

基于 TVDI 和气象数据的陕西省春季旱情时空分析

薛天翼^{1,2}, 白建军¹

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 西安 710119; 2. 北京大学 城市与环境学院, 北京 100871)

摘要: 陕西省居于中国腹地, 受干旱影响严重, 开展遥感旱情监测工作, 认识旱情的时空特征具有重要的现实意义。利用 MODIS 产品 MOD11A2 和 MOD13A2 构建 NDVI-Ts 特征空间, 获取陕西地区温度植被干旱指数 (Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI), 在利用土壤湿度和气象指数验证了 TVDI 反映旱情有效性的基础上, 以 TVDI 为干旱指标分析了 2000—2015 年陕西省春季 (2—5 月) 旱情的时空变化特征。结果表明: (1) 土壤相对湿度和降水量与 TVDI 均呈负相关, TVDI 对降水量存在一定的滞后性; (2) 近 16 年来, 陕西省年年有旱, 但春季旱情总体呈逐年减轻的趋势, 年内 2—5 月旱情会逐渐加重; (3) 空间上, 近 16 年来陕西省春旱较为严重的地区主要分布在陕北北部以及关中东北部, 而陕西南部、关中西南部及陕南地区旱情较轻。

关键词: 遥感; 陕西省干旱; TVDI; 气象数据; 时空变化

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)04-0240-07

Spatiotemporal Variations of Spring Drought Based on TVDI and Meteorological Index in Shaanxi Province

XUE Tianyi^{1,2}, BAI Jianjun¹

(1. College of Tourism and Environmental, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;

2. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Shaanxi is located in the hinterland of China where is vulnerable to the impacts of drought, it is significant to analyze the spatiotemporal variations of drought of Shaanxi Province. Based on temperature vegetation drought index (TVDI) obtained from the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) products (MOD11A2 and MOD13A2), we established the NDVI-Ts characteristic space. Based on TVDI that can reflect the degree of drought with the use of soil moisture data and meteorological indexes, we analyzed the spatiotemporal variation of spring drought in Shaanxi Province by using TVDI data. The results showed that: (1) there was the negative correlation between TVDI and soil moisture, and the negative correlation between TVDI and precipitation, and there was the time lag between the TVDI and precipitation; (2) in the past 16 years in Shaanxi Province, the tendency of drought severity descended, within a year, the tendency increased from February to May; (3) the arid region distributed in northern part of north Shaanxi and the northeastern part of Guanzhong Plain in the past 16 years, the drought of south Shaanxi area, the south of north Shaanxi and the southwestern part of Guanzhong Plain was relatively slight.

Keywords: remote sensing; drought in Shaanxi; TVDI; meteorological data; the spatiotemporal variation

干旱作为一种普遍的自然现象, 其波及范围广, 持续时间长, 是影响农业生产和人类生活最严重的自然灾害之一^[1]。在我国因干旱导致的年平均受灾面积可达 2000 万 hm^2 , 损失粮食可占全国因灾害减产粮食的 50%^[2]。为了减轻干旱带来的诸多损失, 我们需要在旱情监测的基础上对干旱的特征加以了解。

传统的干旱监测方法获取数据慢、花费人力物力

大、且监测范围有限, 代表性差, 难以实现大范围监测的需要^[3]。与传统监测方法相比, 利用遥感手段提取地物的光谱特征及时空信息^[4], 能够有效的弥补传统旱情监测方法的不足, 且随着遥感技术的逐渐成熟, 影像分辨率高、监测周期短、监测范围大、数据获取方便的优点显得更加突出, 适合大范围的干旱监测^[5]。在诸多遥感监测方法中, TVDI 指数得到了学者们的广泛关注, 随着遥

感技术的发展以及国内外学者对其研究的深入,利用 TVDI 反演旱情的有效性正在逐步提升。

在探索 TVDI 指数的过程中,Goward 与 Hope 等^[6]利用 NOAA-AVHRR 数据发现 Ts/NDVI 随土壤湿度的变化而变化;Price^[7]、Carlson 等^[8]的研究结果显示以 NDVI 为横坐标、Ts 为纵坐标所得的散点图大体为三角形;Nemani^[9]、Moran 等^[10]更进一步发现 Ts-NDVI 的特征空间呈现为梯形;最终 Sandholt 等^[11]提出了温度植被干旱指数(Temperature-Vegetation Dryness Index)并将其作为遥感监测干旱的重要指标。TVDI 一经提出便得到了广泛的使用。齐述华^[2]、姚春生^[12]等我国学者也曾利用 TVDI 反演各地区的土壤湿度、进行旱情监测,均取得了较好的结果。

在前人研究的基础上,本文尝试利用陕西省 2000—2015 年春季遥感数据对该地区进行旱情监测。在利用土壤湿度和气象指数验证 TVDI 有效性的基础上,以 TVDI 为干旱指标对陕西省旱情较为严重的 2—5 月进行时空分析,总结陕西省 2000—2015 年春季旱情的分布规律和发展状况,旨在为当地旱情的监测及评价提供技术支持和参考。

1 研究区概况

陕西省面积约 20.58 万 km²,位于东经 105°29′—111°15′,北纬 31°42′—39°35′,形状南北狭长,跨越纬度高,属于大陆性季风气候。陕西省年均降水量约 653 mm,年均蒸发量约 1 608 mm,蒸发大于降水^[13]。从地形上来看,陕北地区主体为黄土高原,沟壑纵横,陕西中部为关中平原,南部跨越秦岭与中部相隔,多为浅山河谷。陕西省干旱的频繁发生,不仅给本地区农业生产造成了重大损失,也使得生态环境逐渐恶化,研究陕西地区的干旱特征,可以给陕西的防旱、抗旱工作提供有效的科学依据,减轻灾害的影响。

2 旱情监测方法与数据来源

2.1 数据及处理

2.1.1 数据来源 本次研究所使用的遥感数据来源于 NASA 网站 LAADS Web 的 MODIS 数据集,分别是 2000—2015 年 2—5 月的陕西省 MOD11A2 数据和 MOD13A2 数据。

本次研究使用的气象干旱数据来源于中国气象数据网。降水量数据取自中国地面气候资料日值数据集,其中共收录了陕西省 38 个气象站点的降水量数据,但部分站点的降水数据存在缺失,本次研究尽可能多的使用了陕西省内 21 个气象观测站的降水量观测资料;10 cm,20 cm,50 cm 深度土壤湿度数据取

自中国农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集,共使用了陕西省内 28 个农业站点的监测数据。

2.1.2 数据处理与运算 因本次研究数据量大,所以采用批处理的方式处理数据。陕西省的遥感影像需由 h26v05 与 h27v05 两个条带拼接而成,首先对下载的遥感影像进行批量拼接处理,之后对坐标系进行批量转换,研究中使用的是 WGS84 坐标系,最后再对所得遥感影像进行批量掩膜提取。数据运算上,本次研究需从 MOD11A2 遥感影像中提取 Lst 数据,从 MOD13A2 遥感影像中提取 NDVI 数据。合成 2 期的 MOD11A2 影像使之与 MOD13A2 影像在时间上对应。之后在 ENVI 中计算 TVDI 值。

2.2 监测方法

2.2.1 TVDI 简介 温度植被干旱指数(temperature vegetation drought index TVDI)最早由 Sandholt^[11]等提出,TVDI 值是通过构建 NDVI-Ts 特征空间,计算干湿边方程最终得到的,见图 1,NDVI-Ts 特征空间近似为三角形。

具体公式为:

$$TVDI = \frac{Ts - Ts_{min}}{Ts_{max} - Ts_{min}}$$

$$Ts_{min} = a_1 + b_1 \times NDVI, Ts_{max} = a_2 + b_2 \times NDVI$$

$$TVDI = \frac{Ts - (a_1 + b_1 \times NDVI)}{(a_2 + b_2 \times NDVI) - (a_1 + b_1 \times NDVI)}$$

式中:Ts 是任意像元的地表温度;Ts_{min}对应湿边;Ts_{max}对应干边;a₁,b₁,a₂,b₂分别是特征空间中干边和湿边拟合方程的系数。在干边上 TVDI=1,在湿边上 TVDI=0。

在计算 TVDI 时,我们可以根据像元的 NDVI 值确定其干边和湿边,再通过该像元地表温度在特征空间中的位置,确定 TVDI 值^[14]。TVDI 越接近 0,表示土壤湿度越高,干旱程度越低;TVDI 越接近 1,表示土壤湿度越低,干旱程度越高。

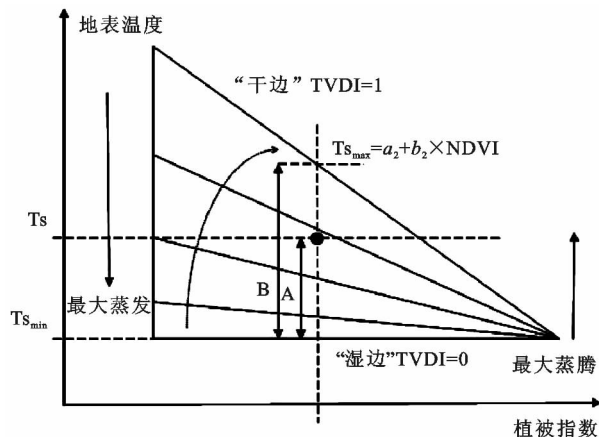


图1 TVDI 的定义(即 A/B)

2.2.2 干旱指标 目前,已经有多种气象指标被用

来表征干旱^[15],本文基于计算简便、所需数据种类少且有效性高的原则,选用降水量和土壤相对湿度作为表征干旱程度的实测指标。

土壤相对湿度(R)^[16]是土壤含水量与土壤田间含水量的比值,可以通过土壤水状态反映干旱程度,其具体公式为:

$$R=\left(\frac{M_{\text{water}}}{S_{\text{water}}}\right)\times 100\%$$

式中: R 为土壤相对湿度; M_{water} 为土壤含水量; S_{water} 为土壤田间含水量。

3 结果与分析

3.1 TVDI 特征空间分析

在 ArcGIS 中提取出所需的 NDVI 数据及其对应的最大陆地表面温度、最小陆地表面温度数据。再以 NDVI 为横坐标, T_s 为纵坐标, 制作散点图, 以半月为间隔, 分别得到了 2002 年 2—5 月的 NDVI- T_s 特征空间, 并拟合出趋势线和干湿边方程, 见表 1。散点图中横坐标从 0.2 开始, 主要是因为当 NDVI 小于 20% 时无法合理的指示研究区植被覆盖度。

从表 1 中可见, 当 NDVI 值从 0 到 1, 地表最大温度逐渐下降, 而最小温度逐渐上升, 两者与 NDVI 都趋于线性关系, 所组成的形状类似三角形, 这一结果与前人研究相符。

表 1 2002 年陕西省 2 月—5 月 NDVI- T_s 特征空间干湿边方程

| 日期 | 干边方程 | 湿边方程 |
|--------|--|---|
| 2 月上半月 | $T_{s_{\max}}=-21.568\text{NDVI}+296.78$ | $T_{s_{\min}}=17.116\text{NDVI}+259.80$ |
| 2 月下半月 | $T_{s_{\max}}=-15.284\text{NDVI}+300.83$ | $T_{s_{\min}}=11.658\text{NDVI}+269.42$ |
| 3 月上半月 | $T_{s_{\max}}=-8.9629\text{NDVI}+299.68$ | $T_{s_{\min}}=28.755\text{NDVI}+263.39$ |
| 3 月下半月 | $T_{s_{\max}}=-15.638\text{NDVI}+308.42$ | $T_{s_{\min}}=21.524\text{NDVI}+271.58$ |
| 4 月上半月 | $T_{s_{\max}}=-16.189\text{NDVI}+311.20$ | $T_{s_{\min}}=11.888\text{NDVI}+277.62$ |
| 4 月下半月 | $T_{s_{\max}}=-12.770\text{NDVI}+308.16$ | $T_{s_{\min}}=3.3074\text{NDVI}+276.55$ |
| 5 月上半月 | $T_{s_{\max}}=-18.037\text{NDVI}+316.91$ | $T_{s_{\min}}=4.9055\text{NDVI}+281.91$ |
| 5 月下半月 | $T_{s_{\max}}=-29.459\text{NDVI}+327.21$ | $T_{s_{\min}}=6.6088\text{NDVI}+276.99$ |

3.2 TVDI 作为旱情指标的验证性评价

本文试图利用 TVDI 数据反演陕西省春旱的时空特征, 在此之前需要对 TVDI 表征干旱的有效性进行检验。文中分别使用研究区土壤相对湿度数据和降水量数据与 TVDI 进行相关性分析。因从台站获取的土壤相对湿度、降水量数据可以较好的反映区域干旱程度, 将同一地点的实测气象数据与提取自遥感影像的 TVDI 值进行相关性评价便可达到验证 TVDI 有效性的目的。

3.2.1 TVDI 与降水数据的相关性评价 通过邻域分析, 分别提取了 21 个气象站点周围 3x3 范围内栅格单

元的 TVDI 值, 用 9 个栅格单元的平均值作为该站点的 TVDI 值, 增强其代表性, 之后将 TVDI 值与站点降水量数据对应汇总, 做相关分析, 分析结果如下。

表 2 2000—2015 年 TVDI 与降水量数据的相关系数

| 年份 | 相关系数 | |
|------|----------|----------|
| | 当月 | 滞后一月 |
| 2000 | -0.197* | -0.096 |
| 2001 | -0.095 | -0.209* |
| 2002 | -0.094 | -0.011 |
| 2003 | -0.056 | -0.296** |
| 2004 | -0.073 | -0.092 |
| 2005 | -0.226** | -0.139 |
| 2006 | -0.057 | -0.276** |
| 2007 | -0.001 | -0.069 |
| 2008 | 0.153 | -0.017 |
| 2009 | -0.122 | -0.205 |
| 2010 | -0.175 | -0.084 |
| 2011 | 0.72 | -0.092 |
| 2012 | -0.112 | -0.195* |
| 2013 | -0.189* | -0.217** |
| 2014 | -0.199* | -0.251** |
| 2015 | -0.092 | -0.085 |

注: * 在 0.01 水平上显著相关 * 在 0.05 水平上显著相关, 下同。

2000—2015 年 TVDI 与降水量的相关关系基本符合自然规律, 除了 2008 与 2011 年外都为负相关。此外, 文章还分析了 TVDI 与滞后降水量数据的相关关系, 见表 2, 在 2000—2015 年这 16 a 里, 有 11 a 都显示出 TVDI 与前一月降水数据的相关性高于 TVDI 与当月降水数据的相关性, 且显著度更强, 这表明 TVDI 对降水量存在一定的滞后性。

本人认为这种滞后性存在的主要原因是: TVDI 是通过 NDVI 与 LST 计算得到的, 我们从遥感影像中提取的 NDVI 值主要反映植被生长状况, 但从大气降水、植被吸收水分到植被自身生长需要一个时间过程, 这一过程导致了滞后性的产生。

3.2.2 TVDI 与土壤相对湿度的相关性评价 通过姚春生^[12], 齐述华^[17]等人的研究以及 TVDI 的物理意义可知, 土壤湿度也应与 TVDI 呈负相关。使用相同的方法将 10 cm, 20 cm, 50 cm 的土壤相对湿度数据依次与 TVDI 做相关分析, 结果如下:

除了 2000 年与 2008 年 TVDI 与土壤相对湿度呈正相关外, 其余年份土壤相对湿度与 TVDI 都为负相关, 从表 3 中可以看到, 土层深度为 10 cm 时土壤湿度与 TVDI 的相关性最高, 深度为 20 cm 时次之, 50 cm 时最差。这说明 TVDI 能够更好地反映土壤表层干湿度状况^[18-20]。

此外, 研究中同样分析了 TVDI 对土壤相对湿度

的滞后性,可以看到 TVDI 对土壤相对湿度不存在明显的滞后性。这可能是因为土壤相对湿度除了受降水量影响外,还会受到温度、灌溉、土壤质地等多种因

素的影响,其中温度作为影响土壤相对湿度的主要因素之一,其与归一化植被指数 NDVI 之间不存在明显的滞后性^[21],可能会造成这一结果。

表 3 2000—2013 年 TVDI 与土壤相对湿度的相关系数

| 年份 | 当月 | | | 滞后一月 | | |
|------|----------|----------|----------|---------|---------|----------|
| | 10 cm | 20 cm | 50 cm | 10 cm | 20 cm | 50 cm |
| 2000 | 0.146 | 0.138 | 0.303 | -0.015 | 0.036 | 0.006 |
| 2001 | -0.275** | -0.283** | -0.244** | -0.123 | -0.122 | -0.122 |
| 2002 | -0.069 | -0.069 | -0.062 | -0.272* | -0.149 | -0.124 |
| 2003 | -0.188* | -0.177* | -0.127 | -0.089 | -0.078 | -0.047 |
| 2004 | -0.128 | -0.106 | -0.112 | -0.123 | -0.147 | -0.109 |
| 2005 | -0.245** | -0.169* | -0.033 | 0.188* | 0.229* | 0.215* |
| 2006 | -0.236** | -0.200* | -0.142 | -0.198* | -0.225* | -0.226* |
| 2007 | -0.153 | -0.133 | -0.125 | -0.064 | -0.024 | -0.011 |
| 2008 | 0.094 | 0.097 | 0.116 | -0.027 | 0.029 | 0.071 |
| 2009 | -0.388** | -0.380** | -0.295** | -0.071 | -0.132 | -0.153 |
| 2010 | -0.063 | -0.110 | -0.164* | -0.144 | -0.199* | -0.258** |
| 2011 | -0.059 | -0.084 | -0.100 | -0.067 | -0.059 | -0.105 |
| 2012 | -0.237** | -0.240** | -0.217** | -0.088 | -0.050 | 0.014 |
| 2013 | -0.328** | -0.317** | -0.209** | -0.052 | 0.001 | -0.003 |

因合成 TDVI 的 Lst 数据是后期合成数据,且无法避免云层等天气状况对遥感监测的影响,使得以 TVDI 为指标监测干旱可能会与实际状况出现一定的偏差。但总体上看,TVDI 与气象干旱指数存在稳定的相关性,可以用来反演干旱发生状况。文章将以 TVDI 为指标对陕西省春旱状况加以分析。

3.3 陕西省春旱时空特征分析

3.3.1 陕西省春旱时间特征分析 逐月来看(图 2),从 2000—2015 年,5 月的旱情最为严重,有 12 a 的时间 TVDI 值都在 0.7 及其以上,4 月的旱情次之,3 月的旱情强于 2 月弱于 4 月,2 月的旱情最弱,只有一个月的 TVDI 值达到了 0.7。可以看出,陕西各地每年的 TVDI 值从 2 月到 5 月会逐渐增大,表明在 2000—2015 年陕西省春季旱情有着逐月增强的趋势,这一结果可能是由于陕西地处内陆,致使夏季风所携带的水汽无法在春季到达此地,随着 2—5 月气温的逐渐升高,旱情也随之不断加重。

各月旱情在 2000—2015 年的波动状况较为相似,表明各月旱情的变化基本具有一致性,在旱情严重的年份,各月的旱情都明显加重,反之亦然。这从侧面说明了陕西省春旱的持续时间长^[22]。各月旱情在 2000—2015 年的波动幅度有所差异,这说明一些短期的天气变化对各月的旱情有一定的影响,加重或减轻了当月的旱情,但持续时间较短,很难改变春季旱情整体走势。

逐年来看,因各月旱情变化基本一致。特选取灾情较重的 5 月份进行分析,见图 3,2000 到 2007 年陕

西省整体旱情较为严重,除却 2003 年旱情有所减弱外,其余各年份的 TVDI 值居高不下,发生重度干旱的土地面积大且集中在秦岭以北的大片地区。但从 2006 年开始春季旱情有明显的减弱趋势,发生干旱的土地面积在迅速减少,并于 2014 年降到最低。这一结果从蔡新玲^[22]的研究中也可以看到,陕西省年年都有旱情发生,但近 10 a 来干旱程度却有所缓解,于是这里提出猜想,在全球变暖的大背景下,这种现象可能是陕西省内人为改善环境所导致的。

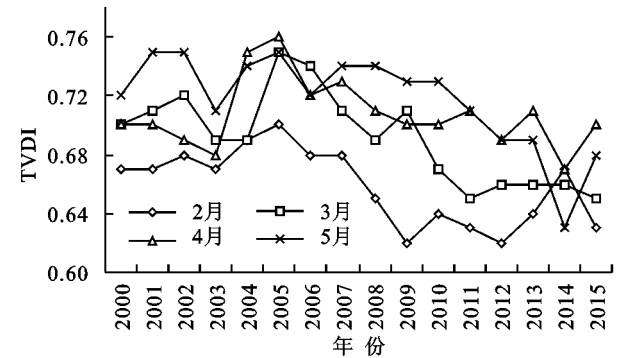


图 2 陕西省 2000—2015 年 2—5 月 TVDI 变化

总体上看,陕西省受大陆性季风气候影响春季干旱频发,且干旱覆盖面积大,持续时间长,这与全球气候变暖的大环境相符。不过陕西省春季干旱基本为轻度干旱,0.6<TVDI<0.8,划分指标见表 4。从图 2,图 3 中可以清晰看出,自 2000 年以来,陕西省春季旱情整体走势是逐年下降的,这说明春旱对我们的影响正在减轻。

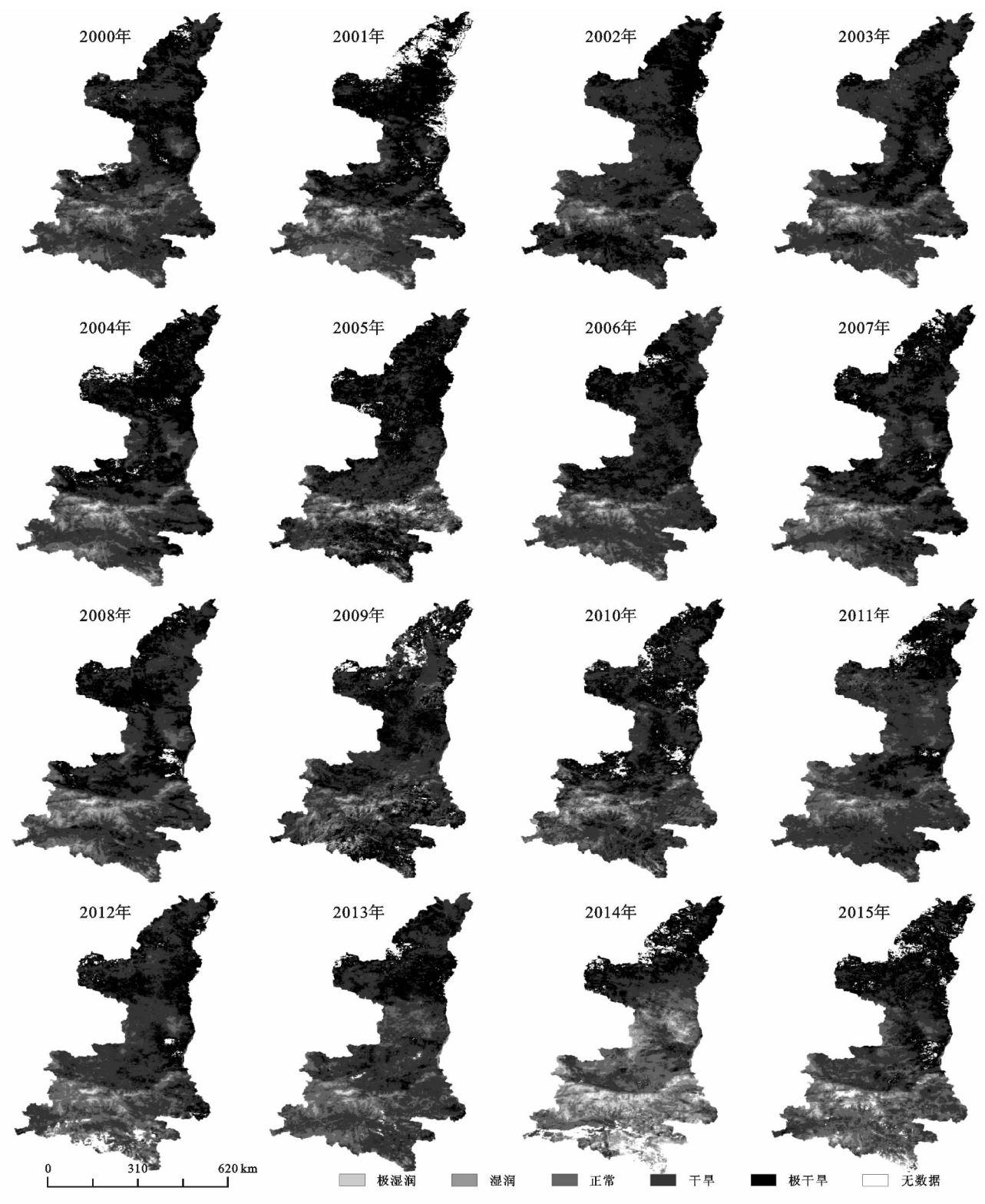


图 3 陕西省 2000—2015 年 5 月旱情分布变化

表 4 以 TVDI 为指标的干旱等级划分标准

| 等级 | 类型 | TVDI |
|----|-----------|-----------------------|
| 1 | 极湿润 | $0 < TVDI < 0.2$ |
| 2 | 湿润 | $0.2 \leq TVDI < 0.4$ |
| 3 | 正常 | $0.4 \leq TVDI < 0.6$ |
| 4 | 干旱(轻度干旱) | $0.6 \leq TVDI < 0.8$ |
| 5 | 极干旱(重度干旱) | $0.8 \leq TVDI < 1$ |

3.3.2 陕西省春旱空间特征分析 从图 4 可以看出,陕西省旱情的空间变化特征显著,全省 2 月旱情较轻,多数区域气候正常,受旱地区多为轻度干旱,只有关中地区出现了重度干旱。此时,陕北的北部、南部生态环境正常,关中与陕南交界处的秦岭山脉生态环境较好,陕南整体旱情较轻。

到了 3 月,陕西省的旱情在关中和陕北地区迅速

扩散,陕北全境几乎都有干旱发生,榆林市开始出现重度干旱,关中地区重度干旱分布最广,其中关中东部的渭南市受重度干旱影响最为严重,陕南的旱情也有所扩散,发生轻度干旱的土地增多,以商洛市最为严重。秦岭山脉及陕南南部地区的生态环境依旧较好。

4 月份陕北地区重旱面积迅速扩大,基本达到了陕北面积的一半,主要分布在陕北的北部地区,陕北南部多轻度干旱,关中东北部地区受重度干旱影响严重,其余地区多为轻度干旱,陕南旱情有些许好转,除了商洛市和汉中市中部地区有轻度干旱发生外,其余地区的生态环境正常。

5 月的旱情最为严重,关中、陕北地区旱情较 4 月进一步加重,以秦岭为界,干旱几乎在秦岭以北所有土地上都有出现,且重度干旱面积大。陕南地区也有超过一半的土地发生了干旱,类型基本为轻度干旱。此时,全省仅剩秦岭山脉等少数地区没有受到干旱的影响。

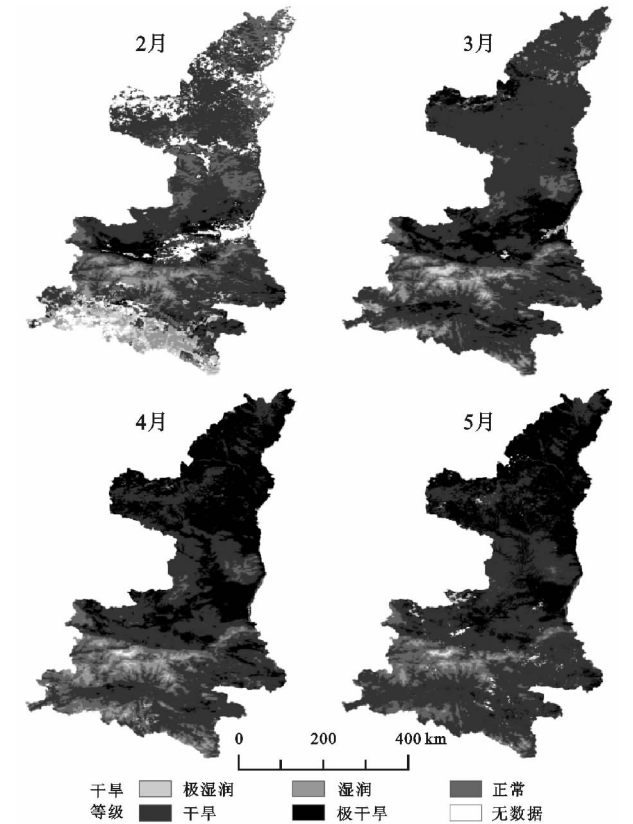


图 4 陕西省 2000—2015 年春季旱情分布

4 结论与讨论

(1) 研究表明土壤相对湿度和降水量数据与 TVDI 都呈明显的负相关, TVDI 对降水量存在一定的滞后性,对土壤相对湿度不存在明显的滞后性。

(2) 时间上,因陕西地处季风区深处,当春季气温回升时,饱含水汽的夏季风却未抵达内陆,致使春季干旱不断,2 月温度较低且有雪水补给所以旱情最

轻,从 2 月到 5 月旱情逐渐加重。

近百年来全球变暖已成定论,在这一大背景下,区域干旱化趋势愈加强烈,我国北方的干旱化也在逐步加重,干旱半干旱地区的分界线已达历史最南端^[23-25],与上述特征相对应,陕西省 2000—2015 年春旱发生频繁,可谓是年年有旱,干旱特征明显。但近 10 年来春季旱情的强度却有明显的下降,这说明,在区域干旱化的大背景下,存在其他因素缓解了旱情,而这些因素是否与一系列生态保护工程有关还需今后进一步的讨论。

(3) 空间上,陕西省春旱发生面积很广。陕北地区因降水少,水土流失严重,自 3 月起在全境范围陆续发生干旱,从 3 月到 5 月发生重度干旱的土地面积在迅速扩大,以陕北北部扩散最广,陕北南部多山塬,气温低,黄龙等地的降水量较高,重度干旱相比北部较少^[26];关中由西部向东北地区旱情逐渐加重,出现重度干旱的土地面积大,多集中在渭南市,而渭南是中国重要的商品农业基地,对该地区旱情的研究将有重要的现实意义,关中南部秦岭山区生态环境稳定,基本无旱情发生;陕南又称秦巴山区,有汉江穿流而过,生态环境具有明显的南方特征,该地区的干旱多分布在秦岭山脉以南及陕南东部地区,且极少有重度干旱发生。

此外,秦岭山脉是我国北方和南方的天然分界线,在陕西,因秦岭的存在有了关中和陕南之隔。秦岭山脉植被茂密,生物种类繁多,不仅自身生态条件优越,在涵养水源、保持水土等方面也有着重要的作用^[27],根据本文研究结果显示,在山脉附近基本没有干旱发生。可见,秦岭对于陕西有着极其特殊的生态服务价值,保护秦岭山脉的优势气候有着十分重要的现实意义。

认识区域干旱特征是一个多学科交叉的研究过程,它既是生物、土壤、水文、气候及其间相互作用的自然过程,也是人与自然相互作用的人文过程。人类活动与植被覆盖、气候变化之间有着紧密的联系,文中并没有把旱情的空间分布、时间变化与人类活动做具体分析,这是我们下一步研究的重点。此外陕西省区域气候的改善、旱情的减轻是否与实施退耕还林还草等一系列人类活动紧密相关,还需进一步分析和验证^[21]。

参考文献:

[1] Wilhite D A. Drought as a natural hazard: Concepts and definitions [J]. Drought A Global Assessment, 2000 (1): 3-18.

[2] 齐述华. 干旱监测遥感模型和中国干旱时空分析[D]. 北京: 中国科学院, 2004.

[3] 王利民, 刘佳, 邓辉, 等. 我国农业干旱遥感监测的现状与展望[J]. 中国农业资源与区划, 2008, 29(6): 4-8.

[4] 侯英雨, 何延波, 柳钦火, 等. 干旱监测指数研究[J]. 生态学杂志, 2007, 26(6): 892-897.

- [5] 王君. 遥感干旱监测研究进展[J]. 科技信息, 2014(14): 109-112.
- [6] Goward S N, Hope A S. Evapotranspiration from combined reflected solar and emitted terrestrial radiation; Preliminary FIFE results from AVHRR data [J]. *Advances in Space Research*, 1989, 9(7): 239-249.
- [7] 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.
- [8] 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 Reviews*, 1994, 9(1/2): 161-173.
- [9] Nemani R, Pierce L, Running S, et al. Developing satellite-derived estimates of surface moisture status[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32(3): 548-557.
- [10] Moran M S, Clarke T R, 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.
- [11] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2): 213-224.
- [12] 姚春生, 张增祥, 汪潇. 使用温度植被干旱指数法(TVDI)反演新疆土壤湿度[J]. *遥感技术与应用*, 2004, 19(6): 473-478.
- [13] 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(4): 677-688.
- [14] 杨秀海, 卓嘎, 罗奄. 基于 MODIS 数据的西北地区旱情监测[J]. *草业科学*, 2011, 28(8): 1420-1426.
- [15] Heim Jr R R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(8): 1149-1165.
- [16] 朱国锋, 蒲焱, 何元庆, 等. 横断山区土壤相对湿度时空分异[J]. *地理科学*, 2016, 32(7): 872-877.
- [17] 齐述华, 王长耀, 牛铮. 利用温度植被旱情指数(TVDI)进行全国旱情监测研究[J]. *遥感学报*, 2003, 7(5): 420-427.
- [18] 杨嚷, 武建军, 闰峰. 基于地表温度植被指数特征空间的区域土壤干湿状况[J]. *生态学报*, 2009, 29(3): 1205-1216.
- [19] 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(5): 998-1005.
- [20] 张洁, 武建军, 周磊, 等. 基于 MODIS 数据的农业干旱监测方法对比分析[J]. *遥感信息*, 2012(5): 48-54.
- [21] 白建军, 白江涛, 王磊. 2000—2010 年陕北地区植被 NDVI 时空变化及其与区域气候的关系[J]. *地理科学*, 2013, 34(7): 882-888.
- [22] 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.
- [23] 李新周, 刘晓东, 马柱国. 近百年来全球主要干旱区的干旱化特征分析[J]. *干旱区研究*, 2004, 21(2): 97-103.
- [24] 符淙斌, 马柱国. 全球变化与区域干旱化[J]. *大气科学*, 2008, 32(4): 752-760.
- [25] 方建刚, 白爱娟. 陕西春季干旱的环流特征分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(5): 247-253.
- [26] 杨新. 陕西干旱灾害特征分析[J]. *陕西气象*, 1998(4): 22-25.
- [27] 高雪玲, 刘康, 康艳, 等. 秦岭山地生态系统服务功能价值初步研究[J]. *中国水土保持*, 2004(4): 19-21.

~~~~~

(上接第 239 页)

- [33] 陈学兄, 张小军, 陈永贵, 等. 陕西省 1998—2008 年植被覆盖度的时空变化研究[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2013, 38(6): 674-678.
- [34] 陈增文. 基于 NDVI 的生态环境变化分析: 以福建省龙岩市长汀县为例[J]. *化学工程与装备*, 2012(6): 204-207.
- [35] Wang Z, Daun C, Li Y, et al. Assessment of the restoration of a degraded semi-humid evergreen broadleaf forest ecosystem by combined single-indicator and comprehensive model method[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(6): 757-767.
- [36] Deng L, Shangguan Z P, Rui L I. Effects of the grain-for-green program on soil erosion in China[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2012, 27(1): 120-127.
- [37] 徐凯健, 曾宏达, 张仲德, 等. 亚热带福建省森林生长季与气温、降水相关性的遥感分析[J]. *地球信息科学学报*, 2015, 17(10): 1249-1259.
- [38] Cai H, Yang X, Wang K, et al. Is forest restoration in the southwest China karst promoted mainly by climate change or human-induced factors [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(10): 9895-9910.
- [39] Qin C, Li J Y, Chen H F, et al. Temporal and Spatial Evolution of Vegetation Cover and Its Relationship With Climate Factors in Shaanxi Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(1): 108-114.
- [40] 戴声佩, 张勃, 王海军. 中国西北地区植被 NDVI 的时空变化及其影响因子分析[J]. *地球信息科学学报*, 2010, 12(3): 315-321.