 进行精度评价。相关系数和结构相似度越大,降尺度转换效果越好^[10]。

3 结果与分析

3.1 降尺度转换 VTCI 的定性分析

利用基于 PSF 的降尺度转换方法对 6 景 MODIS-VTCI 进行降尺度转换获得 PSF-VTCI,并与同一区域范围的 Landsat-VTCI 和 MODIS-VTCI 的空间特征进行定性分析发现,PSF-VTCI 影像均呈现出比 MODIS-VTCI 较为丰富的空间信息,具有与 Landsat-VTCI 较为吻合的纹理特征。其中,2014 年 3 月中旬(126/36)的 PSF-VTCI(图 1c)影像中黄河与渭河交汇处的呈现较为明显,且水域范围和水体形状均与 Landsat-VTCI 影像(图 1b)大体一致,比 MODIS-VTCI 影像(图 1a)清晰;2014 年 3 月中旬(128/36)和 2014 年 5 月中旬(128/36)均为关中平原西部区域,通过目视解译 Landsat-VTCI 影像(图 1e、1h)发现该区域分布有水库,在 PSF-VTCI 的两景影像(图 1f、1i)中均能清晰地呈现水库的准确位置,MODIS-VTCI 影像(图 1d)由于 2014 年 3 月中

旬(128/36)整体偏暗,因而影像中水库的位置能够依稀可见,但在 5 月中旬 MODIS-VTCI 影像(图 1g)整体偏亮时,水库的位置则很难辨别;而 PSF-VTCI 影像(图 1i)即使在整体偏亮的环境下仍能准确地呈现出与 Landsat-VTCI 影像相同的水库位置及水体形状。该结果表明,PSF-VTCI 影像纹理特征及空间分布均与 Landsat-VTCI 保持一致,比 MODIS-VTCI 影像呈现得更准确,能够较为精细地刻画研究区域地表空间异质性。

3.2 降尺度转换 VTCI 的定量化验证

降水量是地表干旱的主要制约因素之一,且 VTCI 与降水量存在一定的相关性^[22]。Landsat-VTCI 是基于卫星过境时刻的 NDVI 和 LST 数据反演的干旱监测指标,其结果仅能反映该时期的干旱情况,故 Landsat-VTCI 与其他时期的累计降水量之间具有较小的可比性。而 MODIS-VTCI 是综合多年的 NDVI 和 LST 数据反演的近实时、量化的干旱监测指标,能够反映一段时期内的地表干旱情况,故 MODIS-VTCI 与某段时期内的累计降水量间存在较大相关性。

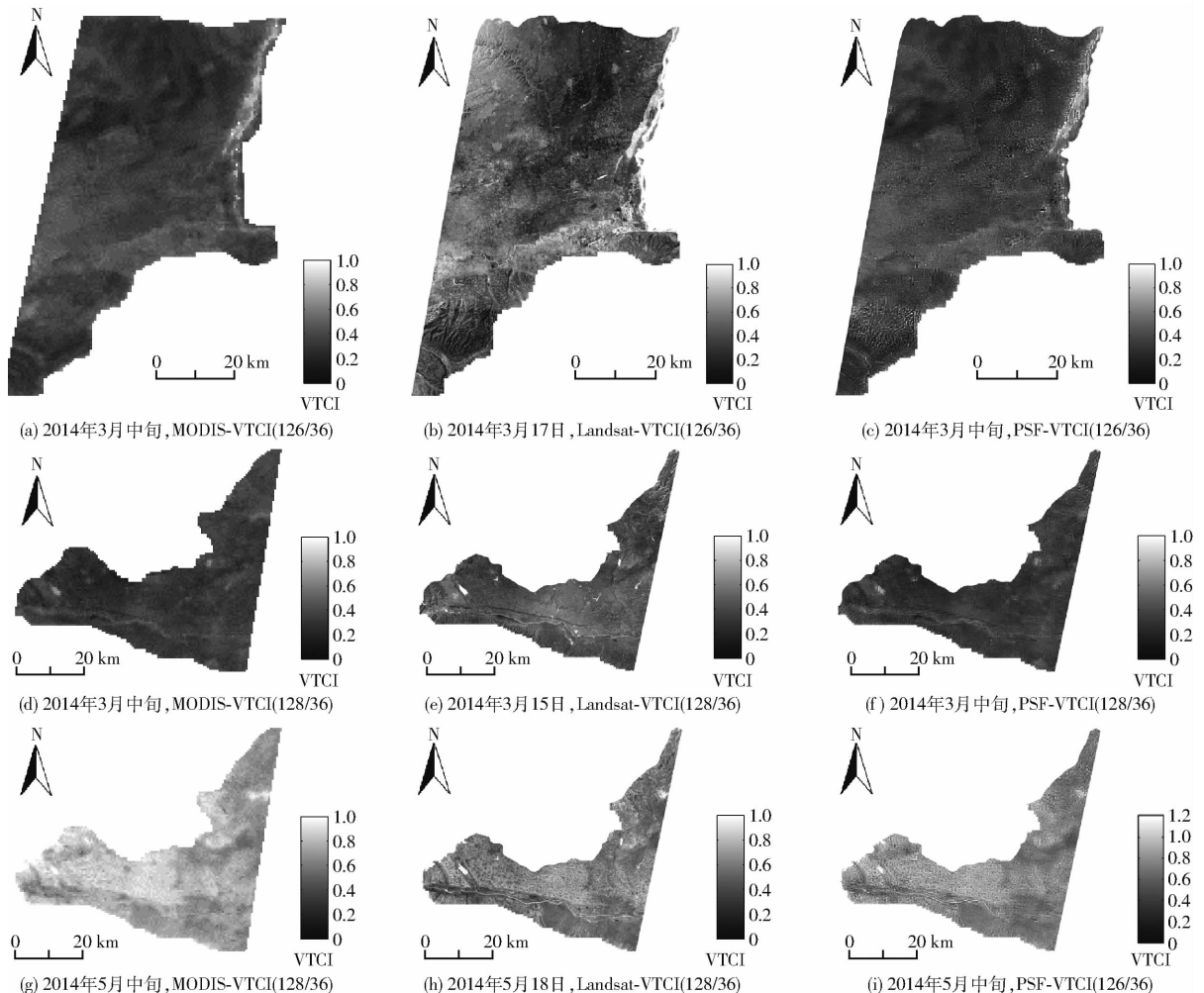


图 1 Landsat-VTCI 与 MODIS-VTCI、PSF-VTCI 监测结果

Fig. 1 Drought monitoring results of MODIS-VTCIs, Landsat-VTCIs and PSF-VTCIs

为此,以 PSF-VTCI 与不同时间尺度的累计降水量间的相关性为依据,对其干旱监测结果的近实时性和定量化特性进行验证。分析 PSF-VTCI、MODIS-VTCI 和 Landsat-VTCI 与累计降水量之间相关性(表 1),可以看出 PSF-VTCI、MODIS-VTCI 和 Landsat-VTCI 与不同时间尺度的累计降水量间的相关系数变化范围分别为 0.179 0 ~ 0.796 2、0.246 1 ~ 0.826 1 和 0.154 2 ~ 0.670 2,且 PSF-VTCI 与累计降水量间的相关系数和 MODIS-VTCI 相关系数差值变化范围为 0.007 4 ~ 0.067 1,而 Landsat-VTCI 与累计降水量间的相关系数与 MODIS-VTCI 相关系数差值变化范围为 0.091 9 ~ 0.163 2,说明 PSF-VTCI 与累计降水量间的相关系数与 MODIS-VTCI 更为接近。其中,当累计降水时间为 10 d 时,MODIS-VTCI、PSF-VTCI 和 Landsat-VTCI 与累计降水量间的相关系数分别为 0.246 1、0.179 0 和 0.154 2,说明当累计降水时间为 10 d 时,MODIS-VTCI、PSF-VTCI 和 Landsat-VTCI 与累计降水量间的相关性依次降低,PSF-VTCI 的干旱监测结果精度较 Landsat-VTCI 有所提高。当累计降水时间为 20 d 时,MODIS-VTCI 和 PSF-VTCI 与累计降水量间的相关系数均较大,分别为 0.733 4 和 0.695 3,而 Landsat-VTCI 与此时间尺度的累计降水量间的相关系数较小,为 0.588 5,说明累计降水时间为 20 d 和累计降水时间为 10 d 的结果一致,均为 MODIS-VTCI 和 PSF-VTCI 与累计降水量间的相关性高于 Landsat-VTCI 与累计降水间的相关性。当累计降水时间为 30 d 时,MODIS-VTCI、PSF-VTCI 和 Landsat-VTCI 与累计降水量间的相关性与前两个时间尺度的结果相同,均为 MODIS-VTCI 和 PSF-VTCI 与累计降水量间的相关性较为接近,相比于 Landsat-VTCI 与该时间尺度的累计降水量间的相关性较高。

表 1 VTCI 与累计降水量间的线性相关系数

Tab.1 Linear correlation coefficients between cumulative precipitation and VTCIs

累计时间/d	Landsat-VTCI	MODIS-VTCI	PSF-VTCI
10	0.154 2	0.246 1	0.179 0
20	0.588 5 **	0.733 4 ***	0.695 3 ***
30	0.458 0 *	0.605 2 **	0.552 0 **
60	0.670 2 ***	0.826 1 ***	0.796 2 ***
90	0.659 9 ***	0.823 1 ***	0.791 2 ***
180	0.666 9 ***	0.773 4 ***	0.766 5 ***

注: *、** 和 *** 表示统计显著性水平分别为 0.05、0.01 和 0.001,下同。

分析 MODIS-VTCI、PSF-VTCI 和 Landsat-VTCI 与累计降水距平间的相关性(表 2)发现,当累计降水时间分别为 10 d、20 d 和 30 d 时,MODIS-VTCI、

PSF-VTCI 和 Landsat-VTCI 与累计降水距平间的相关性和三者与累计降水量间的相关性规律一致,为 PSF-VTCI 和 MODIS-VTCI 与累计降水距平间的相关性接近,二者均大于 Landsat-VTCI 与累计降水距平间的相关性。这些结果表明,PSF-VTCI 和 MODIS-VTCI 与近 30 d 内的累计降水量和累计降水距平间均具有较高的相关性,能准确地反映该段时间内的干旱情况,具有定量化特性。且 PSF-VTCI 的近实时性也好于 Landsat-VTCI。

表 2 VTCI 与累计降水距平间的线性相关系数

Tab.2 Linear correlation coefficients between cumulative anomaly precipitation and VTCIs

累计时间/d	Landsat-VTCI	MODIS-VTCI	PSF-VTCI
10	0.102 7	0.235 0	0.167 4
20	0.550 1 **	0.743 7 ***	0.705 6 ***
30	0.428 2 *	0.600 8 **	0.547 9 **
60	0.633 3 ***	0.818 3 ***	0.789 2 ***
90	0.600 6 ***	0.803 4 ***	0.773 0 ***
180	0.494 5 **	0.742 5 ***	0.739 6 ***

3.3 降尺度转换 VTCI 的定量评价

为定量评价降尺度转换的 VTCI 影像,选用相关系数和结构相似度作为评价指标。从相关系数来看,6 景 Landsat-VTCI 与 PSF-VTCI 影像间的相关系数均达 0.627 0 以上(表 3),说明二者相关性整体较高。从结构相似度来看,6 景影像的 PSF-VTCI 与 Landsat-VTCI 间的结构相似度均较大,最小为 0.613 1,说明 PSF 降尺度转换的 VTCI 与 Landsat-VTCI 的空间结构和地表空间异质性均较为相近,降尺度转换结果能较为精确的刻画研究区域的纹理特征。从 6 景 Landsat-VTCI 影像与 PSF-VTCI 影像间的相关系数和结构相似度的变化规律来看,二者的最小值所在时间均为 2016 年 3 月中旬(127/36),最大值均出现在 2015 年 4 月下旬(127/36),说明 Landsat-VTCI 与 PSF-VTCI 间的相关系数和结构相似度的变化规律一致,降尺度转换结果较为准确,PSF 降尺度转换效果较好。

表 3 Landsat-VTCI 与 PSF-VTCI 间的相关系数和结构相似度

Tab.3 Correlation coefficients and structural similarity between PSF-VTCIs and Landsat-VTCIs

时间	相关系数	结构相似度
2014 年 3 月中旬(126/36)	0.778 4	0.753 9
2015 年 5 月下旬(126/36)	0.784 9	0.728 0
2015 年 4 月下旬(127/36)	0.797 0	0.790 6
2016 年 3 月中旬(127/36)	0.627 0	0.613 1
2014 年 3 月中旬(128/36)	0.695 4	0.641 1
2014 年 5 月中旬(128/36)	0.783 9	0.751 3

3.4 VTCI 干旱监测结果的对比分析

在 6 景降尺度转换影像中, 2014 年 3 月中旬 (128/36) 和 2014 年 5 月中旬 (128/36) 为相同区域内不同日期获得的两景影像, 从二者的 PSF-VTCI、Landsat-VTCI 和 MODIS-VTCI 的频数分布图 (图 2) 可以看出, 2014 年 3 月中旬 (128/36) MODIS-VTCI (图 2a) 集中分布于 $[0.2, 0.5]$ 之间, 峰值处 VTCI 为 0.3, VTCI 均整体偏小, 表明关中平原西部在该时期地表偏干旱。PSF-VTCI (图 2c) 集中分布于 $[0.1, 0.6]$ 之间, 峰值处 VTCI 为 0.3, 可见, PSF-VTCI 分布规律与 MODIS-VTCI 分布规律相近, 两者干旱监测结果相同, PSF-VTCI 监测结果较为准确; 而 Landsat-VTCI (图 2b) 集中分布于 $[0.1, 0.9]$ 之间, 峰值处 VTCI 为 0.45, 整体较 MODIS-VTCI 偏

大, 表明 Landsat-VTCI 监测结果与 MODIS-VTCI 所呈现的地表干湿情况有一定的差异, 其干旱监测结果较不准确, 是一种相对干旱的监测结果。2014 年 5 月中旬 (128/36) MODIS-VTCI (图 2d) 集中分布于 $[0.5, 1.0]$ 之间, 峰值处 VTCI 为 0.7, VTCI 整体偏大, 该景影像的 PSF-VTCI (图 2f) 集中分布于 $[0.4, 1.0]$ 之间, 峰值处 VTCI 为 0.7, 与 MODIS-VTCI 干旱监测结果相近, 而与之区域和时间相对应的 Landsat-VTCI (图 2e) 集中分布于 $[0.3, 0.9]$ 之间, 峰值处 VTCI 为 0.55, 整体较 MODIS-VTCI 偏小, 这些结果也表明, PSF-VTCI 与 MODIS-VTCI 所呈现的地表干湿情况一致, 且比 Landsat-VTCI 所呈现的地表干湿情况更为精确, 能够准确地反映关中平原的干旱情况。

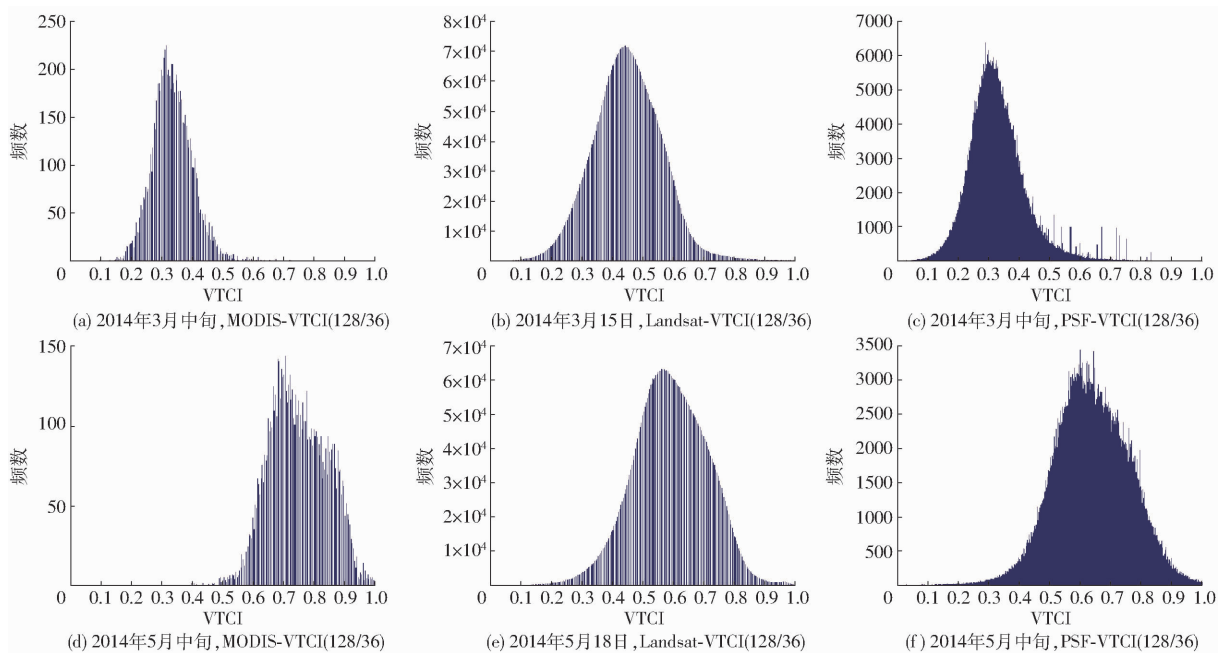


图 2 MODIS-VTCI、Landsat-VTCI 和 PSF-VTCI 频数分布图

Fig. 2 Frequency distribution diagrams of MODIS-VTCIs, Landsat-VTCIs and PSF-VTCIs

4 讨论

研究采用反演精度较高的劈窗算法^[23]对 Landsat 的地表温度 LST 进行反演, 获得了较为准确的 Landsat-VTCI 相对干湿监测结果, 并应用 PSF 对 Landsat-VTCI 与 MODIS-VTCI 进行降尺度转换, 所得 PSF-VTCI 不仅考虑了 Landsat-VTCI 的空间变异, 而且保持了 MODIS-VTCI 定量化干旱监测结果。这是由于一方面, 空间降尺度转换模型本身有效结合了 Landsat-VTCI 数据和 MODIS-VTCI 数据, 充分利用了二者的优势, 保持了原影像数据的特点。另一方面, 点扩散函数的原理是对不同位置的 Landsat-VTCI 进行距离加权, 将邻近 VTCI 对中心像素的影响作为尺度转

换的主要因子, 充分考虑了每个 VTCI 与其邻近 VTCI 间的关系, 即 Landsat 影像的空间变异, 使降尺度转换效果更好。

空间变异对于尺度转换效果具有较为重要的影响, 对空间变异性表征越准确的方法降尺度转换效果越好。因此, 探索能够更为准确地表示研究区域地表空间变异性以提高尺度转换效果的降尺度转换方法, 是未来降尺度转换研究工作的重点。

5 结论

(1) 应用 PSF 对关中平原 6 景 MODIS-VTCI 进行降尺度转换, 其转换结果 PSF-VTCI 在纹理特征上与 Landsat-VTCI 相似, 所呈现的地表信息较为详细, 表明 PSF-VTCI 体现了研究区域较多的空间变

异。同时, Landsat-VTCI 与同一区域范围的 PSF-VTCI 间的相关系数和结构相似度均较大且二者变化规律一致,表明降尺度转换结果较为准确,PSF 降尺度转换效果较好。

(2)分析 VTCI 与累计降水量数据间的相关性,结果表明,PSF-VTCI 和 MODIS-VTCI 均与近期不同时间尺度的累计降水数据密切相关,该时期二者与累计降水数据间的相关性均优于 Landsat-VTCI 与累计降水数据间的相关性,且 PSF-VTCI 的干旱监测

结果能准确地反映该段时期的地表干旱情况,具有量化特性,且近实时性较好。

(3)将 PSF-VTCI 监测结果和 Landsat-VTCI 监测结果分别与 MODIS-VTCI 监测结果进行对比,结果表明,PSF-VTCI 的频数分布情况与 MODIS-VTCI 保持一致,而 Landsat-VTCI 的频数分布情况与 MODIS-VTCI 存在一定的差别,说明 PSF-VTCI 所反映的关中平原地表干湿情况比 Landsat-VTCI 更为准确,适用于关中平原的量化干旱监测研究。

参 考 文 献

- 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)
- 孙灏, 陈云浩, 孙洪泉. 典型农业干旱遥感监测指数的比较及分类体系[J/OL]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 147-154. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20121423&flag=1. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2012.14.023.
SUN Hao, CHEN Yunhao, SUN Hongquan. Comparisons and classification system of typical remote sensing indexes for agricultural drought[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(14): 147-154. (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/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151625&flag=1. 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)
- 吴炳方. 中国农情遥感速报系统[J]. 遥感学报, 2004, 8(6): 481-497.
WU Bingfang. China crop watch system with remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(6): 481-497. (in Chinese)
- 李小文. 定量遥感的发展与创新[J]. 河南大学学报:自然科学版, 2005, 35(4): 49-56.
LI Xiaowen. Retrospect prospect and innovation in quantitative remote sensing[J]. Journal of Henan University: Natural Science, 2005, 35(4): 49-56. (in Chinese)
- AMAN A, RANDRIAMANANTENA H P, PODAIRE A, et al. Upscale integration of normalized difference vegetation index: the problem of spatial heterogeneity[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1992, 30(2): 326-338.
- JIN Z, TIAN Q, CHEN J M, et al. Spatial scaling between leaf area index maps of different resolutions[J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85(3): 628-637.
- DUAN Sibao, LI Zhaoliang. Spatial downscaling of MODIS land surface temperatures using geographically weighted regression: case study in Northern China[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2016, 54(11): 1-12.
- 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.
- 王鹏新, 刘郊, 李俐, 等. 应用中值融合模型的条件植被温度指数降尺度转换研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 100-108. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170613&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.013.
WANG Pengxin, LIU Jiao, LI Li, et al. Down-scaling transformation of vegetation temperature condition index using the median fusion model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 100-108. (in Chinese)
- 刘学军, 王彦芳, 晋蓓. 利用点扩散函数进行 DEM 尺度转换[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2009, 34(12): 1458-1462.
LIU Xuejun, WANG Yanfang, JIN Bei. A upscaling method of digital elevation model with point spread function[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(12): 1458-1462. (in Chinese)
- 申健, 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?flag=1&file_no=20160837&journal_id=jcsam. 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)

- 13 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)
- 14 赵静, 李静, 柳钦火, 等. 联合 HJ-1/CCD 和 Landsat 8/OLI 数据反演黑河中游叶面积指数[J]. 遥感学报, 2015, 19(5): 733–749.
ZHAO Jing, LI Jing, LIU Qinhuo, et al. Leaf area index inversion combining with HJ-1/CCD and Landsat 8/OLI data in the middle reach of the Heihe River basin[J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(5): 733–749. (in Chinese)
- 15 胡德勇, 乔琨, 王兴玲, 等. 单窗算法结合 Landsat 8 热红外数据反演地表温度[J]. 遥感学报, 2015, 19(6): 964–976.
HU Deyong, QIAO Kun, WANG Xingling, et al. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared data using mono-window algorithm[J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(6): 964–976. (in Chinese)
- 16 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.
- 17 覃志豪, 李文娟, 徐斌, 等. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J]. 国土资源遥感, 2004, 16(3): 28–32.
QIN Zhihao, LI Wenjuan, XU Bin, et al. The estimation of land surface emissivity for landsat TM6[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2004, 16(3): 28–32. (in Chinese)
- 18 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)
- 19 张亚丽, 王万同. 遥感估算伊洛河流域地表蒸散的空间尺度转换[J]. 测绘学报, 2013, 42(6): 906–912.
ZHANG Yali, WANG Wantong. Spatial scaling transformation of evapotranspiration based on remote sensing in Yiluo River basin[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(6): 906–912. (in Chinese)
- 20 王鹏新, 吴高峰, 白雪娇, 等. 基于 Landsat 数据的条件植被温度指数升尺度转换方法[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 264–271. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150738&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.038.
WANG Pengxin, WU Gaofeng, BAI Xuejiao, et al. Up-scaling transformation methods for vegetation temperature condition index retrieved from Landsat data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 264–271. (in Chinese)
- 21 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.
- 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, 2010, 29(29): 5133–5144.
- 23 宋挺, 段峥, 刘军志, 等. Landsat 8 数据地表温度反演算法对比[J]. 遥感学报, 2015, 19(3): 451–464.
SONG Ting, DUAN Zheng, LIU Junzhi, et al. Comparison of four algorithms to retrieve land surface temperature using Landsat 8 satellite[J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(3): 451–464. (in Chinese)