

基于 MOD16 产品的陕西关中地区干旱 时空分布特征

何慧娟, 卓 静, 李红梅, 权文婷
(陕西省农业遥感信息中心, 陕西 西安 710014)

摘 要: 基于 MOD16 产品, 利用作物缺水指数法, 结合气象站点观测资料及 MOD17 植被指数信息, 分析了 2000—2013 年陕西关中地区干旱的时空分布特征。结果表明: 基于 MOD16 产品的作物缺水指数的计算结果与站点土壤相对湿度的变化规律一致, 并且两者的相关系数通过了 $P < 0.001$ 的显著性检验, 说明 MOD16 数据可以用于关中地区干旱的时空变化分析; 作物缺水指数的空间分布不均匀, 在关中地区的东部和北部值较高, 较为干旱, 特别是在关中东北部和西安市周边干旱特别严重, 作物缺水指数多年平均值在 0.795~0.832, 达到重旱等级, 并且区域内干旱程度呈显著上升趋势; 作物缺水指数有明显的年内变化波动, 在 3—6 月及 10—11 月值最高, 作物缺水指数达 0.7 左右, 其中 3—6 月是重旱和特旱集中发生的时期, 而 10—11 月以轻旱和中旱为主; 2000—2013 年作物缺水指数在 2003 年出现最低值(0.65 左右), 后逐年升高, 在 2013 年达最高值(0.8 左右); 2000—2013 年轻旱面积呈减小的趋势, 中、特旱呈增加趋势; 作物缺水指数与温度、降水及植被的关系密切, 高温少雨时, 作物缺水指数偏高, 干旱容易发生, 同时归一化植被指数较低。

关键词: MOD16; 干旱; 时空分布; 作物缺水指数; 关中地区
中图分类号: S127; S165+.2 **文献标志码:** A

Spatial-temporal distribution characteristics of drought in Guanzhong region of Shaanxi Province based on MOD16 products

HE Hui-juan, ZHUO Jing, LI Hong-mei, QUAN Wen-ting
(Shaanxi Remote - Sensing Information Center for Agriculture, Xi'an, Shaanxi 710014, China)

Abstract: Based on MOD16 products and the method of crop water stress index, combined with meteorological station observations and MOD17 vegetation index information, this article analyzed the Spatial-temporal variation characteristics of drought in the Guanzhong region of Shaanxi Province during 2000—2013. The results showed that crop water stress index based on MOD16 products was consistent with the variation of soil relative humidity, and the correlation coefficient between them was significant ($P < 0.001$). This relationship indicated that MOD16 products could be used to analyze the variation features in Guanzhong region. In addition, the crop water stress index had not been evenly distributed. In eastern and northern of Guanzhong regions, its value was high, suggesting relatively dry condition. Particularly, in the northeast of Guanzhong region and around Xi'an city, the crop water stress index was 0.795~0.832, reaching a heavy drought level. In the meantime, drought severity was becoming elevated. Furthermore, the crop water stress index had obvious monthly fluctuation variations, reaching its highest value of 0.7 in March to June and October to November. From March to June, heavy and severe drought events mainly occurred. Rather from October to November, light and medium drought events mostly took place. In Guanzhong region, the crop water stress index exhibited an increasing trend, after minimum and maximum values of 0.65 in 2003 and 0.8 in 2013, respectively. The area suffered light drought showed a trend of becoming reduced. However, areas with medium to severe drought were increased during 2000—2013. Moreover, temperature, precipitation and vegetation were closely related to crop water stress index. During the period with higher temperature and less precipitation, the crop water stress index was high, drought was likely to happen, and the normalized difference vegetation index was low.

Keywords: MOD16; drought; Spatial-temporal distribution; CWSI; Guanzhong region

干旱是陕西省主要的自然灾害,有“十年九旱”之说。据史料记载,陕西省干旱的危害程度占有气象灾害的 50%^[1]。陕西关中地区是陕西省主要的粮食产区,也是陕西省干旱发生最严重的区域^[2],在历史上干旱发生的次数占总年数的 42.25%^[3],因此对干旱准确监测对农业生产至关重要。

传统干旱监测的方法多采用气象和水文参数^[2,4-5],其数据是基于站点的,而观测站点较少且分布不均匀,因此不能全面细致地反映区域干旱的时空变化特征。现如今遥感技术的迅速发展,提供了大范围高分辨率多时象的地表特征信息,为干旱监测提供了新途径。大量的研究^[6-11]表明遥感数据已经能够较为准确地反映土壤干旱信息,但是由于遥感数据信息量大,处理相对复杂,已有的遥感监测研究多基于干旱发生的一个时段,没有长期连续系统的干旱遥感监测数据,因此对分析区域干旱的时空分布特征有一定的局限性。2011 年美国 NASA 研究团队在 MODIS 遥感数据蒸散反演算法上取得新进展^[12-13],并且发布了 2000—2013 年全球 MODIS 陆地蒸散参数产品数据(MOD16),具有较高的时间分辨率和空间分辨率,以及免费获取等特点,在研究水分循环等方面具有一定的优势^[14]。另外

数据集中包含蒸散和潜在蒸散两个参数,正好可以用于作物缺水模型的计算,为干旱监测研究提供了方便可行的数据。因此本文将基于 MOD16 蒸散数据产品,利用作物缺水指数法,探讨 2000—2013 年陕西关中地区干旱的时空变化特征。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区域概况

研究区域没有按照行政边界进行划分,而是利用 2014 年国家基础地理信息中心制作的 2010 年土地利用数据 (<http://www.globallandcover.com/GLC30Download/index.aspx>)提取了关中平原作为研究区域。从图 1 可以看到,关中地区位于陕西省中部,西起宝鸡、东至潼关,南接秦岭,北到陕北高原,西窄东宽,土地覆盖类型为明显的大片耕地区域,农作物以冬小麦和夏玉米为主,为一年两熟制,是陕西省主要的粮食产区。研究区域是断层陷落区即地堑,后经渭河及其支流泾河、洛河等冲积而成。区域内地形平坦,土层深厚,蓄水性好,但是区域内水资源相对不足,干旱是造成粮食减产的主要原因^[15]。因此这样的划分更符合自然环境规律,利于区域干旱的研究。

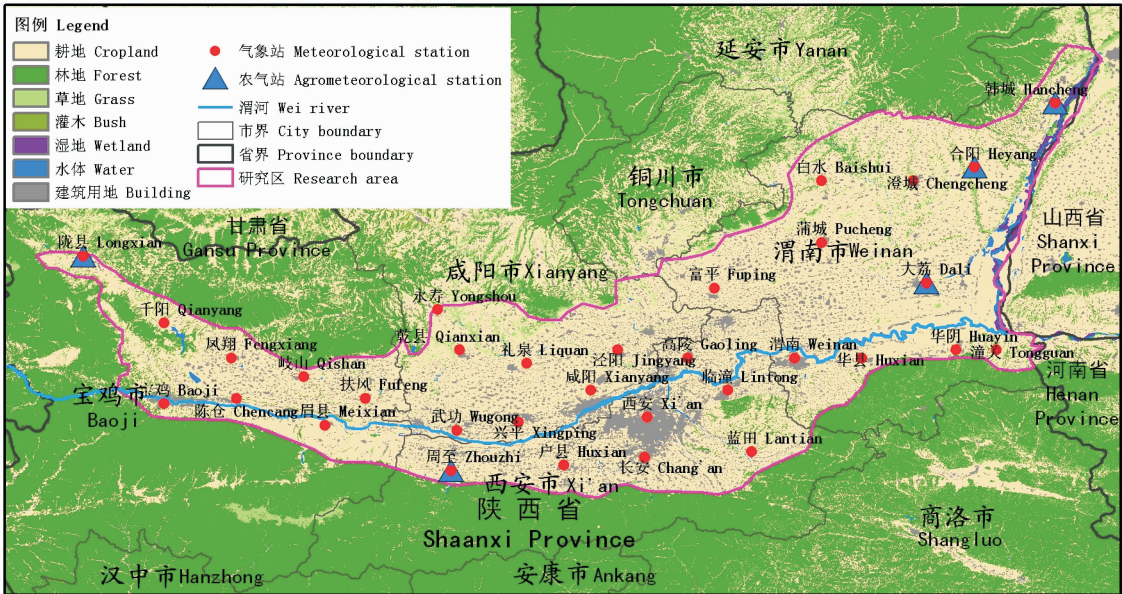


图 1 陕西关中地区土地利用和气象站点分布

Fig.1 Land use and distribution of meteorological stations in Guanzhong region of Shaanxi Province

1.2 数据来源

MOD16 数据是利用 MODIS 卫星传感器数据结合气象数据反演得到的地面蒸散数据集。文章所用的蒸散数据是 2011 年 Mu 等在 2007 年算法的基础

上改进的蒸散算法^[12-13]。蒸散算法基于 Penman - Monteith 公式。蒸散包括地表蒸发和植物蒸腾。陆地蒸散水分来源于土壤、植被拦截未达地面的雨水、植被茎叶气孔的呼吸。计算需要反照率、叶面积指

数、地表覆盖类型等遥感数据和气压、气温、湿度、辐射等气象数据。本文使用的是 2000—2013 年月、年合成 1 km 分辨率蒸散 (Evapotranspiration, ET)、潜在蒸散 (Potential evapotranspiration, PET) 数据, 轨道号是 h26v05 和 h27v05, 下载地址为: <ftp://ftp.ntsg.umd.edu>。数据在 MODLAND 提供的 MRT (Modis Reprojection Tool) 投影转换工具中对 h26v05 和 h27v05 两区图像进行拼接和投影转换, 转换为等经纬度坐标投影, 基准面为 WGS-84 坐标系。

使用归一化植被指数 (Normalized difference vegetation index, NDVI) 来反应植被长势信息, 文章使用的是 2000—2013 年 MODIS 植被指数数据产品 (MOD13Q1), 为 16 天合成 250 m 分辨率数据, 轨道号是 h26v05 和 h27v05, 下载地址为: <http://e4ftl01.cr.usgs.gov>。同样使用 MRT 工具提取了 NDVI 数据并进行了拼接和投影转换。为了与 MOD16 数据对应, 将 16 天合成数据内插成月值。年 NDVI 数据处理是将一年 NDVI 值进行了最大值合成, 用来反映一年中植被生长最好的状况。

气象数据包括 2000—2013 年 33 个气象站点观测的降水量、平均气温的日值数据及 5 个农业气象站点 2013 年土壤相对湿度时值数据。数据来源于陕西省气象局, 站点分布情况见图 1。为了与蒸散数据进行对比分析, 将数据处理为月值和年值。

1.3 作物缺水指数法

用于干旱监测的方法很多, 有植被指数法、热惯

量法、作物缺水指数法等。其中作物缺水指数法由于物理意义明确、适用范围广等特点在干旱研究方面得到广泛应用^[9-11]。由于水分供应是蒸散过程的基本条件之一, 土壤含水量对蒸散速率有一定的影响^[10], 因此作物缺水指数 (Crop water stress index, CWSI) 的定义为:

$$CWSI = 1 - ET/PET$$

式中: ET 为实际蒸散量 (mm); PET 为潜在蒸散量 (mm), 即在区域供水充足条件下的蒸散量。实际蒸散量与潜在蒸散量的比值可以直观地反应出区域水分的盈亏状况, 从而可以用于土壤干旱的监测, 从式中可见, CWSI 值在 0~1 之间, 值越大, 表示区域越干旱缺水, 值越小表示越湿润。在 MOD16 数据集中包含 ET 和 PET 数据, 正好能够方便用于作物缺水指数的计算。

2 数据分析

2.1 干旱检测结果检验

为了保证遥感监测数据的有效性, 首先需要对其区域 MOD16 产品计算的作物缺水指数进行检验。对于干旱的监测最可靠的方法是对土壤水分的直接测量, 国家气象局以 20 cm 土壤相对湿度作为旱情的分级标准^[16], 因此, 基于遥感数据的 CWSI 将与测站测量的 20 cm 土壤相对湿度数据进行对比。图 2 给出了 2013 年区域内五个测站 CWSI 与土壤相对湿度数据的对比结果。

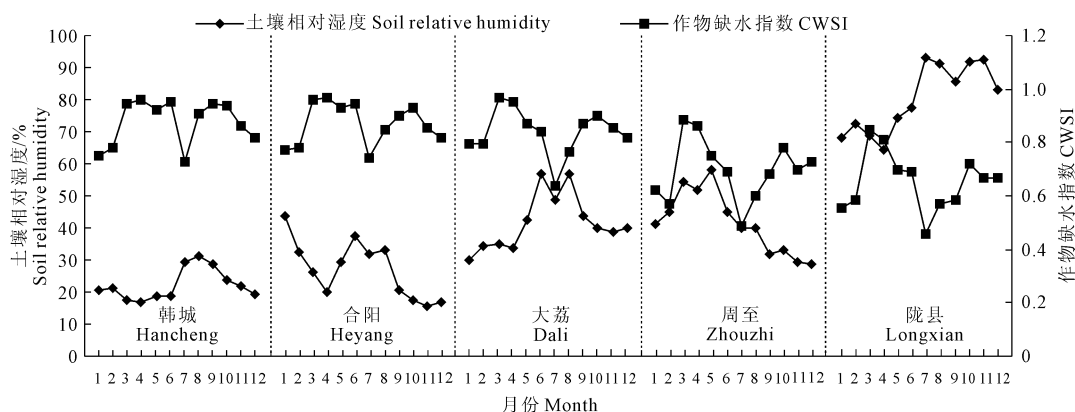


图 2 2013 年作物缺水指数与土壤相对湿度的比较

Fig.2 Comparison between CWSI and soil relative humidity in 2013

从图 2 中可以看出两者的结果对于干旱的反映比较吻合。在较干旱的时期, 土壤相对湿度较低, CWSI 较高; 在较湿润的时期, 土壤相对湿度较高, CWSI 较低。并且, 测站之间的对比也符合这一规律, 例如在关中最东侧的韩城站与最西侧的陇县站比较: 韩城站较为干旱, 20 cm 土壤相对湿度整体偏

低, CWSI 偏高; 而陇县站较为湿润, 20 cm 土壤相对湿度整体偏高, CWSI 偏低。这一变化也与 2013 年关中地区春季干旱情况较为一致, 2013 年 4 月 1 日陕西省气象局启动了重大气象灾害 (干旱) Ⅲ级应急响应, 至 4 月 24 日解除了干旱 Ⅲ级应急响应状态^[8]。从测站 CWSI 的变化情况来看, 3 月测站

CWSI 处于高位,到 5 月各测站 CWSI 都有不同程度的降低,这与实际的干旱发展情况比较一致。

再对 CWSI 与 20 cm 土壤相对湿度的散点图进行分析(图 3),发现呈显著的负相关性,相关系数通过了 0.001 的显著性检验。说明用 MOD16 蒸散产品计算的作物缺水指数用于关中地区干旱的监测是可行的。另外通过对 CWSI 与 20 cm 土壤相对湿度建立回归方程,再参照旱情的划分标准^[16],可以将 20 cm 土壤相对湿度的干旱划分标准转换为 CWSI 干旱等级的划分标准,详细划分见表 1。

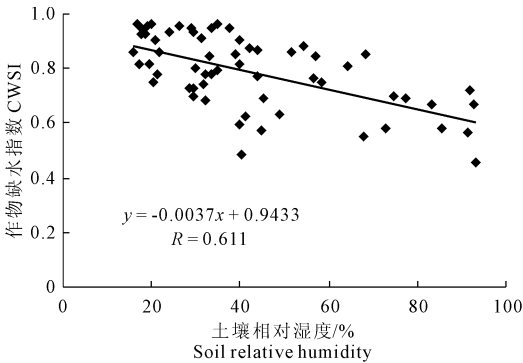


图 3 作物缺水指数与土壤相对湿度的关系

Fig.3 Relationship between CWSI and soil relative humidity

表 1 干旱等级划分标准

Table 1 The classification standard for drought

等级 Grade	类型 Type	土壤相对湿度/% Soil relative humidity	作物缺水指数 CWSI
1	无旱 Non drought	> 60	< 0.721
2	轻旱 Light drought	50 ~ 60	0.721 ~ 0.758
3	中旱 Medium drought	40 ~ 50	0.758 ~ 0.795
4	重旱 Heavy drought	30 ~ 40	0.795 ~ 0.832
5	特旱 Severe drought	< 30	> 0.832

2.2 区域干旱的时空变化特征

2.2.1 多年平均干旱的空间分布状况 从 2000—2013 年 CWSI 多年平均值反映的干旱空间分布来看(图 4a),关中地区干旱呈现明显的空间分异性规律,关中地区的东部和北部较为干旱,特别是在关中东北部干旱特别严重,CWSI 多年平均值在 0.795 ~ 0.832,达到重旱等级。这一结果与谭学志等^[4]和蔡新玲等^[5]的研究结果较为一致。另外西安市周边,也较为干旱,特别是城市北部地区。干旱的空间分布规律与气候条件密切相关,结合温度、降水的空间

分布规律(图 4c、图 4d)可以看到,降水从西南向东北呈减小的趋势,因此 CWSI 从西南向东北增加,而温度则在关中盆地中央最高,向南向北逐渐降低,尤其在城市周边,特别是西安城市周边温度最高,因此在西安周边干旱也较为严重。结合 NDVI 的空间分布(图 4b)也可以看到,CWSI 高值区干旱较重,NDVI 也较低,而在 CWSI 的低值区水分较充足,NDVI 也较高。

2.2.2 干旱的月变化 图 5 为根据 MOD16 数据计算的 2000—2013 年关中地区 CWSI 干旱月平均变化。可以看到 CWSI 有明显的年内变化波动,在 3—6 月及 10—11 月 CWSI 值较高,CWSI 达 0.7 左右,6 月 CWSI 最高,超过了 0.8。CWSI 的低值出现在夏季,8 月最低,在 0.55 左右。从干旱情况来看,干旱发生在春季、夏初及秋季。3—6 月是重旱和特旱集中发生的时期,而 10—11 月以轻旱和中旱为主。这与周丹等^[2]的陕西省春季和秋季干旱较严重的研究结果较为一致。

再结合温度、降水及植被的变化情况分析,温度和降水呈单峰变化,温度在 1 月最低,7 月达到最高值,降水集中在 7、8、9 月,9 月降水最多。植被呈双峰变化,有两个峰值(5 月和 8 月),这是因为关中地区作物以冬小麦和夏玉米为主,6 月冬小麦收获,NDVI 值出现明显的下降。ET 的变化与降水的变化相似,8 月 ET 值最高,而 ET 在 6 月出现一个低谷与 NDVI 的急剧减小有关。PET 与温度的变化较为相似,月变化较均匀,在 6 月达到最高值。从 CWSI、ET、PET 与温度、降水及 NDVI 的月变化相关系数计算结果(表 2)也可以看到,虽然 CWSI 与温度、降水及 NDVI 的相关系数不高,但是 CWSI 计算的两个分量 ET、PET 却与温度、降水及 NDVI 密切相关。年内变化 ET 与降水、NDVI 相关性强,而 PET 与温度相关性最强。

表 2 干旱月变化下的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of monthly variation

项目 Items	作物缺水指数 CWSI	蒸散 ET	潜在蒸散 PET
归一化植被指数 NDVI	-0.173 **	0.892 ***	0.712 ***
降水 Precipitation	-0.307 ***	0.899 ***	0.665 ***
温度 Temperature	0.164 **	0.792 ***	0.939 ***

注: ** 代表 $P < 0.05$; *** 代表 $P < 0.01$ 。
Note: ** means $P < 0.05$; *** means $P < 0.01$.

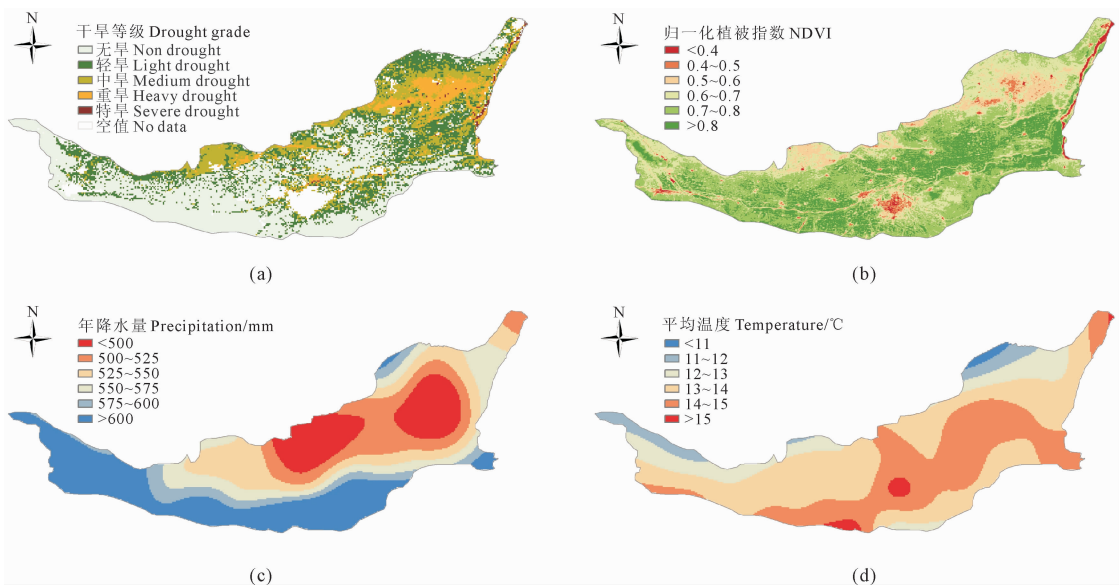


图 4 干旱(a)、归一化植被指数(b)、降水量(c)、平均温度(d)多年平均的空间分布

Fig.4 Drought(a), NDVI(b), precipitation(c), temperature(d) spatial distributions of annual averages

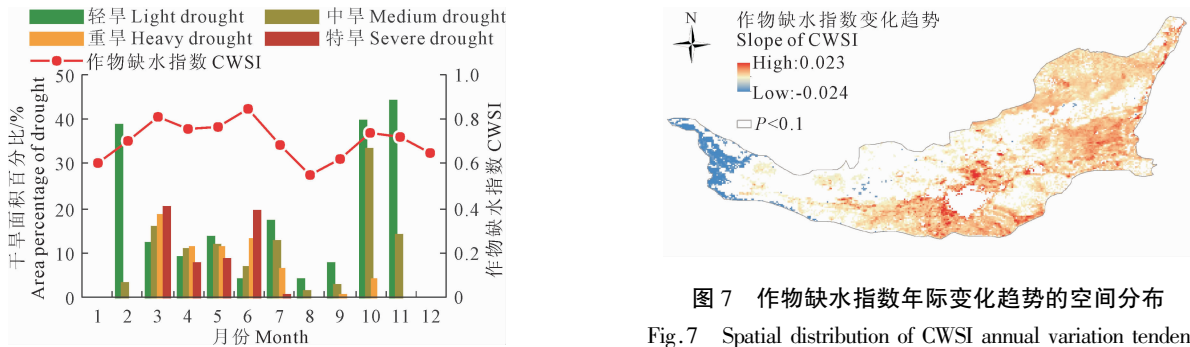


图 5 陕西关中地区干旱月变化

Fig.5 Monthly variations of drought in Guanzhong region of Shaanxi Province

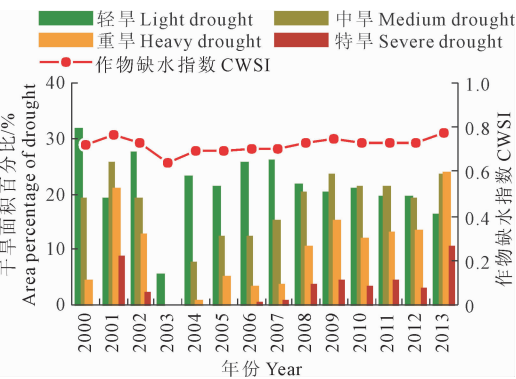


图 6 陕西关中地区干旱年际变化

Fig.6 Annual variations of drought in Guanzhong region of Shaanxi Province

2.2.3 干旱的年际变化特征 从区域干旱的年际变化情况来看(图 6),CWSI 在 2003 年出现了一个最低值 0.65 左右,后逐年升高,在 2013 年最高,达 0.8 左右。从干旱程度来看,轻旱面积呈减小的趋势,中

图 7 作物缺水指数年际变化趋势的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of CWSI annual variation tendency

旱、重旱和特旱形势从 2003 年开始呈加剧的趋势。这一研究结果与周丹等^[2]近 20 年陕西省干旱发生频率呈明显增加趋势的研究结果较为一致。将 CWSI 与温度降水及 NDVI 的年际变化结合分析来看(表 3),ET 与 NDVI、降水的相关系数较高,而 PET 与温度相关性最为密切,因此 CWSI 与降水、NDVI 呈负相关,与温度呈正相关。也就是在降水充足、温度较低的年份,CWSI 低干旱程度轻,NDVI 值也较高;而在温度较高、降水缺乏的年份,CWSI 高干旱程度重,NDVI 值也较低。这一变化规律也可以说明利用 MOD16 数据计算的作物缺水指数符合关中地区水热条件及植被的变化规律,可以反映关中地区干旱的变化情况。

最后计算了关中地区每个像元 CWSI 的变化趋势(图 7),可以看到关中地区 CWSI 主要呈明显上升趋势,在区域东部和西安市周边上升趋势显著。这一变化可能与全球气候变暖有关,据 IPCC 最新报告^[17]显示全球温度升高是显著的,因此在全球变暖的背景下使得干旱加剧。再有在城市周边干旱的加剧与城市热岛效应有关,城市周边属于干旱脆弱性地区^[18],

城市的扩张使得周边温度上升,干旱也随之加剧。

表 3 干旱年际变化下的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of annual variation

项目 Items	作物缺水指数 CWSI	蒸散 ET	潜在蒸散 PET
归一化植被被指数 NDVI	-0.439	0.633 **	-0.065
降水 Precipitation	-0.572 **	0.488 *	-0.543 **
温度 Temperature	0.430	-0.291	0.600 **

注: * 代表 $P < 0.1$; ** 代表 $P < 0.05$ 。

Note: * means $P < 0.1$; ** means $P < 0.05$.

3 结论与讨论

利用 MOD16 产品计算的作物缺水指数 CWSI,结合气象站点观测资料及 MOD17 植被指数信息,分析了陕西关中地区干旱的时空分布特征,主要结论为:

1) CWSI 计算结果与站点土壤相对湿度的变化规律一致,并且两者的相关系数通过了 $P < 0.001$ 的显著性检验,说明基于 MOD16 产品的 CWSI 的计算结果可以用于关中地区干旱时空变化的分析。

2) 从空间变化来看,CWSI 多年平均的空间分布不均匀,在关中地区的东部和北部较为干旱,特别是在关中东北部干旱特别严重,CWSI 多年平均值在 0.795~0.832,达到重旱等级。另外西安市周边,也较为干旱,特别是在西安城区北部地区,达到重旱等级。关中地区 CWSI 变化趋势主要呈上升趋势,在区域东部和西安市周边上升趋势显著。

3) 从时间变化来看,CWSI 有明显的年内变化波动,在 3—6 月及 10—11 月 CWSI 值较高,CWSI 达 0.7 左右,3—6 月是重旱和特旱集中发生的时期,而 10—11 月以轻旱和中旱为主。CWSI 在 2003 年出现最低值 0.65 左右,后逐年升高,在 2013 年达最高值 0.8 左右。2000—2013 年轻旱面积呈减小的趋势,中旱、重旱和特旱从 2003 年开始呈加剧的趋势。

4) CWSI 与温度、降水及植被的关系密切。温度较高(低)、降水较少(多)时,CWSI 较高(低),干旱较严重(轻),NDVI 值也较低(高)。

从研究结果可以看到,基于 MOD16 遥感数据反映的干旱的时空变换规律与基于气象站点的干旱的时空变化规律的研究较一致,而基于遥感数据反映的干旱时空分布更为细致,更有利于我们认识区域干旱的分布和发展。例如,通过分析干旱的年内变化规律可用于不同作物在不同时期的节水灌溉,在冬小麦的生长期(10 月—次年 6 月)较为缺水,尤其冬前分蘖期(11 月前后)和拔节抽穗灌浆期(3—6 月)干旱最为严重,此时也是小麦耗水的高峰期^[19],应注意随时查看墒情及麦苗长势,做到及时灌溉。

而在夏玉米种植期(6—10 月),虽然降水较为充分,CWSI 值较低,但是夏季多发生局地强降雨,因此田间会出现时涝时旱的现象,应该随时注意玉米对水分的要求。再有,通过 CWSI 的空间分布特征,我们可以看到关中东部和城市周边是干旱发生的重点区域,应该加强对水分利用的管理。另外人为因素是干旱加剧的主要原因,全球变暖和城市扩张使得干旱进一步恶化,这警示我们需要注意温度上升对作物生长带来的影响,加强对水分的利用管理,及时应对干旱变化。

参考文献:

[1] 《陕西历史自然灾害简要纪实》编委会. 陕西历史自然灾害简要纪实[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 6-39.

[2] 周 丹, 张 勃, 任培贵, 等. 基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50 年干旱特征分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(4): 676-688.

[3] 文 星, 廖 杰, 段翰晨, 等. 基于历史文献记载的关中地区中世纪干旱过程[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(3): 83-87.

[4] 谭学志, 栗晓玲, 邵东国. 基于 SPI 的陕西关中地区气象干旱时空特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3): 224-229.

[5] 蔡新玲, 叶殿秀, 李 茜, 等. 基于 CI 指数的陕西干旱时空变化特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(5): 1-8.

[6] 刘 欢, 刘荣高, 刘世阳. 干旱遥感监测方法及其应用发展[J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(2): 232-239.

[7] 宋荣杰. 基于遥感的旱区土壤湿度反演方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.

[8] 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): 234-259.

[9] 王玲玲, 张友静, 余远见, 等. 遥感旱情监测方法的比较与分析[J]. 遥感应用, 2010, (5): 49-53.

[10] 王玉娟, 王树东, 曾红娟, 等. 基于作物缺水指数法的渭河流域干旱特征[J]. 干旱区研究, 2014, 31(1): 118-124.

[11] 刘安麟, 李星敏, 何延波, 等. 作物缺水指数法的简化及在干旱遥感监测中的应用[J]. 应用生态学报, 2004, 15(2): 210-214.

[12] Mu Q Z, Heinsch F A, Zhao M S, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global mETeorology data[J]. Remote sensing of Environment, 2007, 111: 519-536.

[13] Mu Q Z, Zhao M S, Running S W, Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115: 1781-1800.

[14] 吴桂平, 刘元波, 赵晓松, 等. 基于 MOD16 产品的鄱阳湖流域地表蒸散量时空分布特征[J]. 地理研究, 2013, 32(4): 617-627.

[15] 庞文保, 鲁渊平. 渭河平原的水资源与农作物需水量的研究[J]. 陕西气象, 1996, (4): 19-22.

[16] 张 强, 周旭凯, 肖风劲, 等. GB/T20481-2006. 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

[17] IPCC. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5). Climate Change 2013: The Physical Science Basis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[18] 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.

[19] 李 骥, 皇甫庭, 王志红. 小麦-玉米复种连作关键技术[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2012: 15-18.