

文章编号: 1008-2786-(2020)1-031-11

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000488

# 2007—2016 年四川省土壤干旱时空动态分析

陈艾琳<sup>1</sup>, 戴晓爱<sup>1\*</sup>, 张诗琪<sup>1</sup>, 周旋<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学 地球科学学院, 成都 610059; 2. 电子科技大学 信息与软件工程学院, 成都 610054)

**摘 要:** 四川作为农业大省, 旱灾是导致农业减产最主要的因素。通过遥感和 GIS 手段进行四川省土壤干旱程度的时空分析, 提高干旱的空间可视化程度, 加强干旱监测的时效性尤为重要。本研究基于四川省 2007—2016 年逐季度的 MODIS 数据和 1961—2011 年 40 个气象站的月降水资料, 采用温度植被干旱指数(TVDI)计算得到四川省干旱等级分布情况, 辅以标准化降雨指数(SPI)进行相关性分析, 并通过线性回归、反距离权重空间插值、GIS 空间分析模型重建等方法, 分析近十年来四川省地区以季度为时间尺度的土壤干旱时空变化特征, 制作各时相土壤干旱分布图展示其微变化。结果表明: (1) 在月时间尺度上, SPI-1 与 TVDI 呈中等至强负相关关系, 即 TVDI 值越小, SPI 值越大, 干旱程度越轻; 验证结果表明 TVDI 都能够较好地对四川省的干旱空间分布状况进行反映。(2) 四川省各区域、各季节干旱分布不均: 空间上, 干旱频发的区域集中在四川盆地及攀西南部区域。时间上, 在春季, 四川盆地地区的土壤干旱程度大致呈现加剧—持续—减缓的趋势; 夏季, 四川盆地的干旱变化趋势是加剧—减缓—加剧; 秋季, 四川盆地的干旱变化趋势是加剧—减缓—持续减缓; 冬季, 全川干旱程度变化不明显。本文的研究结果对四川省开展农业防灾减灾, 引导农业灌溉具有指导意义。

**关键词:** 四川省; 干旱; 温度植被干旱指数(TVDI); 标准化降雨指数(SPI); GIS

**中图分类号:** P237

**文献标志码:** A

由于气候变化, 全球干旱化导致多种生态系统发生变化, 正在对全球范围内人类社会生存的环境构成挑战。在过去的 30 年里, 地球上绝大多数大陆都经历过频繁的干旱灾害<sup>[1]</sup>。由于气候变化、人为活动和全球变暖加剧, 森林砍伐、土地退化、日益增长的水资源需求加剧了干旱的影响<sup>[2-4]</sup>。各种干旱事件造成巨大的破坏, 包括不同时空尺度的作物歉收、牲畜死亡和人类损失<sup>[5-6]</sup>。中国是世界上重要的粮食生产国, 2011 年谷物产量占全球的 20%。我

国有  $2.156 \times 10^7 \text{ hm}^2$  的耕地面积, 约占中国农作物用地的 16%, 经常受到干旱的影响。据相关统计, 建国以来截止 2013 年, 全国年平均受旱灾影响面积为  $0.21 \times 10^8 \text{ hm}^2$ , 粮食产量损失高达  $162 \times 10^8 \text{ kg}$ <sup>[7]</sup>。西南地区近 60 年干旱灾害范围、程度和频次均呈增加趋势。四川最明显, 其次是贵州、云南<sup>[8]</sup>。据新中国成立以来 60 多年的旱灾统计资料显示, 四川省几乎每年都发生着不同程度的干旱灾害。20 世纪 50 年代, 四川盆地气候基本良好, 到了

**收稿日期** (Received date): 2019-07-15; **改回日期** (Accepted date): 2019-12-20

**基金项目** (Foundation item): 四川省留学人员科技活动项目择优资助 (10900-19BZ08-014); 大学生创新创业训练计划项目 (201810616069); 四川省教育厅高校人文社科重点项目 (ZHYJ17-ZD01)。[ Selective Funding for Scientific and Technological Activities of Overseas Students in Sichuan (10900-19BZ08-014); Undergraduate Innovation and Entrepreneurship Training Program (201810616069); Key Projects of Humanities and Social Sciences in Colleges and Universities of Sichuan Province (ZHYJ17-ZD01) ]

**作者简介** (Biography): 陈艾琳 (1996-), 女, 四川资阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 3S 技术与土壤水资源。[ CHEN Ailin (1996-), female, born in Ziyang, Sichuan province, M. Sc. candidate, research on 3S technology and soil water resources ] E-mail: 810337358@qq.com

\* **通讯作者** (Corresponding author): 戴晓爱 (1979-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 高光谱遥感与环境资源遥感。[ DAI Xiaoi (1979-), female, Ph. D., associate professor, specialized in hyperspectral remote sensing and remote sensing of environmental resources ] E-mail: Daixiaoai@163.com

六七十年代,干旱逐渐升级,特别在近 30 年,四川省每 2 至 3 年发生一次重大干旱,甚至持续整年度<sup>[9]</sup>。因此,四川省的干旱时空变化对粮食生产、人民生计和农业可持续具有非常重要的影响。

近年来部分四川省干旱的研究主要集中在四川盆地、川西高原等区域<sup>[10-12]</sup>。1961—2012 年四川省盆地地区春夏秋冬四季均出现变干趋势,其中以秋季最为显著。从 20 世纪 90 年代后期开始各季节重旱和特旱次数大体上呈增加趋势,极端干旱灾害影响面扩大<sup>[13]</sup>,各季农业干旱中春旱发生最为频繁,夏旱次之,伏旱最少;春旱发生范围最广,伏旱最小;干旱平均强度,以春旱强度最高,夏旱次之,伏旱最弱<sup>[14]</sup>;年际变化趋势上,干旱强度有所减弱,但最近 10 年明显增强,且干旱范围扩大<sup>[15]</sup>。以往的研究中,长时序的干旱监测主要基于独立气象站点的监测数据,通过计算气象干旱指数 Palmer 干旱指数 (Palmer Drought Severity Index, PDSI)、标准化降雨指数 (Standardized Precipitation Index, SPI)、标准化降雨蒸散指数 (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index, SPEI) 等进行旱情监测,由于气象监测站点有限,难以反映大范围区域干旱的分布状况。基于遥感数据反演的土壤干旱情况可有效弥补气象干旱指数的不足<sup>[11]</sup>,但多将遥感干旱指数单独应用于某地区极端干旱年(月)的旱情分布情况研究,没有进行长时序的时空变化分析和有效验证。

本文利用遥感干旱指数反演大范围干旱情况,辅以局部气象干旱指数成果加以验证,对全省范围内近十年的季节性干旱情况进行系统性研究,既兼顾了长时序,又通过多种类型的分析图展示空间上的精细变化,能够准确把握区域干旱格局分布及其分异特征以及干旱在不同季节的年际发展规律。其结果为四川省合理安排农业、林业和畜牧业生产,开展农业防灾减灾,引导农业灌溉提供可靠的理论依据,同时可为研究遥感监测手段与气象干旱指标在大面积区域干旱监测中的结合应用提供新思路。

## 1 研究区域和方法

### 1.1 研究区数据

本文选用了两大类数据,MODIS 遥感影像数据和四川省气象站点所采集的降雨量数据。

植被指数 MOD13A2 数据:16 天合成,空间分辨

率 1 km,属于 MODIS L3 数据产品,投影为正弦曲线投影。地表温度/发射率 MOD11A2 数据:8 天合成,空间分辨率 1 km,属于 L3 产品投影为正弦曲线投影。它由每日 1 km 表面温度/发射率产品 (MOD11A1) 合成,该产品存储了晴好天气下 8 天的表面温度/发射率的平均值。

本文采用四川省 1950—2011 年气象站点日降雨量数据,剔除了采集数据时间尺度小于 50 年的气象站点,可供分析的共计 40 个,站点分布见图 1。



图 1 四川省气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in Sichuan Province, China

### 1.2 温度植被干旱指数法

图 2 中  $TS$  表示地表温度值,  $NDVI$  (Normalized Difference Vegetation Index) 表示归一化植被指数值,三角形的三个顶点分别代表  $TS - NDVI$  特征空间中的三种极限情况,左上角顶点表示的是干燥裸土 ( $NDVI$  值低,  $TS$  值高)、左下角顶点代表湿润土 ( $NDVI$  值和  $TS$  值都为该区域最小)、右下角顶点代

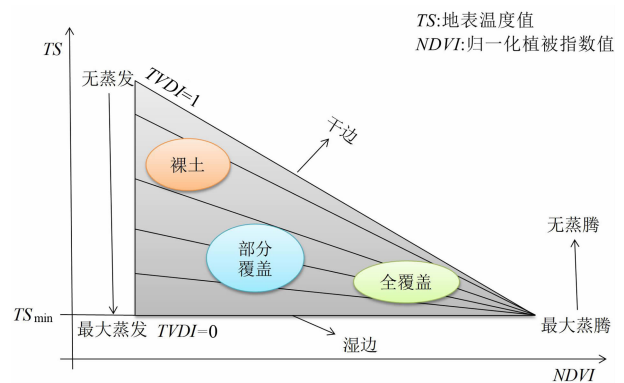


图 2  $TS - NDVI$  特征空间

Fig. 2  $TS - NDVI$  characteristic space

表最湿润且植被覆盖度最高的土壤 ( $NDVI$  值高,  $TS$  值低)<sup>[17]</sup>。在裸土地区, 地表温度与土壤湿度变化呈高度相关。由左上顶点至左下顶点, 地表土壤的水分蒸发由零逐渐增至最大。由左上至右下点, 随着地表植被覆盖度逐渐增加, 地表温度开始逐渐下降。右下角顶点表示地表土壤被植被完全覆盖, 土壤水分含量充足, 这时水分胁迫指数为 0。图中三角形斜边表明土壤水分有效性很低, 地表水分蒸发量小, 处于干旱状态时被认为是“干边缘”; 下边表示土壤含水量充足, 不是植物生长的限制因素, 此时的地表蒸散量属于潜在蒸散, 被认为是“湿边缘”<sup>[18-19]</sup>。

通过对特征空间进行简化, 研究人员提出了温度植被干旱指数 (Temperature Vegetation Dryness Index,  $TVDI$ ), 用以下公式表示:

$$TVDI = \frac{TS - TS_{\min}}{TS_{\max} - TS_{\min}} \quad (1)$$

式中,  $TS$  是遥感影像上任一像元的地表温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $TS_{\min}$  表示相同植被覆盖情况下 ( $NDVI$  不变) 的最低地表温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $TS_{\max}$  为固定  $NDVI$  值对应的最高地表温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )<sup>[18]</sup>。

在利用遥感影像获得的地表温度 ( $TS$ ) 和植被指数 ( $NDVI$ ) 数据中, 提取相同植被指数下的最高和最低表面温度<sup>[20]</sup>, 并且植被指数相互线性拟合以获得特征空间中的干湿边方程, 式(2)和式(3)分别为湿边方程和干边方程:

$$TS_{\min} = a_1 + b_1 \times NDVI \quad (2)$$

$$TS_{\max} = a_2 + b_2 \times NDVI \quad (3)$$

式中,  $a_1$  和  $b_1$  为湿边方程的系数;  $a_2$  和  $b_2$  为干边方程的系数。

根据  $TVDI$  的原理, 干边缘对应于  $TVDI$  值 1, 湿边缘为 0, 并且任何点的  $TVDI$  值在 0 和 1 之间。  $TVDI$  值越大, 土壤干旱越严重。

### 1.3 标准化降雨指数法

该方法通过建立月均降雨量的正态分布模型, 计算分布概率后经正态标准化得到  $SPI$  值, 解决了单纯使用降雨量数据难以在不同时空尺度上进行比较的问题<sup>[21]</sup>。

根据《气象干旱等级》国家标准<sup>[22]</sup>中的公式计算标准化降水指数 ( $SPI$ ), 具体计算过程如下:

设随机变量  $y$  为某一时段降水量, 则该变量的  $\Gamma$  分布概率密度函数为:

$$f(y) = \frac{1}{\beta^{\gamma-1} e^{-y/\beta}} \quad y > 0 \quad (4)$$

式中,  $\gamma$  为尺度参数;  $\beta$  为形状参数。用极大似然法得:

$$\hat{\gamma} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A} \quad (5)$$

$$\hat{\beta} = \bar{y}/\hat{\gamma} \quad (6)$$

$$A = \lg \bar{y} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg y_i \quad (7)$$

式中,  $y_i$  为降水量资料样本;  $\bar{y}$  为降水量气候平均值。

确定式(4)中的参数后, 如果知道降水量  $y_0$ , 可求出事件为随机变量  $y$  小于  $y_0$  的概率<sup>[22]</sup>:

$$F(y < y_0) = \int_0^{y_0} f(y) dy \quad (8)$$

根据数值积分将式(4)代入式(8)得到该事件发生概率的近似值。若降水量为 0 时, 由式(9)可估算事件概率为<sup>[23]</sup>:

$$F(y = 0) = \frac{m}{n} \quad (9)$$

式中,  $m$  为降水量为 0 的样本个数;  $n$  为总样本个数。

对  $\Gamma$  分布概率进行正态标准化处理, 即将式(8)和式(9)求得的概率值代入标准化正态分布函数, 即:

$$F(y < y_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{y_0} e^{-z^2/2} dz \quad (10)$$

对式(10)进行近似求解可得:

$$Z = S \frac{t - (c_2 t + c_1) t + c_0}{((d_3 t + d_2) t + d_1) t + 1.0} \quad (11)$$

式中,  $t = \sqrt{\ln \frac{1}{F}}$ ,  $F$  为式(8)或式(9)求得的概率;

当  $F > 0.5$  时,  $S = 1$ , 当  $F \leq 0.5$  时,  $S = -1$ 。

当  $c_0 = 2.515517$ 、 $c_1 = 0.802853$ 、 $c_2 = 0.010328$ 、 $d_1 = 1.43278$ 、 $d_2 = 0.189269$ 、 $d_3 = 0.001308$  时, 由式(11)求得的  $Z$  值即为  $SPI$  值。

## 2 结果与分析

### 2.1 四川省 $TVDI$ 干旱等级分布

根据  $TVDI$  原理, 本研究通过 ENVI IDL 程序计算出各个像元的  $TVDI$  值。干旱程度分级标准是反映土壤含水量的量度, 本文使用张丽谦<sup>[24]</sup>等人提出

的四川伏旱 TVDI 分级标准进行分级:无旱(0 ~ 0.67)、轻旱(0.67 ~ 0.74)、中旱(0.74 ~ 0.8)、重旱(0.8 ~ 0.86)、特旱(0.86 ~ 1.0)。

由图 3 可知,四川省近十年来几乎每年春夏季都有重旱特旱的情况发生,其主要区域分布在川中部、川东等盆地区域以及川南攀枝花为代表的低纬度区域。

中部及东部盆地区域主要覆被类型为城镇,该区域植被指数值 *NDVI* 较低,一般来说采用温度植被干旱指数法计算得到的 *TVDI* 值应偏高。但在气温较低的情况下盆地区域的 *TVDI* 值反而偏低,属于无旱(图 3d)。因此,温度植被干旱指数法在一定程度上可以反映城镇地区的干旱情况。

川南攀枝花区域在春、秋、冬季都存在一定程度的重特旱情况,唯独在夏季出现重特旱的情况较少(图 3),原因是该区域位于四川省最南端,是以南亚热带为基带的立体气候小岛,具有四季不分明,干雨季分明的气候特征;在雨季(夏)由于降雨量的剧增,反而能在高温环境下维持土壤的湿度。

2.2 TVDI 与 SPI 的相关性分析及验证

本文选取的气象站点的降雨量数据收录截止到 2011 年,经过处理得到的各站点月均降雨量,计算得到的 *SPI*-1(时间尺度为 1 个月的 *SPI* 值),然后分别提取出和 *TVDI* 研究月份重叠的 2007—2010 年 1、4、7、10 月的 *SPI*-1 值,将 *TVDI* 值提取至对应

的气象站点,得到每个气象站点研究月份的 *TVDI* 值和 *SPI*-1 值,将各值进行统计和 Pearson 相关性分析,计算得出 2007—2010 年各气象站点 *SPI*-1 值和 *TVDI* 值的相关系数(表 1)。本文同时也对 40 个气象站点按时间顺序做相关性分析(表 2)。表 1 中,不同时间 *TVDI* 值和 *SPI*-1 值的相关系数在 -0.4 ~ -0.7 之间,呈负相关关系,表 2 中也可以看出,同一气象站点在 2007—2010 年中的 *TVDI* 和 *SPI* 也呈负相关关系,尽管部分站点的相关系数绝对值较低,但绝大部分都呈中等至强负相关,由此可以得出 *SPI* 值越低, *TVDI* 值越高,该区域干旱越严重。

表 1 TVDI 与 SPI 不同月份的相关性分析

Tab. 1 TVDI and correlation analysis of SPI in different years

年 - 月	相关系数	年 - 月	相关系数
2007 - 01	-0.49	2009 - 01	-0.62
2007 - 04	-0.59	2009 - 04	-0.60
2007 - 07	-0.48	2009 - 07	-0.54
2007 - 10	-0.61	2009 - 10	-0.51
2008 - 01	-0.48	2010 - 01	-0.63
2008 - 04	-0.70	2010 - 04	-0.59
2008 - 07	-0.50	2010 - 07	-0.51
2008 - 10	-0.56	2010 - 10	-0.54

注:表中的相关系数是指 2007—2010 年各气象站点 *SPI*-1 值和 *TVDI* 值的相关系数。

表 2 基于不同站点的 TVDI 与 SPI 的相关性分析

Tab. 2 correlation analysis of TVDI and SPI based on different sites

站点名	相关系数	站点名	相关系数	站点名	相关系数	站点名	相关系数
石渠	-0.74	巴塘	-0.47	昭觉	-0.27	遂宁	-0.50
若尔盖	-0.72	新龙	-0.79	雷波	-0.23	南充	-0.23
德格	-0.60	理塘	-0.64	宜宾	-0.71	小金	-0.57
甘孜	-0.80	雅安	-0.63	盐源	-0.35	松潘	-0.21
色达	-0.89	成都	-0.61	会理	-0.06	康定	-0.31
道孚	-0.72	稻城	-0.26	广元	-0.35	峨眉山	-0.76
马尔康	-0.71	乐山	-0.64	万源	-0.28	西昌	-0.79
红原	-0.68	木里	-0.70	阆中	-0.44	攀枝花	-0.70
温江	-0.80	九龙	-0.62	巴中	-0.48	纳溪	-0.62
都江堰	-0.28	越西	-0.41	达县	-0.61	叙永	-0.55

注:表中的相关系数是指同一气象站点在 2007—2010 年的 *TVDI* 值和 *SPI* 值的相关系数。

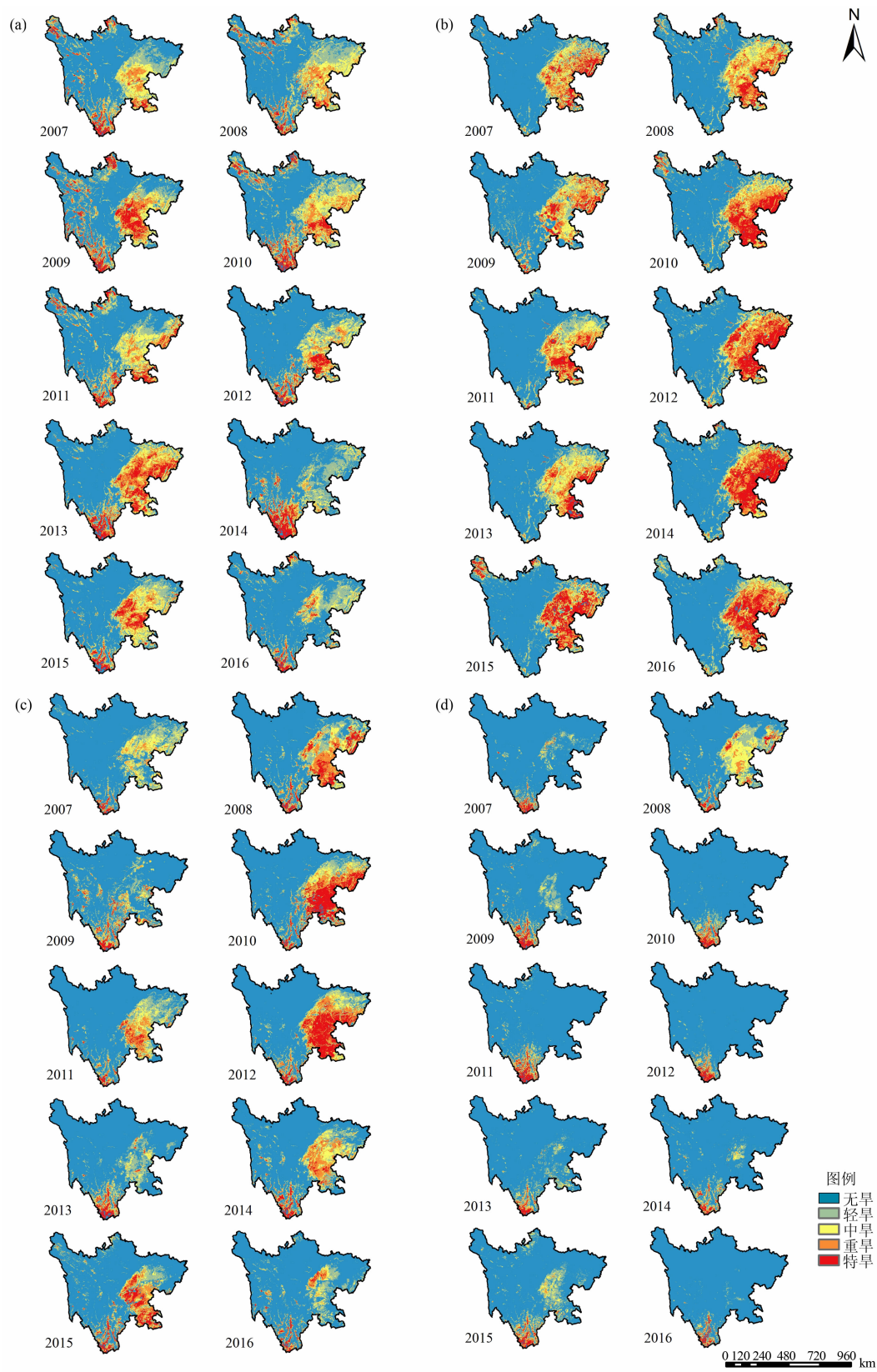


图 3 四川省 2007—2016 年 TVDI 干旱等级分布:(a)春季;(b)夏季;(c)秋季;(d)冬季

Fig.3 Distribution of TVDI drought grades in Sichuan Province from 2007 to 2016;

(a) spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter



## 2.3 四川省干旱时空动态变化特征

### 2.3.1 TVDI 值的时间变化趋势

本研究利用一元线性回归趋势分析法对随时间变化的 TVDI 值进行回归分析,模拟每一个栅格点 TVDI 的时间变化趋势,其趋势显著性检验采用  $F$  检验。每个栅格点的  $P$  值通过 MATLAB 平台逐像元迭代计算得到, $P \geq 0.05$  的栅格点通过显著性检验。将通过显著性检验的栅格像元值根据回归方程的斜率值作为分级标准,分为  $-0.09 \sim -0.01$ ,  $-0.01 \sim -0.005$ ,  $-0.005 \sim 0$ ,  $0 \sim 0.005$ ,  $0.005 \sim 0.01$ ,  $0.01 \sim 0.07$  六个等级,对应变化趋势分类是显著减轻、中度减轻、轻度减轻、轻度加剧、中度加剧、显著加剧;未通过显著性检验的栅格归为变化不显著类别,得到 2007—2016 年 TVDI 变化趋势图(图 4)。

由图 4 可以看出,通过显著性检验的区域占比较低,大部分地区干旱变化不显著。春季,干旱程度显著增加的区域主要是川东北地区的部分城市以及川南地区,川西北大部分地区是呈显著减轻趋势;夏季,川西北省界边缘地区及盆地区域呈显著加剧趋

势,川西中部地区基本呈现中度或轻度减轻趋势;秋季,川西北部、中部及部分盆地区域呈显著加剧趋势,川中部山地沿线区域呈显著减轻趋势;冬季,盆地、川西南地区呈显著减轻,但川西北及西南部分地区呈显著加剧趋势。

图 5 可以看到每个季节十年的发展趋势所占的面积比例,通过显著性检验的每个季节都不到 10%。春季呈减轻趋势的面积占比和达 7.13%,加剧仅为 0.55%;夏季干旱加剧趋势面积占比和达 4.48%,减轻面积和 1.7%;秋季呈加剧趋势的面积和达 4.25%,减轻面积和 3.38%;冬季减少趋势的面积和占比 2.46%,加剧和为 0.82%,结合图 4 可以判断,四川省在 2007—2016 年夏、秋两季部分地区干旱加剧较明显,春季干旱减轻较明显,冬季绝大部分地区无明显变化。

### 2.3.2 干旱等级转移矩阵

利用 GIS 空间分析重组建模的方法,选择 2007、2010、2013 和 2016 年每个季节的 TVDI 干旱等级分布图进行转移矩阵计算,得到十年来的干旱

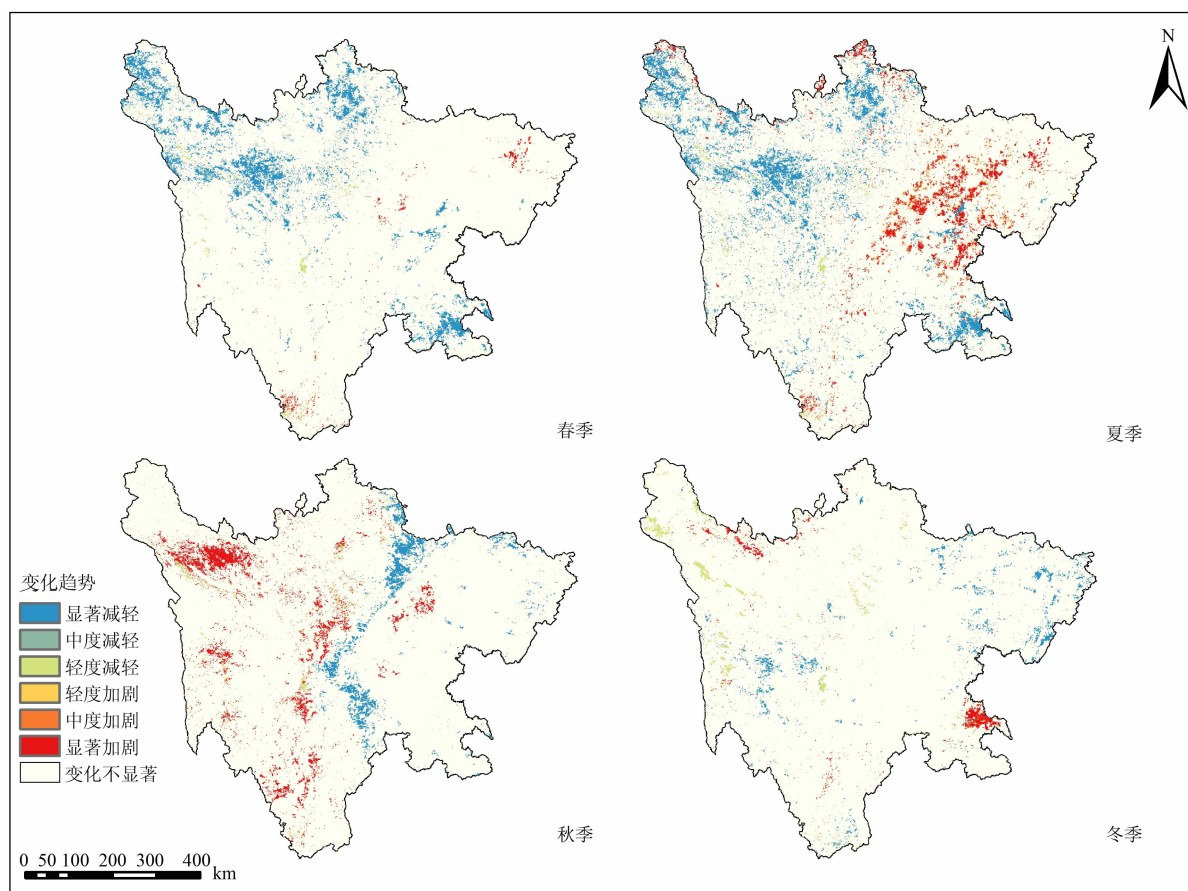


图 4 2007—2016 年四季 TVDI 值的变化趋势图

Fig.4 Trends in TVDI values for the four seasons from 2007 to 2016

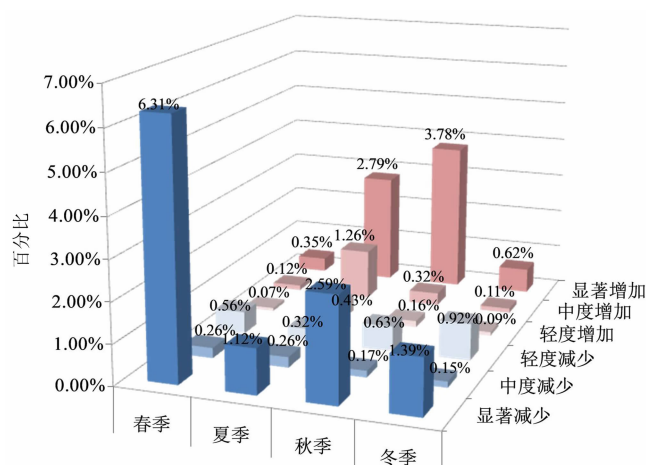


图 5 2007—2016 年四季 TVDI 值变化趋势柱状图

Fig. 5 Trends in TVDI values for the four seasons from 2007 to 2016

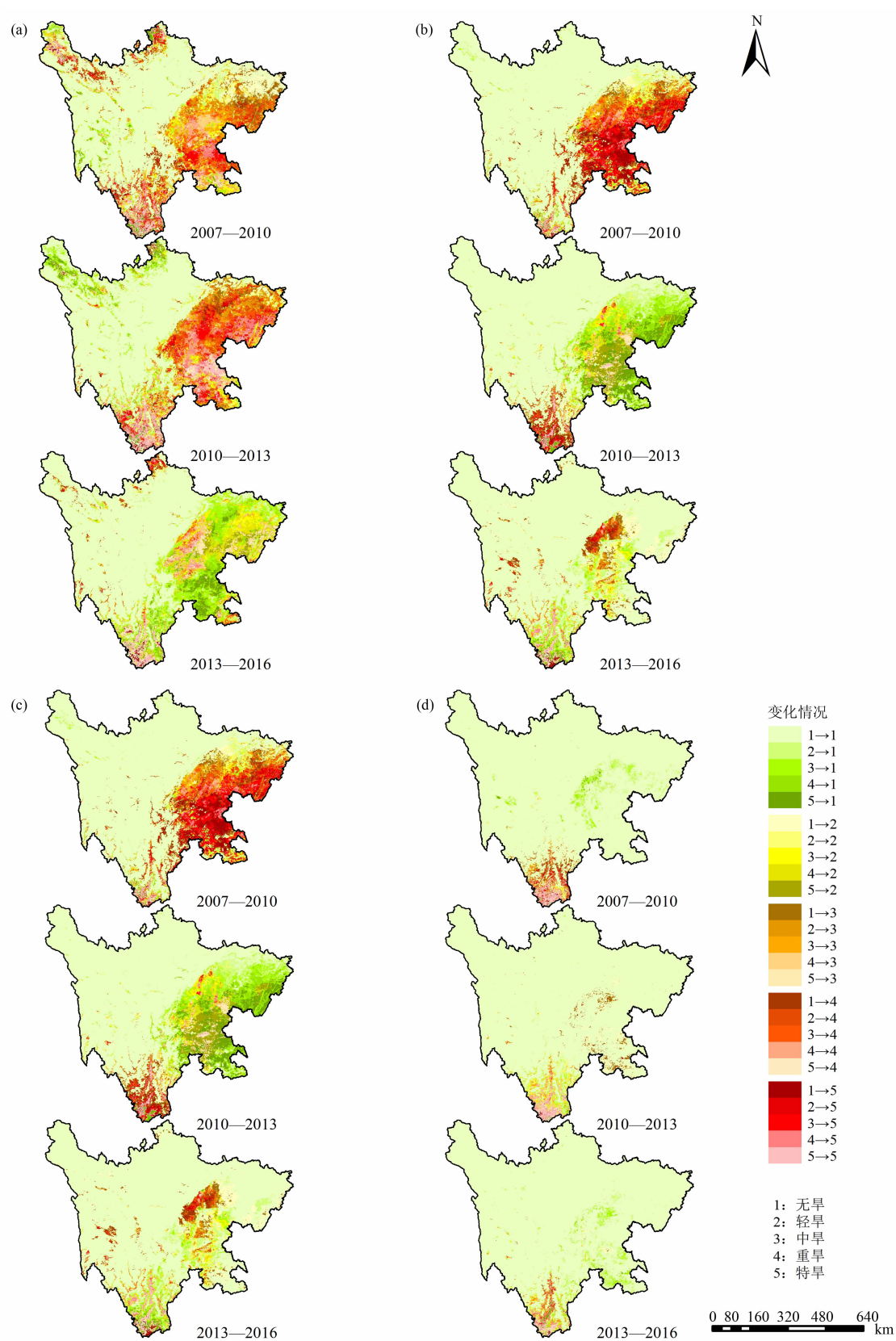
等级转移情况图,从图 6 中可以看出各个区域的干旱等级变化情况,共 25 种,用同色系不同饱和度的颜色表示。

由图 6 可知:春季,2007—2010 年川东盆地以南地区由轻旱、中旱变为重特旱;盆地东北区域主要由无旱、轻旱变为中旱、重旱;但盆地中部由重旱、特旱减轻为中旱、轻旱,结合图 3 春季干旱等级分布可以看到是在 2007—2009 年加剧,仅在 2010 年有所缓解;川南凉山州等地有部分区域由无旱、轻旱变为重特旱,部分区域保持特旱无变化。2010—2013 年,整个川东北地区大范围干旱情况加剧,轻中旱转为重特旱,旱灾影响范围极广,基本覆盖整个四川盆地;川南地区基本维持特旱情况无变化。2013—2016 年,整个四川盆地及凉山州等地的旱情有明显的缓解,盆地以南的乐山、自贡、内江等地旱情由重特旱转变为无旱,盆地以北的南充、达州等地区由中旱、重旱变为轻旱,结合图 3 春季干旱等级分布图可知,盆地区域是在 2014 年就有明显缓解,2015 年加剧再到 2016 年旱情减缓显著。

夏季,2007—2010 川东盆地绵阳广元等地区由轻旱、中旱转为无旱、轻旱;而南充、广安包括整个盆地以南地区,基本都处于重特旱状态,部分地区由轻旱、中旱变为重特旱,部分地区保持特旱情况。2010—2013 年,只有川东盆地以北地区干旱情况有所减缓,绵阳、广元、巴中等区域由中旱、重特旱转为无旱、中轻旱;盆地中部至南部,大部分地区由特旱转为重旱,部分地区保持特旱状态,泸州南部区域由中旱、重旱转为特旱,结合图 3 中夏季 TVDI 干旱等

级分布可知,盆地区域在 2010—2011 年旱情是先减缓,到 2012 年旱情加剧严重,直到 2013 年才有所减缓。2013—2016 年,整个川东盆地区域几乎呈现旱情加重的情况,大部分地区由中旱转为特旱,盆地以北广元巴中等区域由无旱、轻旱转为中旱;泸州北部、中部地区基本保持特旱状态,小部分区域由无旱转为特旱,但泸州南部部分地区又由重特旱转为无旱、轻旱。

秋季,2007—2010 年,川东盆地中部及南部干旱加剧明显,大部分地区由无旱、轻旱转为重特旱,只有盆地以北广元、巴中以及盆地最南端的宜宾泸州等地区有干旱减缓的情况发生,结合图 3 秋季 TVDI 干旱等级分布可知 2007—2008 年盆地区域干旱有所加重,但到 2009 年几乎没有旱情,直到 2010 年又有大面积的重特旱发生。2010—2013 年,之前变为重特旱的区域又全部恢复为无旱、轻旱状态,只有绵阳、德阳小部分区域有干旱加剧的情况发生,此外,川南攀枝花等地区的干旱情况由无旱轻旱变为重特旱。结合图 3 秋季 TVDI 干旱等级分布可知,2010—2011 年旱情是减轻的,但到 2012 年加剧严重,直到 2013 年才全部减轻。2013—2016 年,盆地大范围地区依旧保持无旱情况或是由轻旱中旱转为无旱、轻旱;只有盆地中部成都、绵阳、德阳的部分地区由无旱、轻旱变为重特旱,干旱加剧明显。川南攀枝花大部分地区也由重旱转为无旱、轻旱。结合图 3 秋季 TVDI 干旱等级分布可知盆地区域在 2013—2016 年干旱有所加重,到 2015 年中部及南部的旱情更加严重,直到 2016 年才有所缓解。



注:图例中的“→”表示干旱等级变化,例如“1→2”表示从无旱变为轻旱的区域。

图 6 四川省 2007—2016 年干旱等级时空变化转移矩阵:(a) 春季;(b) 夏季;(c) 秋季;(d) 冬季  
Fig.6 Time-space change transfer matrix of drought level in Sichuan Province from 2007 to 2016, China:  
(a) spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter



冬季,2007—2010年,盆地中心地区成都、德阳、绵阳等地由中旱、重旱转为无旱、轻旱,结合图3冬季TVDI干旱等级分布可知,冬季2007—2008年盆地中南部区域旱情是加重的,到2009年减缓显著,到了2010年几乎无旱情发生;川南凉山州的南端,保持重旱状态,少部分地区有干旱加剧情况发生,此外整个四川省基本处于无旱状态。2010—2013年,盆地区域有少部分由无旱转为中旱,川南地区旱情有所缓解,但最南端保持特旱。2013—2016年,盆地区域之前2010—2013旱情加剧的地区基本全部缓解,转为无旱、轻旱,川南地区有少部分旱情加剧,由轻旱、重旱转为特旱。结合图3冬季TVDI干旱等级分布可知,旱情在2013—2014年无明显变化,到2015年盆地中部分地区由无旱变为重旱。川南地区有少部分旱情加剧,由轻旱、重旱转为特旱。

由以上分析可以看出,四川盆地区域在2007—2016年这十年里,干旱的阶段变化是:春季呈现先加剧(2007—2013)后减缓(2013—2016)的趋势;夏季是干旱加剧后(2007—2010)轻度减缓(2010—2013)再严重加剧(2013—2016)的趋势;秋季是先加剧(2007—2010)后减缓并保持的趋势;冬季全川干旱情况较轻且无明显变化。且在每三年的阶段里都有波动情况出现。

### 3 结论与讨论

本研究基于2007—2016年的MODIS影像数据和40个气象站点的降雨量数据,采用TVDI得到四川省干旱等级分布图,并和对应的SPI-1值进行相关性分析,探讨了TVDI和SPI的相关性;结合一元线性回归分析和GIS空间分析重组建模等方法对四川省干旱的时空变化进行了详细分析。得到以下结论:

(1)四川省干旱情况存在明显的季节特征,干旱爆发期主要集中在春夏两季,秋季时仅在2008、2010、2012这三年有大范围重特旱情况发生,冬季基本无重旱特旱情况发生。四川省干旱的空间分布特征为:川西高原地区干旱鲜少发生、四川盆地区域及攀西南部地区几乎每年都有大范围的重特旱情况发生。

(2)利用标准化降雨指数SPI-1值对2007—

2010年1、4、7、10月各气象站点的TVDI值进行Pearson相关性分析,结果表明两者呈负相关关系,即TVDI随着SPI-1值的增加而减小,干旱程度越轻。

(3)利用一元线性回归趋势分析法对随时间变化的TVDI值进行回归分析发现,四川省近十年来的干旱发展趋势为:春季,近十年川西北大范围区域干旱情况逐渐减缓;夏季,四川盆地及川西高原北部大部分区域干旱情况逐渐加剧;秋季,川西高原地区及攀西地区和部分盆地区域在2007—2016年的干旱情况加剧严重,需引起重视;冬季,四川盆地及川中西部区域的干旱情况在2007—2016年期间逐渐减缓。

(4)利用GIS空间分析重组建模得到四川省干旱等级转移矩阵图,分析得到四川盆地区域在春、夏两季的土壤干旱情况比较严重,且在2007—2016年这十年里,春季是呈现先加剧(2007—2013)后减缓(2013—2016)的趋势,夏季是干旱加剧后(2007—2010)轻度减缓(2010—2013)再严重加剧(2013—2016)的趋势。

(5)本文使用张顺谦<sup>[24]</sup>等人提出的四川伏旱分级标准,对干旱发生的TVDI值进行了标准化,但是对于不同土地利用类型的地表土壤来说,同一干旱等级,不同土地利用类型的TVDI值应该存在差异,需要通过实际干旱条件来确定和验证。例如城镇用地存在不能保持水分,NDVI指数值偏低,进而导致TVDI干旱指数偏高的问题。在今后的研究中,可以针对不同土地利用类型确定对应的干旱等级指标。

此外,SPI指数为气象干旱监测指标,在本研究中与TVDI存在负相关性;以后的研究中,可以考虑分析农业干旱指标PDSI,水文干旱指标如地表湿润指数(Surface Wetness Index, SWI)和土壤含水量指数(Standardized Soil Water Content Index, SSI)等与TVDI的关系,探讨基于遥感技术的土壤干旱指标对不同领域的干旱研究分析的适用性。

### 参考文献(References)

- [1] GEBREMESKEL HAILE G, TANG Q, SUN S, et al. Droughts in East Africa: Causes, impacts and resilience [J]. Earth-Science Reviews, 2019, 193: 146–161.
- [2] ZHAO T, DAI A. The magnitude and causes of global drought changes in the twenty-first century under a low-moderate emissions scenario [J]. Journal of Climate, 2015, 28(11): 4490–4512.

- [3] SHEFFIELD J, WOOD E F, RODERICK M L. Little change in global drought over the past 60 years [J]. *Nature*, 2012, **491**: 435 – 438.
- [4] TRENBERTH K E, DAI A, VAN DER SCHRIER G, et al. Global warming and changes in drought [J]. *Nature Climate Change*, **4** (1): 17 – 22.
- [5] AGHAKOUCHAK, AMIR. A multivariate approach for persistence-based drought prediction: Application to the 2010 – 2011 East Africa drought [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, **526**: 127 – 135.
- [6] MO K C, LYON B. Global meteorological drought prediction using the North American multi-model ensemble [J]. *Journal of Hydrometeorology*, **16**(3): 1409 – 1424.
- [7] 国家防汛抗旱总指挥部, 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报(2013) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014: 18 – 23. [The State Flood Control and Drought Relief Headquarters, The ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China floods communique (2013) [M]. Beijing: China Water Conservancy Press, 2014: 18 – 23]
- [8] 韩兰英, 姚玉璧, 王静, 等. 近 60 年中国西南地区干旱灾害规律与成因 [J]. *地理学报*, 2014, **69**(5): 632 – 639. [HAN Lanying, YAO Yubi, WANG Jing, et al. Characteristics and origins of drought disasters in Southwest China in nearly 60 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, **69**(5): 632 – 639]
- [9] 邓绍辉, 罗晓彬. 建国以来四川旱灾特点及其防治 [J]. *四川师范大学学报(社会科学版)*, 2005 (3): 125 – 132. [DENG Shaohui, LUO Xiaobin. Features, prevention and remedy of droughts in Sichuan since 1949 [J]. *Journal of Sichuan Normal University (Social Science Edition)*, 2005 (3): 125 – 132]
- [10] 刘琰琰, 张玉芳, 王明田, 等. 四川盆地水稻不同生育期干旱频率的空间分布特征 [J]. *中国农业气象*, 2016, **37**(2): 238 – 244. [LIU Yanyan, ZHANG Yufang, WANG Mingtian, et al. Spatial distribution of rice drought frequency during different growth periods in Sichuan Basin [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, **37**(2): 238 – 244]
- [11] 王鑫, 陈东东, 李金建. 基于 MODIS 的温度植被干旱指数在四川盆地盛夏干旱监测中的适用性研究 [J]. *高原山地气象研究*, 2015, **35**(2): 4651. [WANG Xin, CHEN Dongdong, LI Jinjian. Application of Temperature-Vegetation Dryness Index to monitor drought in Sichuan Basin based on the MODIS data [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2015, **35**(2): 46 – 51]
- [12] 卢晓宁, 洪佳, 王玲玲, 等. 2001—2013 年川西高原旱情监测及其地形分异 [J]. *干旱区地理(汉文版)*, 2015, **38**(2): 334 – 344. [LU Xiaoning, HONG Jia, WANG Lingling, et al. Drought monitoring of west Sichuan Plateau and its topographic heterogeneity during 2001 and 2013 [J]. *Arid Land Geography*, 2015, **38**(2): 334 – 344]
- [13] 张茜, 张喜亮, 李金建, 等. 基于 SPEI 的四川省盆地区季节性干旱时空变化特征分析 [J]. *干旱地区农业研究*, 2018, **36**(5): 248 – 250, 256. [ZHANG Han, ZHANG Xiliang, LI Jinjian, et al. SPEI-based analysis of temporal and spatial variation characteristics for seasonal drought in Sichuan Basin [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, **36**(5): 242 – 250, 256]
- [14] 王明田, 蔡元刚, 张玉芳, 等. 基于相对湿润度指数的四川省季节性干旱时空分布特征 [J]. *西南农业学报*, 2014, **27**(4): 1715 – 1722. [WANG Mingtian, CAI Yuangang, ZHANG Yufang, et al. Spatial and temporal distribution of seasonal drought in Sichuan Based on Relative Moisture Index [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2014, **27**(4): 1715 – 1722]
- [15] 李金建, 张茜, 王锐婷, 等. 基于湿润指数的四川盆地农业干旱时空变化特征 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2014, **36**(1): 129 – 136. [LI Jinjian, ZHANG Han, WANG Ruiting, et al. Temporal and spatial variations of agricultural drought in Sichuan Basin based on Moisture Index [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science)*, 2014, **36**(1): 129 – 136]
- [16] 陈少丹, 张利平, 汤柔馨, 等. 基于 SPEI 和 TVDI 的河南省干旱时空变化分析 [J]. *农业工程学报*, 2017, **33**(24): 126 – 132. [CHEN Shaodan, ZHANG Liping, TANG Rouxin, et al. Analysis on temporal and spatial variation of drought in Henan Province based on SPEI and TVDI [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, **33**(24): 126 – 132]
- [17] 陈亮, 张超, 常斌, 等. 通用温度-植被指数特征空间农田干旱遥感监测 [J]. *遥感信息*, 2019, **34**(5): 29 – 34. [CHEN Liang, ZHANG Chao, CHANG Bin, et al. Application of general Ts-NDVI Space in farmland drought monitoring [J]. *Remote Sensing Information*, 2019, **34**(5): 29 – 34]
- [18] 简季. 生态水遥感定量研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2006: 44 – 45. [JIAN Ji. Quantitative investigation of Eco-water with remote sensing in the Upper of Minjiang River [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006: 44 – 45]
- [19] GAO Z, GAO W, CHANG N. Integrating temperature vegetation dryness index (TVDI) and regional water stress index (RWSI) for drought assessment with the aid of LANDSAT TM/ETM+ images [J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2010, **13**(3): 495 – 503.
- [20] 龚成, 周瑾, 肖化顺, 等. 基于多源遥感数据融合的湖南林地干旱动态监测研究 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2018, **38**(10): 27 – 33. [GONG Cheng, ZHOU Cui, XIAO Huashun, et al. Dynamic monitoring of forest land drought in Hunan based on multisource remote sensing data fusion [J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2018, **38**(10): 27 – 33]
- [21] 何娇楠, 李运刚, 李雪, 等. 云南省 1961—2012 年干旱时空变化特征 [J]. *山地学报*, 2016, **34**(1): 19 – 27. [HE Jiaonan, LI Yungang, LI Xue, et al. Temporal and spatial characteristics of droughts over Yunnan Province during 1961—2012 [J]. *Mountain*

- Research, 2016, **34**(1):19–27]
- [22] GB/T 20481–2017. 气象干旱等级[S]. 北京:中国标准出版社,2017. [GB/T 20481–2017. The grade of meteorological drought[S]. Beijing: China Standard Press, 2017]
- [23] 孙智辉,王治亮,曹雪梅,等. 基于标准化降水指数的陕西黄土高原地区1971—2010年干旱变化特征[J]. 中国沙漠,2013,**33**(5): 1560–1567. [SUN Zhihui, WANG Zhiliang, CAO Xuemei. Characteristics of drought change in the Loess Plateau Area of Shaanxi based on the Standardized Precipitation Index during 1971–2010 [J]. Journal of Desert Research, 2013, **33**(5):1560–1567]
- [24] 张顺谦,卿清涛,侯美亭,等. 基于温度植被干旱指数的四川伏旱遥感监测与影响评估[J]. 农业工程学报,2007,**23**(9): 141–146, 294. [ZHANG Shunqian, QING Qingtao, HOU Meiting, et al. Remote sensing and impact estimation for Sichuan hot-drought based on temperature vegetation dryness index [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, **23**(9): 141–146, 294]

## Spatiotemporal Dynamic Analysis of Soil Drought from 2007 to 2016 in Sichuan Province

CHEN Ailin<sup>1</sup>, DAI Xiaoi<sup>1\*</sup>, ZHANG Shiqi<sup>1</sup>, ZHOU Xuan<sup>2</sup>

(1. School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. School of Information and Software Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** For Sichuan, a major agricultural province in China, drought is the most important factor leading to the cutback in its agricultural production. It is crucial to carry out dynamic monitoring of soil drought, improve the timeliness of the monitoring, and enhance its visualization of soil drought space in Sichuan province through RS and GIS are in urgent need. Based on quarterly MODIS data from 2007 to 2016 and monthly precipitation data of 40 Meteorological Stations from 1961 to 2011, the distribution of drought levels in Sichuan province was calculated by Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI). Together with Standardized Precipitation Index (SPI), the correlation analysis was carried out. Through linear regression, inverse distance weighted interpolation, and GIS spatial analysis model reconstruction, the spatiotemporal variation of soil drought in Sichuan from 2007 to 2016 was analyzed and micro-variations about drought distribution of each period were shown. The results showed: (1) On monthly time scale, SPI-1 and TVDI presented a moderate to strong negative correlation, which indicated that the smaller TVDI value and the greater SPI value, the lesser drought degree. The verification result showed that TVDI could well reflect the spatial distribution status of drought in Sichuan. (2) On quarterly time scale, drought of each region in different seasons showed an uneven distribution. In view of space, the most drought prone areas concentrated in the Sichuan Basin and the southern part of Panxi. In view of time, in spring, soil drought variation presented a worsen-still-ameliorate trend in the Sichuan Basin; in summer, it presented worsen-ameliorate-worsen trend; in autumn, it presented a worsen-ameliorate-still trend; in winter, the change was not obvious. The result would provide support for a better irrigation, and help reduce disaster risks in Sichuan province.

**Key words:** Sichuan province; Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI); Standardized Precipitation Index (SPI); GIS