doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.047

基于结构相似度的关中平原旱情空间分布特征*

白雪娇[1,2]　王鹏新[1,2]　解　毅[1,2]　王　蕾[1,2]　贺　鹏[1,2]

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 季节性干旱是影响关中平原农业生产最主要的灾害,研究气候变化背景下的关中平原旱情空间分布特征和变化规律具有重要的科学意义与应用价值。基于关中平原 2003—2014 年每年 3 月上旬—5 月下旬的旬时间尺度条件植被温度指数(VTCI)的干旱监测结果,采用结构相似度(SSIM)研究关中平原 VTCI 的空间变化特征及其影响因子。结果表明:关中平原 VTCI 的空间变化特征具有明显的区域差异性和空间异质性,结构性因素是 VTCI 空间变化的主要影响因子,总体上受水热、地形分布格局等因素的结构性影响,但微地貌、下垫面覆盖的不同及变化和人为因素导致其主体产生变化。当微地貌、下垫面覆盖类型和人为因素成为主导因子时,结构相似度与其高度相关,对其变化的响应非常敏感。与利用某些指数直接作为干旱的指示因子或构建统计模型分析干旱特征相比,引入研究图像的结构信息的参量 SSIM 实现了定量、准确、形象地描述干旱的空间分布特征和变化规律。

关键词: 关中平原　旱情　空间分布特征　条件植被温度指数　结构相似度　影响因子

中图分类号: S127　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2015)11-0345-07

Spatial Distribution Characteristics of Droughts in Guanzhong Plain Based on Structural Similarity

Bai Xuejiao[1,2]　Wang Pengxin[1,2]　Xie Yi[1,2]　Wang Lei[1,2]　He Peng[1,2]

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

2. *Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology*, *Ministry of Agriculture*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Seasonal drought is a main disaster for agricultural production in Guanzhong Plain, and research on spatial distribution characteristics and variation patterns of droughts under the global climate change is of great theoretic significance and applied value. Based on time series of drought monitoring results of vegetation temperature condition index (VTCI) from early March to late May during 2003 to 2014, the structural similarity (SSIM) was applied to analyze spatial characteristics of the time series of VTCI in the plain, and impact factors which affecting the spatial characteristics were analyzed as well. The results showed that the spatial characteristics of VTCI in Guanzhong Plain had distinctive regional variations and spatial heterogeneity, and the structural factor was the main factor affecting the variations. In general, the spatial variations of VTCI were influenced by the distribution pattern of water and heat conditions and terrain, as well as the microtopography, the underlying surface and the human factor. The variations were highly correlated and very sensitive to the changes in the microtopography, the underlying surface or the human factor when they became the dominant factors. Compared with other analytical methods that used some indexes as the indicators of droughts or made statistical models, the SSIM which has the structure information of images was a better approach for indicating the spatial characteristics of the droughts and their variations quantitatively, accurately and conveniently.

Key words: Guanzhong Plain　Drought　Spatial distribution characteristic　Vegetation temperature condition index　Structural similarity　Impact factor

收稿日期: 2015-04-09　修回日期: 2015-06-23

*国家自然科学基金资助项目(41371390)

作者简介: 白雪娇,博士生,主要从事定量遥感及其在农业中的应用研究,E-mail: baixuejiaoz@126.com

通讯作者: 王鹏新,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

干旱作为全球最严重的气象灾害之一,其频繁发生、影响范围大、持续时间长,对农业生产造成了严重的影响。中国是世界上旱灾最为频发和严重的国家之一,在全球气候变暖背景下更是具有面积增大和频率加快的趋势,全国每年都有不同程度的旱灾发生,其空间分布亦经常发生变化[1-3]。对于地处内陆、远离海洋的陕西粮仓关中平原,对干旱的响应极为敏感,季节性干旱是该区农业发展的主要限制因素之一。不少学者通过对关中平原历史文献资料和气象资料的收集、统计和分析,采用相关性分析、气温突变分析、趋势分析、数理统计、游程理论、马尔科夫过程分析等方法,对关中平原近几十年干旱灾害的等级序列、时间变化、空间变化和干旱变化趋势拟合进行了一系列的研究,以干旱强度、周期和空间变化等指标,分析了关中平原旱情的特征。关中平原农业干旱季节性和区域性特征明显,总体上气象干旱程度加剧且由西南向东北逐渐增加,关中平原中北部和东部为旱灾的高发区,尤其是渭南地区旱灾发生次数远远高于其他地区;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、秋旱等也愈加显著[4-9]。关中平原地形、气候多变,同时长期受到季节性干旱灾害的影响,因此如何客观准确地描述该区域干旱的空间分布规律以有效应对其对区域农业的影响仍是面临的重要科学问题。

目前对关中平原干旱变化特征的研究成果较多,但这些研究多数是基于站点气象和水文数据,由于站点较少、分布稀疏且资料有限,在空间尺度上缺乏连续覆盖性,对于非站点区域的干旱监测,一般使用空间插值方法将干旱指数从点尺度扩展到面尺度,然而空间插值过程受很多因素影响,会引入很多不确定性,因此区域代表性不强,缺乏宏观性、综合性的空间变化性分析。随着遥感技术的发展,具有空间连续性的不同尺度多源遥感数据的获取,为实时、精确、动态和大范围反演土壤含水率、地表温度、作物水分胁迫等地面旱情信息提供了技术手段。针对干旱问题,国内外研究者提出了多种监测方法,有基于条件植被指数 VCI[10]、条件温度指数 TCI[11]、距平植被指数[12]等适用于年际间大尺度和区域级旱情的干旱监测方法。王鹏新等[13]基于 NDVI 和 LST 的散点图呈三角形区域分布的条件,提出了条件植被温度指数(VTCI)的干旱监测方法,并在实时干旱监测、干旱预测和影响评估研究中得到了应用[14-15]。目前,对空间尺度的干旱进行评价时,大多仅考虑了相关要素在空间尺度上数值的大小,对区域干旱要素空间尺度的变化规律及其变化趋势的定量研究还相对较少。Wang 等[16]提出了一种用于测定图像之间相似度的方法:结构相似度 SSIM (Structural similarity),是以一幅图像为参考数据,通过比较待评价图像与参考图像在空间结构上的差异评价其相对于参考数据的质量。SSIM 引入了图像的结构信息,从整体上充分地考虑图像内容的复杂性和人眼的视觉特性,算法简单高效,易于实现,与主观评价高度相关。遥感数据的结构信息能够反映对应场景中的空间结构,而同一地区的遥感数据具有相同或相似的空间结构,SSIM 是对空间域图像的结构信息和结构特征的相似度的度量,因此可以借助 SSIM 研究关中平原 VTCI 图像的结构信息和结构特征的变化规律。目前,借助 SSIM 研究遥感特征指数空间结构信息的特征和变化规律还鲜见报道。

本研究利用关中平原 2003—2014 年 Aqua MODIS VTCI 时间序列数据,采用结构相似度的方法,通过计算不同距离缓冲区 VTCI 的 SSIM 以得到 VTCI 在空间上结构信息和结构特征的相似性程度,探讨分析关中平原旱情在空间上的分布及变化,实现定量、准确和形象地描述和分析关中平原干旱的空间分布特征和变化规律,旨在为整个关中平原的干旱灾害监测等提供基础数据,为有关部门制定政策提供科学的决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

关中平原又称渭河平原,位于陕西省中部,西起宝鸡、东至潼关,南接秦岭、北到陕北高原,海拔高度 325 ~ 800 m,西窄东宽,总面积约 5.55×10^4 km^2。关中平原南北高、中间低,西部高、东部低,中部地势平坦,土质疏松肥沃,又有泾、渭等河流提供水源,十分适宜耕作,是陕西省最重要的农耕区,是我国重要的商品粮产区。地处暖温带半湿润季风气候区,是气候变化的敏感区,年平均温度 6 ~ 13℃,年均降水量 500 ~ 600 mm,雨热同期,冬春降水较少,春、伏旱频繁发生[17-18]。研究区内土地利用结构在长期的演变过程中发生重大变化,生态环境也发生明显变化。图 1 为研究区概况图。

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 数据来源

本文数据源主要是 Aqua MODIS 数据产品,包括日反射率产品(MYD09GA)和日 LST 产品(MYD11A1)。本文还采用了 DEM 数据以及 TM 数

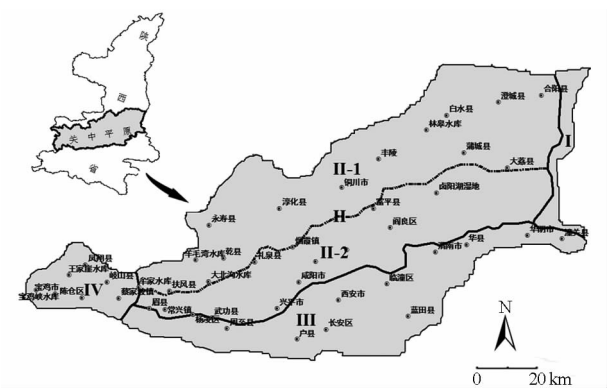

图 1　研究区概况图

Fig. 1　Map of study area

据辅助确定研究区范围，其他数据还包括陕西省行政区划图、土地利用现状图、地貌图以及气象站点的气温、降水等。

1.2.2　条件植被温度指数的生成

条件植被温度指数（VTCI）是基于遥感反演的归一化植被指数（NDVI）和地表温度（LST）特征空间呈三角形区域分布的特点提出的，用于监测旱情状况。基于日 NDVI 和 LST，应用最大值合成技术分别生成旬 NDVI 和 LST 最大值合成产品，并以此计算条件植被温度指数 VTCI[13, 19]。VTCI 的计算方法为

$$V = \frac{L_{\max}(N_i) - L(N_i)}{L_{\max}(N_i) - L_{\min}(N_i)} \tag{1}$$

其中

$$L_{\max}(N_i) = a + bN_i \tag{2}$$

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

式中　N_i——第 i 个时期（旬）某一像素的 NDVI 值

$L(N_i)$——某一像素的 NDVI 值为 N_i 时的 LST 值

$L_{\max}(N_i)$——研究区域内当 N_i 值等于某一特定值时的 LST 最大值

$L_{\min}(N_i)$——研究区域内当 N_i 值等于某一特定值时的 LST 最小值

a、b、a'、b'——待定系数，由研究区域内的 NDVI 和 LST 散点图近似获得

a、b、a'和 b' 4 个待定系数的确定非常关键。本研究采用最大-最小值合成方法，使用最大值合成技术，即应用多年的旬 NDVI 和 LST 最大值合成产品确定热边界 $L_{\max}$的系数 a 和 b；冷边界 $L_{\min}$的系数 a' 和 b'需先对同一年份某旬的多景影像进行 LST 的旬最大值合成，再对不同年份间的旬 LST 最大值合成产品进行 LST 的最小值合成，然后根据 LST 最大-最小值合成产品和 NDVI 最大值合成产品来确定[19]。VTCI 既考虑了研究区域内 NDVI 的变化，又考虑了 NDVI 值相同时 LST 的变化，其取值范围为 0～1。VTCI 值越小，旱情越严重；VTCI 值越大，则相反。计算关中平原从 2003—2014 年每年 3 月上旬—5 月下旬共 108 旬的 VTCI 数据。

1.2.3　结构相似度的计算

图像的结构携带了图像最主要的信息，结构相似度（SSIM）从图像组成的角度解释结构信息，图像的结构信息由亮度、对比度和结构度 3 个要素组成[16]。设 X、Y 分别表示待比较的以某 2 个像元为中心的 3×3 局部区域内的所有像元形成的子块，则它们之间的结构相似度 SSIM 为

$$S(X,Y) = l(X,Y)^{\alpha} c(X,Y)^{\beta} s(X,Y)^{\gamma} \tag{4}$$

其中

$$l(X,Y) = \frac{2\mu_X\mu_Y + C_1}{\mu_X^2 + \mu_Y^2 + C_1} \tag{5}$$

$$c(X,Y) = \frac{2\delta_X\delta_Y + C_2}{\delta_X^2 + \delta_Y^2 + C_2} \tag{6}$$

$$s(X,Y) = \frac{\delta_{XY} + C_3}{\delta_X\delta_Y + C_3} \tag{7}$$

式中　$l(X,Y)$——亮度比较函数

$c(X,Y)$——对比度比较函数

$s(X,Y)$——结构比较函数

μ_X、μ_Y——X、Y 子块 VTCI 的均值

δ_X、δ_Y——X、Y 子块 VTCI 的方差

δ_{XY}——X、Y 子块 VTCI 的协方差

α、β、γ——参数，用来调整 3 个比较函数所占比重，取 $\alpha = \beta = \gamma = 1$

C_1、C_2、C_3——常量，用于避免分式出现异常情况而引入，取 $C_3 = C_2/2$

本研究中，考虑到 VTCI 的值域范围（0～1）及其对 SSIM 值的影响，所以令 $C_1 = C_2 = 0.000\,1$。

式（4）经简化，可以表示为

$$S(X,Y) = \frac{(2\mu_X\mu_Y + C_1)(2\delta_{XY} + C_2)}{(\mu_X^2 + \mu_Y^2 + C_1)(\delta_X^2 + \delta_Y^2 + C_2)} \tag{8}$$

SSIM 值越高，表示 2 个局部像元子块越相似。分别计算研究区域 2003—2014 年共 108 旬 VTCI 每旬的 SSIM，定义研究区域左上角第 1 行开始 3×3局部像元子块为 X 域，依次向下一行 3×3 局部像元子块为 Y 域（考虑到关中地形受渭河影响南北高中间低的特点，采用纵向循环比较），依次循环计算整个研究区域的 SSIM 值（图 2），生成 SSIM 值图。图中表现出的颜色越暗，表示区域内 SSIM 值越低，说明 2 个局部像元子块由亮度、对比度和结构度构成的结构信息差异越大，即旱情差异越大，反之旱情差异较小。根据生成的研究区域 SSIM 图中偏亮（SSIM 值较大）和偏暗（SSIM 值较小）局部区域的地理位置、大小和明暗程度对研究区域 VTCI 的空间分布特征及其主要影响因子展开研究和论述。

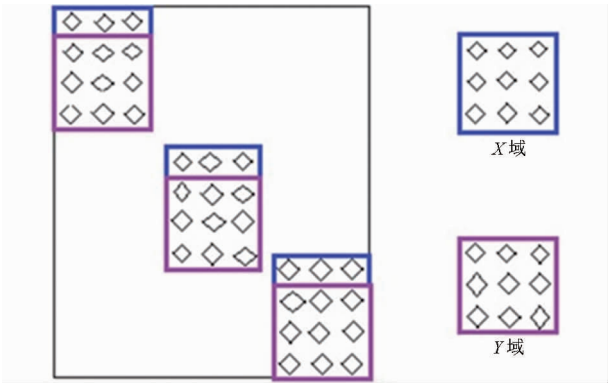

图 2 $X-Y$ 域定义

Fig. 2 Definition of $X-Y$ field

2 结果与分析

2.1 2013 年关中平原旱情概况

关中平原素有“十年九旱”之称,是春旱的高发地。据气象部门报道,2013 年陕西省遭遇了自 1961 年以来最严重的一次气候干旱。2012 年 10 月—2013 年 3 月,陕西全省平均降水量 55.9 mm,为 1961 年以来同期第一最少年,与常年同期相比偏少 52%。同时全省平均气温 5.0℃,比历史同期偏高 0.8℃。关中平原降水稀少,与历年同期相比偏少 50% ~90%[20]。基于 MODIS 卫星遥感数据,采用条件植被温度指数(VTCI)干旱监测方法对关中平原 2013 年 3—5 月共 9 旬的旱情进行了实时监测和分析,结果如图 3 所示。可知,2013 年 3 月上旬关中平原的旱情最为严重,尤其是铜川市、淳化县、礼泉县、乾县、永寿县、扶风县、岐山县及凤翔县一线和蓝田县境内;3 月中旬关中平原整体旱情稍有缓解,但仍有大面积重旱区;3 月下旬的干旱程度进一步缓解,尤其是铜川市,但关中平原整体旱情仍较为严重;4 月上旬,一些地区降水在一定程度上暂时缓解了关中平原中、西部地区的旱情,但东部旱情依然很严重;4 月中旬关中平原整体旱情加重,尤其是关中平原东部、渭北旱塬和蓝田境内的旱情十分严重,与陕西重大气象灾害干旱Ⅲ级应急响应服务专题的报道[21]中指出的 4 月 18—22 日 2 次降水过程中关中中东部、渭北东部大部分地区降水不足 10 mm 相符。4 月下旬和 5 月上旬关中平原中、西部旱情稍有缓解,但 5 月中旬关中平原旱情整体加重,且旱情十分严峻。

2.2 条件植被温度指数的空间分布特征及其影响因子分析

计算研究区域 2013 年 3—5 月共 9 旬的旬尺度 VTCI 的 SSIM 值,生成 SSIM 值图,研究发现图中黑色斑点多为水域、居民地、地形地貌过渡区或突变区等地表覆盖发生较大变化或突变的区域,因此将 SSIM 值小于 0.25 的区域定义为突变区,令其值为零,如图 3 所示。可知,突变多发区主要集中分布于宝鸡市区境内、渭河及黄河等水域及其周边、户县及蓝田县境内和咸阳市及西安市北部县域。关中平原在图中表现为东部和北部偏亮,而中、西部偏暗,可知关中平原总体上东、北部旱情变化小,而中、西部旱情变化大,其中东部为旱情低变化区,其大部分区域 SSIM 值大于 0.63,而中部发生变化的区域尤为多,其 SSIM 值小于 0.63 的区域占多数;渭河北部旱情变化小于渭河南部,旱情变化多发区主要集中于渭河两岸。关中平原的 VTCI 值空间分布特征总体上存在较大变化,但其变化是平缓的。根据 SSIM 变化的空间格局和突变点位置,可将研究区域关中平原大致分为 4 部分(图 1 和图 3):VTCI 变化较大的黄河临近区域(Ⅰ)、VTCI 整体变化较大宝鸡市西部区域(Ⅳ)、VTCI 整体变化较小的渭河以北区域(Ⅱ)和 VTCI 整体变化较大的渭河以南区域(Ⅲ)。其中渭河以北区域又可以分为整体变化较一致、变化较小的渭北二级黄土旱塬区(Ⅱ-1)和存在较多变化的渭北一级黄土台塬、渭河冲积平原区(Ⅱ-2)。

黄河临近区域 SSIM 变化较大,在图上表现为明显的明暗相间条状区域。由于其曲流作用而导致水面、滩涂错综分布,地表异质性较大,产生的遥感信号差异较大,因而构建反映旱情信息 VTCI 的参量 LST 和 NDVI 变化较大,旱情亦发生较大变化。

宝鸡市西部区域范围内 SSIM 值普遍较小,且变化较大,这是由于宝鸡市境内渭河河谷狭窄,断续分布有多级阶地和台塬,成阶梯状或倾斜的盾状,向渭河河谷倾斜,且陇山向南延伸到宝鸡市西部,向东延伸到岐山县和永寿县,与北山相连,因此宝鸡市整体地形较破碎,不同微地貌影响下的水热信息差异较大,构建 VTCI 的参量 LST 差异较大,旱情空间差异较大。

渭河以北二级黄土旱塬区干旱状况的空间结构相似性较接近,SSIM 值普遍较大且接近,在图像上表现为偏亮,但在某些区域表现为暗色斑点或明暗相间,表明存在较大变化。铜川市东北部丰陵周边图中表现为黑色斑点状区域,由于地处残塬沟壑而地表异质性较大,其影响下的水热信息和地表覆盖差异较大,VTCI 构造参量 LST 和 NDVI 亦产生较大差异,旱情空间结构发生了较大变化。位于渭北一级黄土台塬、渭河冲积平原区的咸阳市北部和西安市北部区境内,由于嵯峨山、北仲山及西凤山低山区和黄土台塬、残塬及斜塬区分布,山势较高,沟谷众

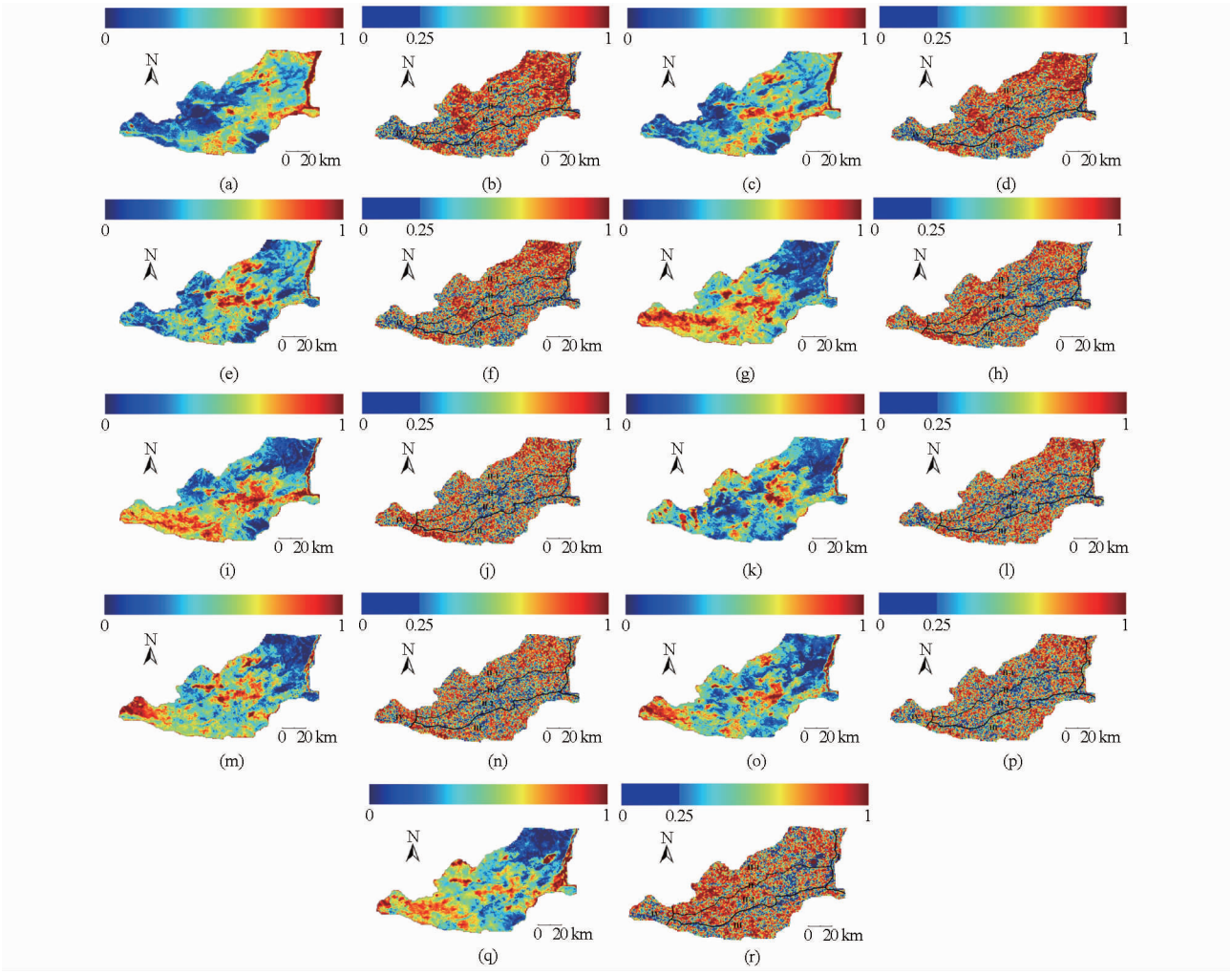

图 3　2013 年 3—5 月 VTCI 干旱监测结果及其结构相似度

Fig. 3　Drought monitoring results of VTCI and their SSIMs from March to May of 2013

(a) 2013 年 3 月上旬 VTCI　(b) 2013 年 3 月上旬 SSIM　(c) 2013 年 3 月中旬 VTCI　(d) 2013 年 3 月中旬 SSIM
(e) 2013 年 3 月下旬 VTCI　(f) 2013 年 3 月下旬 SSIM　(g) 2013 年 4 月上旬 VTCI　(h) 2013 年 4 月上旬 SSIM
(i) 2013 年 4 月中旬 VTCI　(j) 2013 年 4 月中旬 SSIM　(k) 2013 年 4 月下旬 VTCI　(l) 2013 年 4 月下旬 SSIM
(m) 2013 年 5 月上旬 VTCI　(n) 2013 年 5 月上旬 SSIM　(o) 2013 年 5 月中旬 VTCI　(p) 2013 年 5 月中旬 SSIM
(q) 2013 年 5 月下旬 VTCI　(r) 2013 年 5 月下旬 SSIM

多且下切较深，塬面分布有洼地且坡度较大并发育有切沟，黄土峁分布普遍，塬边以陡坎与河流阶地相接，界限明显，河流两侧分布有冲洪积平原，地形地貌复杂多样且破碎，地表异质性大，同时塬面引灌玉皇阁等水库和泾河等河流上塬，区域灌溉条件差异较大，且分布有较多果园，物候差异较大，这些因素影响下的水热信息、地表覆盖发生变化，对构建参量 LST 和 NDVI 影响较大，因此在图中表现为旱情空间结构变化较大的明暗相间区域。蒲城县西南卤阳湖湿地在图中表现为变化较大的偏暗区域，其大部分为滩地，芦苇丛错杂分布，地表覆盖及水热信息差异较大，因此产生的遥感信号差异较大，VTCI 构建参量 LST 和 NDVI 产生较大变化，所以区境内 SSIM 值普遍较低。其他一些区域虽地势整体较平坦，土地利用以耕地为主，但近年来由于经济发展，农田多改为园地或果树与小麦套种，耕地园地错杂分布，物候差异较大，且分布有较多水系沟渠，居民地和建设用地等分布较稠密，地表覆盖差异较大，VTCI 构建参量 NDVI 变化较大，旱情空间结构产生差异，且出现突变区，区域内耕地、居民地和水系边界明显。

渭河以南区域 SSIM 整体变化较大，除了眉县、周至县到秦岭山前地带一线和西安市、咸阳市城区 SSIM 普遍较大形成偏亮区域外，其余区域在图中均表现为明暗相间状，旱情差异较大，这说明在水热和大地形环境确定的气候条件下，旱情受到其他因素影响较大而产生了较多变化。如蓝田县、临潼区、渭南市南部等区域，因受境内低山、残塬等的影响而地形较复杂，区域内被山带水，山谷交错，塬面破碎，沟壑纵横，受河道深切及重力等内外营力的作用而塬梁、河沟相间，梁峁寄生，境内河谷冲积阶地、山前洪

积扇、台塬、丘陵、山地俱全,地面起伏较大,形态破碎,地表异质性大,不同微地形地貌影响下的水热状况和地表覆盖差异较大,VTCI 构造参量 LST 和 NDVI 变化较大,反映在 VTCI 图像上亮度、对比度和空间结构差异较大,SSIM 普遍偏小且变化较多。

关中平原 VTCI 的空间分布表现出明显的区域差异性和空间异质性。复杂多样的微地形地貌和下垫面覆盖是区域旱情产生变化的主要影响因素。在水热条件和大地形环境确定的气候条件下,湿地、低山和塬上沟壑区及不同地貌过渡区等地形地貌复杂多变、地面起伏较大、分布破碎且分区明显而地表空间结构差异较大的区域,由于不同地表形态结构对于辐射、温度、湿度、降水以及风向、风速等各种干旱气候要素及下垫面覆盖的影响不同,随之产生的遥感信号亦存在差异,基于遥感数据获得的 VTCI 构造参量 LST 和 NDVI 随之产生较大变化,使得旱情空间结构发生较大变化,SSIM 值普遍较小且有突变。水域及其滩涂和居民地等与周边地表覆盖差异较大,同时水热信息差异也较大,VTCI 构建参量 NDVI 和 LST 变化较大,旱情空间差异较大或产生突变。而在黄土台塬、冲积平原、面积较大的市区等地形地貌或下垫面状况较一致区域旱情的空间变化则较小。

3 讨论

关中平原的旱情表现出区域差异性和空间异质性。地表较完整,地表异质性小的区域如冲积平原和黄土台塬等,旱情空间结构变化较小,SSIM 值普遍较大。地形地貌多变,地表破碎的区域如山地区、沟壑区、黄渭河及其支流水域等,由于地表异质性大,SSIM 值多数较低并有明显突变,可以明显地区分出黄河和渭河水域。关中平原的空间跨度较大,水热变化大,下垫面覆盖类型复杂,导致 VTCI 的空间变化复杂。VTCI 及其 SSIM 在空间上和时间上的变化在气候大环境影响下,对地形因子和下垫面变化的响应非常敏感。说明了在水、热决定 VTCI 变化的主体基础上,地形因子、下垫面覆盖的不同及变化和人为因素导致其主体产生变化,当地形地貌或下垫面覆盖或人为因素成为主导因子时,结构相似度 SSIM 与其是高度相关的,其主导地位因时因地而异。也反映出关中平原地表植被覆盖和旱情因受人类开发活动影响而比较破碎和变化较大的特点。

目前对干旱研究多集中在基于气象站点的气象和水文资料得到的相对湿润指数 HI [22]、标准化降水指数 SPI [9]等干旱指数,或基于遥感数据得到的植被状态指数 VCI [10]、改进的垂直干旱监测指数 MPDI[23]等干旱指数,或两者结合的综合干旱指数 IDMI[24]、SDI[25]等,将其直接作为干旱的指示因子或构建统计模型分析干旱特征,鲜见有研究通过引入新的参数和变量来分析干旱的空间分布及其变化特征。本研究采用结构相似度 SSIM 研究了表征关中旱情的 VTCI 的空间分布特征和变化规律,研究结果可以为今后的干旱空间分布和变化的研究提供深入的认知,即可以更多地尝试使用结构相似度 SSIM 研究一些指数的空间分布和变化规律。

4 结束语

干旱的形成是一种复杂的过程,关中平原 VTCI 的 SSIM 随下垫面覆盖类型、地形地貌条件等结构性因素而变化,表现出地域差异性,且变化明显。结构性因素是引起 VTCI 空间变化的主导因子,旱情分布特征总体上受地形、水热分布格局等因素的结构性影响,但在各种微地貌上存在较大差异,这与关中平原的水系、河流冲积平原、阶地、台塬、沟壑和山地地形及其隔断作用造成的地形、生境突变产生地表特征的变化和地表覆盖差异而产生不同的遥感信号有关联,基于遥感数据获得的 VTCI 构造参量 LST 和 NDVI 亦随之表现出空间变化性。已有的探索研究主要集中在基于条件植被温度指数和结构相似度的关中平原旱情空间分布特征,以及基于关中平原立地条件的影响旱情分布的主要因子研究,缺乏在陕西省(如陕北黄土高原、陕南秦巴山地)乃至全国其他地区的大空间尺度的普适性验证,缺乏宏观应用价值的探索研究,这些将是后续研究重点。

参 考 文 献

1 李海亮, 戴声佩, 胡盛红, 等. 基于空间信息的农业干旱综合监测模型及其应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 181 - 188.
Li Hailiang, Dai Shengpei, Hu Shenghong, et al. Comprehensive monitoring model for agricultural drought and its application based on spatial information [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 181 - 188. (in Chinese)

2 严登华, 袁喆, 杨志勇,等. 1961 年以来海河流域干旱空间变化特征分析[J]. 水科学进展, 2013, 24(1): 34 - 41.
Yan Denghua, Yuan Zhe, Yang Zhiyong, et al. Spatial and temporal changes in drought since 1961 in Haihe River Basin[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(1): 34 - 41. (in Chinese)

3 田苗, 王鹏新, 张树誉, 等. 基于条件植被温度指数的冬小麦产量预测[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 239 - 245.
Tian Miao, Wang Pengxin, Zhang Shuyu, et al. Winter wheat yield forecasting based on vegetation temperature condition index [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(2): 239 - 245. (in Chinese)

4 蔡明科. 关中地区水文、气象干旱特征对比研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(6): 33 – 37.
Cai Mingke. Comparative study on hydrologic-meteorological-drought characteristics of Guanzhong areas[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(6): 33 – 37. (in Chinese)

5 李俊霖, 延军平, 孙虎, 等. 关中平原东、中、西部气候干旱化程度比较分析[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(1): 131 – 134.
Li Junlin, Yan Junping, Sun Hu, et al. An analysis on climatic changes in east, middle and west areas of Guanzhong Plain[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 19(1): 131 – 134. (in Chinese)

6 张允, 赵景波. 近 200 年来关中地区干旱灾害空间变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(7): 94 – 98.
Zhang Yun, Zhao Jingbo. Spacial-temporal changes of drought disaster in Guanzhong area in recent 200 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(7): 94 – 98. (in Chinese)

7 陈太根, 董婕. 关中平原近 49 年来气候变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(12): 76 – 81.
Chen Taigen, Dong Jie. An analysis on characteristics of climatic changes in Guanzhong Plain in recent 49 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(12): 76 – 81. (in Chinese)

8 喻忠磊, 杨新军, 石育中. 关中地区城市干旱脆弱性评价[J]. 资源科学, 2012, 34(3): 581 – 588.
Yu Zhonglei, Yang Xinjun, Shi Yuzhong. Evaluation of urban vulnerability to drought in Guanzhong area[J]. Resources Science, 2012, 34(3): 581 – 588. (in Chinese)

9 谭学志, 粟晓玲, 邵东国. 基于 SPI 的陕西关中地区气象干旱空间特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 224 – 229.
Tan Xuezhi, Su Xiaoling, Shao Dongguo. Analysis of special and temporal characteristics of meteorological drought in Guanzhong region of Shanxi Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(2): 224 – 229. (in Chinese)

10 Kogan F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas[J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(8): 1405 – 1420.

11 Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection[J]. Advances in Space Research, 1995, 15(11): 91 – 100.

12 陈维英, 肖乾广, 盛永伟. 距平植被指数在 1992 年特大干旱监测中的应用[J]. 环境遥感, 1994, 9(2): 106 – 112.
Chen Weiying, Xiao Qianguang, Sheng Yongwei. Application of the anomaly vegetation index to monitoring heavy drought in 1992 [J]. Remote Sensing of Environment China, 1994, 9(2): 106 – 112. (in Chinese)

13 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)

14 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]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 109 – 116.
Tian Miao, Wang Pengxin, Han Ping, et al. Drought forecasts based on SARIMA models and vegetation temperature condition index[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 109 – 116. (in Chinese)

15 Patel N R, Parida B R, Venus V, et al. Analysis of agricultural drought using vegetation temperature condition index (VTCI) from Terra/MODIS satellite data[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184(12): 7153 – 7163.

16 Wang Z, 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.

17 窦睿音, 延军平. 关中平原太阳黑子活动周期与旱涝灾害的相关性分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(8): 76 – 82.
Dou Ruiyin, Yan Junping. Relationships between drought and flood disasters in Guanzhong Plain and the activities of sunspot[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(8): 76 – 82. (in Chinese)

18 郭晓鸽, 庞奖励, 史兴民, 等. 关中平原近 50 年来气候生产力的变化及对植物影响研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 2010, 26(4): 395 – 400.
Guo Xiaoge, Pang Jiangli, Shi Xingmin, et al. Variation of climate productivity and its impact on plants in Guanzhong Plain for last 50 years[J]. System Science and Comprehensive Studies in Agriculture, 2010, 26(4): 395 – 400. (in Chinese)

19 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)

20 王鹏新, 林巧, 张树誉, 等. 2013 年关中地区春旱的实时监测与剖析[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(3): 234 – 236.
Wang Pengxin, Lin Qiao, Zhang Shuyu, et al. Real-time monitoring and analysis of spring drought in Guanzhong Plain in 2013 [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013,31(3): 234 – 236. (in Chinese)

21 陕西气象局. 陕西重大气象灾害干旱Ⅲ级应急响应服务专题[EB/OL]. [2013 – 04 – 24] http://www.sxmb.gov.cn/news_25773_112_1.htm.

22 刘可晶, 王文, 朱烨, 等. 淮河流域过去 60 年干旱趋势特征及其与极端降水的联系[J]. 水利学报, 2012, 43(10): 1179 – 1187.
Liu Kejing, Wang Wen, Zhu Ye, et al. Trend of drought and its relationship with extreme precipitation in Huaihe River basin over the last 60 years[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(10): 1179 – 1187. (in Chinese)

23 Ghulam A, Qin Q M, Teyip T, et al. Modified perpendicular drought index (MPDI): a real-time drought monitoring method[J]. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 62(2): 150 – 164.

24 孙丽, 王飞, 李保国, 等. 基于多源数据的武陵山区干旱监测研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 246 – 252.
Sun Li, Wang Fei, Li Baoguo, et al. Study on drought monitoring of Wuling Mountain area based on multi-source data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 246 – 252. (in Chinese)

25 杜灵通, 田庆久, 王磊, 等. 基于多源遥感数据的综合干旱监测模型构建[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 126 – 132.
Du Lingtong, Tian Qingjiu, Wang Lei, et al. A synthesized drought monitoring model based on multi-source remote sensing data [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(9): 126 – 132. (in Chinese)