

# 综合考虑植被、温度和降水的四川省月尺度 伏旱遥感监测

卢晓宁<sup>1</sup>, 张静怡<sup>1</sup>, 王玲玲<sup>2</sup>, 孟成真<sup>1</sup>, 曾德裕<sup>1</sup>

(1. 成都信息工程大学资源环境学院, 成都 610225; 2. 自贡市气象局, 四川 自贡 643000)

**摘要:** 基于四川农业大省的重要性、伏旱监测的必要性、复杂地貌背景区实测气象站点的有限性以及多云雾天气下高频伏旱遥感监测的困难性, 综合降水(*TRM*)、植被(*VCI*)和地表热力状况(*TCI*)在旱情发生发展中的作用及体现, 构建基于三者加权的伏旱遥感监测模型, 并完成了2000—2015年7—8月四川省月尺度伏旱监测, 从伏旱多年平均状态、演变趋势、频率三方面分析了四川省月尺度伏旱的时空演变规律。结果表明: 1) *SDCI*(归一化旱情综合指数) $=0.25 \times VCI + 0.5 \times TRM + 0.25 \times TCI$ 模型是最适用于四川省的月尺度伏旱监测模型。该模型体现了在伏旱监测过程中考虑并突出降水的重要性。2) 四川省7月平均旱情强度较强, 8月旱情强度整体上有所减弱; 各地貌类型区7、8月旱情强度则表现为川东盆地旱情强度最强, 高原与盆地过渡区次之, 川西高原最弱。3) 四川省整体上7月伏旱呈减缓变化, 8月旱情呈加重变化。川东盆地7月伏旱以加重变化为主, 8月则为减缓变化; 高原与盆地过渡区及川西高原7月伏旱以减缓变化为主, 8月多表现为加重变化。4) 四川省不同地貌背景区伏旱频率分布特征表现为川东盆地历年旱情发生频率最高, 其次是高原与盆地过渡区、川西高原。川东盆地和高原与盆地过渡区以中度干旱较为频发, 川西高原则多为轻度干旱。

**关键词:** 伏旱; 四川省; 遥感监测; 地貌区划

**中图分类号:** P426.616; TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2017)07-1145-13

干旱作为全球性灾害, 对我国影响严重<sup>[1]</sup>, 旱情造成的粮食损失占全国粮食总损失的50%<sup>[2]</sup>。伏旱期(7—8月)正值作物生长的关键时期, 对农业生产有更为重大的影响。胡豪然等<sup>[3]</sup>预计, 未来夏季极端高温伏旱造成的危害将更加严重。因此, 非常有必要加强对伏旱的监测, 尤其对于四川这一农业大省, 具有十分重要的现实意义。

随着遥感技术的快速发展, 利用遥感技术进行干旱监测已得到广泛应用<sup>[4-6]</sup>, 也发展出众多的监测指数与模型<sup>[7-9]</sup>。但国内干旱遥感监测研究多集中于平原地区<sup>[5-6]</sup>, 针对西南地区<sup>[7]</sup>尤其是四川省这一多云雾的复杂地貌背景区的研究相对较少。然而四川旱灾频发且范围广, 持续时间长, 灾情重<sup>[10]</sup>, 因此迫切需要加强对四川省的伏旱监测。而在进行旱情监测时选取的指标更多考虑植被和地表温度两方面<sup>[8-9]</sup>, 考虑降水指标的研究较少。而干旱程度随降水持续偏少渐进发展, 并随降水的发生而相应缓解, 这体现了降水对干旱的累积效应<sup>[11]</sup>, 因此在进行旱情监测时需要考虑并突出降水的作用。同时受多云雾天气影响以及气象站点少的客观条件限制, 都使得实时或瞬时的旱情遥感监测在四川省应用

收稿日期: 2016-06-22; 修订日期: 2016-11-01。

**项目基金:** 国家自然科学基金(41401103); 四川省科技计划应用基础研究(2014JY0084)。[Foundation items: National Natural Science Foundation of China, No. 41401103; Sichuan Province Science and Technology Plan Applied Basic Research, No. 2014JY0084.]

**第一作者简介:** 卢晓宁(1980—), 女, 汉族, 博士, 副教授, 主要从事资源环境遥感及水文小波分析方面研究。E-mail: lxn@cuit.edu.cn

受到限制<sup>[12]</sup>。此外,基于整个生长季的旱情监测是未来旱情监测的研究趋势<sup>[13]</sup>,月尺度的旱情遥感监测能够很好地揭示一个生长季内干旱的平均状态,而对这种平均状态的把握和认识对于准确评估干旱对作物生长的影响、有针对性地规划区域农业生产都具有重要的指导意义。

因此,本研究从降水累积效应对旱情发生发展的驱动性角度出发,构建综合考虑植被、温度和降水的伏旱遥感监测模型,并通过确定三者的最优权重组合来构建归一化旱情综合指数(Scaled Drought Condition Index, *SDCI*),将模型结果与实际旱情进行比较,以验证所选模型的有效性,实现对四川这一复杂地貌背景区月尺度的伏旱遥感监测,探讨四川省伏旱的时空特征及规律,为四川省不同地貌背景区伏旱的防治提供更有针对性、更有效的方法。

## 1 研究区概况

四川省地处长江上游,介于 $97^{\circ}21' \sim 108^{\circ}31'E$ 和 $26^{\circ}03' \sim 34^{\circ}19'N$ 之间。区域地貌复杂多样,西高东低。西部为高原、山地,海拔多在3 000 m以上;东部为盆地、丘陵,海拔多在500~2 000 m之间。四川盆地受季风活动以及气候垂直变化大的影响,虽然年均降水量充足,但是由于东西部气候差异明显,降水时空分布极不均匀。四川伏旱期为7—8月,持续时间一般为20~40 d,严重危害农作物生长发育。

## 2 数据来源及处理

### 2.1 数据来源

#### 1) 遥感数据

植被作为旱情最直观的外在表征,常用于表示作物受旱程度。故研究选用美国国家航空航天局NASA (<http://www.nasa.gov/>)提供的空间分辨率为250 m的16 d合成的MOD13Q1归一化植被指数(NDVI)数据。张峰等<sup>[14]</sup>研究发现川渝地区植被指数对旱情的揭示具有16 d左右的滞后期,因此根据传感器获取数据时间,将时间序列选取为2000—2015年7月12日—9月9日,相对于同期的温度和降水数据在时间上延后了12 d,这样的时间选取能够较好地反映12 d前的旱情,共计64期,256景。

地表温度的升高是干旱发生的最初指示器,体现出植被蒸腾和地表蒸散的强烈程度,常用于干旱监测。本研究选用NASA逐日的、空间分辨率为1 000 m的MOD11A2地表温度(LST)数据,时间序列为2000—2015年7月1日—8月29日,共计128期,512景。

降水作为土壤最直接的水源,成为旱情发生和发展最主要的驱动力,对旱情的影响具有累积效应,而大多遥感监测模型都没有考虑这一要素。本研究则将其考虑在内并突出其作用。选用的数据是NASA2000—2015年7月1日—8月31日TRMM3B42降水数据,时间分辨率为3 h,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

四川差异显著的地形地貌,使得植被的垂直地带性表现突出,造成相同的水热条件下不同植被类型表现出不同的干旱特征,因此本研究还选用空间分辨率为90 m的数字高程数据(DEM),进行基于四川月尺度旱情的地貌背景区划,为后续不同地貌背景区的旱情分级奠定基础。

#### 2) 验证数据

综合考虑植被、温度和降水的遥感监测指数模型, 其通过植被、温度和降水三方面的加权和来体现旱情, 用于确定各因子权重的实测数据是2000—2015年7月1日—8月31日四川省42个气象站点的日降水量和日平均气温数据 (<http://data.cma.cn/>)。

用于模型精度验证的数据是2000—2015年7月1日—8月31日四川省56个农业气象观测站获取的实测土壤表层10 cm和20 cm相对湿度数据 (<http://data.cma.cn/>)。气象站点和农业气象观测站点分布如图1所示。

## 2.2 数据处理

对遥感数据进行镶嵌、裁剪和投影变换等基本处理后, 再进行数据的时空分辨率一致性处理以及不同地貌类型的划分。

### 2.2.1 多源数据的时间分辨率一致性处理

由于NDVI和LST数据的时间分辨率不一致, 且四川多云雾, 故需进行合成滤云的时间分辨率一致性处理<sup>[13]</sup>。对NDVI、LST数据进行32 d的平均值合成处理, 这样能体现各指标在区域月尺度上的一种平均状态。对TRMM降水数据则进行每3 h的累加, 累加时长为32 d, 这样能体现出降水的累积效应。最终得到2000—2015年7—8月每32 d的NDVI、LST和累积降水数据。

### 2.2.2 多源数据的空间分辨率一致性处理

为实现空间分辨率的一致性, 采用样条式重采样法得到空间分辨率为1 000 m的NDVI数据。应用反距离权重法得到相同空间分辨率的降水数据。

### 2.2.3 地貌类型划分

四川地势地貌复杂多样, 海拔高度变差大, 不同海拔高度地貌区旱情背景和表现都差异显著, 因此基于DEM数据按照海拔高度( $h$ )划分为3个地貌类型区, 分别为 $h > 2\,500$  m的川西高原区,  $1\,000\text{ m} \leq h \leq 2\,500$  m的高原与盆地过渡区,  $h < 1\,000$  m的川东盆地区。

## 3 综合考虑植被、温度和降水的旱情遥感监测模型的构建与验证

当植被受水分胁迫时, 植被绿度降低或者覆盖度下降, 表现为NDVI明显减小, 因此, 其可用于监测土壤湿度, 但其监测结果会表现出一定的滞后性<sup>[15-16]</sup>; 应用地表温度进行干旱监测虽然时效性好<sup>[17]</sup>, 但在植被长势较差或作物收播期, 会受到土壤背景温度的严重干扰<sup>[18]</sup>; 降水是导致干旱发生的内因, 其对干旱具有累积效应<sup>[11]</sup>。因此, 本研究从植被、温度和降水三方面, 通过对3个因子进行线性加权, 构建综合植被、温度和降水的伏旱遥感监测模型, 各因子权重的确定通过与气象干旱监测常用的、且适应于不同时间尺度、不同区域的降水标准化Z指数<sup>[19]</sup>的相关分析来实现。降水标准化Z指数的定义为假设研究时段的降水量服从Person-III型分布, 通过对概率密度函数Person-III型分布正态

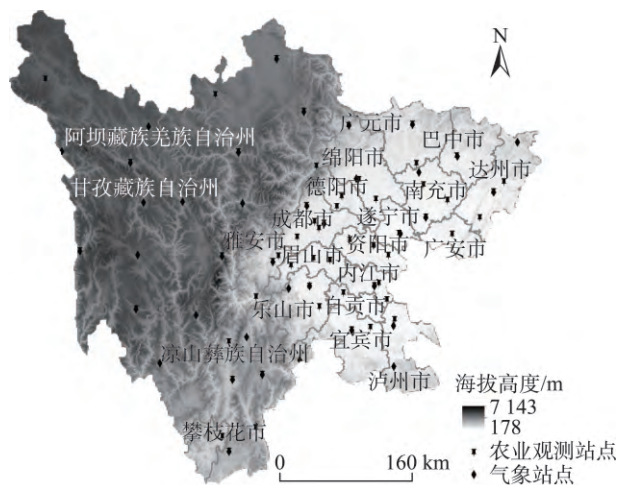


图1 四川省气象站点与农业气象观测站分布

Fig. 1 Distribution of meteorological and agrometeorological stations in Sichuan Province

化处理,可将时段降水量转换为以 $Z$ 为变量的标准正态分布,从而消除研究时段降水均值不同的影响<sup>[20]</sup>。最后将模型结果与土壤墒情数据进行验证,最终得到一个能够很好地应用于四川省的伏旱遥感监测模型,从而更好地提高区域伏旱遥感监测的有效性。

### 3.1 各因子的标准化处理

因旱情模型各因子量纲不一致,故依据各因子与旱情的关系,对植被指数和降水采用最小值归一化法处理,地表温度则采用最大值归一化法处理,分别记归一化处理后的各因子为 $VCI$ (植被)、 $TRM$ (降水)和 $TCI$ (温度),归一化处理后各因子的值越小,则旱情越严重。

### 3.2 月尺度旱情遥感监测模型的构建

基于单一植被状态指数和地表温度条件指数的旱情监测结果在时空上存在一定的差异,Rhee等<sup>[21]</sup>研究发现,利用 $TCI$ 、 $TRM$ 和 $VCI$ 进行线性组合构建的旱情遥感监测指数模型 $SDCI$ ,可以综合植被状态指数( $VCI$ )和温度状态指数( $TCI$ )在旱情监测方面的贡献并突出降水指数( $TRM$ )在伏旱监测中的优势,基于此指标可以很好地监测伏旱。

月尺度旱情遥感监测模型是通过对植被、温度和降水3个因子的加权和来实现,记为 $SDCI$ ,具体表达式如下:

$$SDCI = w_1 \times TCI + w_2 \times TRM + w_3 \times VCI \quad (1)$$

式中: $w_1$ 、 $w_2$ 和 $w_3$ 分别为 $TCI$ 、 $TRM$ 和 $VCI$ 的权重系数,且 $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ 。 $TCI$ 、 $TRM$ 和 $VCI$ 数值越小,越容易发生干旱; $SDCI$ 值越小,则旱情越严重。

考虑到植被对旱情监测存在一定的滞后性,温度和降水时效性相对较高,综合各参数指标监测特点和前人经验<sup>[21]</sup>,并将遥感旱情指数与四川省历史旱情资料进行定性对比,应用经验方法拟定 $CI_1$ 、 $CI_2$ 和 $CI_3$ 、 $CI_4$ 为4种不同权重组合的 $SDCI$ 旱情监测模型,这4种权重组合基本可以在一定程度上比较充分地代表了气温、降水和植被对旱情影响的贡献,各模型公式如下:

$$\begin{aligned} CI_1 &= \frac{1}{3}TCI + \frac{1}{3}TRM + \frac{1}{3}VCI & CI_2 &= \frac{1}{4}TCI + \frac{1}{2}TRM + \frac{1}{4}VCI \\ CI_3 &= \frac{2}{5}TCI + \frac{2}{5}TRM + \frac{1}{5}VCI & CI_4 &= \frac{1}{2}TCI + \frac{1}{2}VCI \end{aligned} \quad (2)$$

式中的 $CI_4$ 是传统旱情监测中常用的只考虑植被和气温的遥感监测模型。

### 3.3 最优权重组合的月尺度伏旱遥感监测模型的确定

本文利用实测站点的降水数据,计算降水标准化 $Z$ 指数,其具体计算参考文献[22]。由于大多数旱情的发生是降水极度缺乏造成的,因此本文利用构建的 $SDCI$ 伏旱遥感监测指数模型,将各权重组合的模型结果与标准化降水 $Z$ 指数进行相关分析,选取相关性最好的指数模型,发展可在区域尺度上应用的月尺度伏旱监测模型。因区域站点数量有限,故统计各模型最大相关系数出现的频率及其年际平均的相关系数大小,以最大相关系数出现频率最高且年均相关系数最大的模型作为最适用于四川的伏旱遥感监测模型。研究发现,以 $CI_2$ 权重组合模型与标准化降水 $Z$ 指数之间最大相关系数出现的频率最高(0.62),其年际平均的相关系数值最大(0.237 8),其次依次为 $CI_3$ (0.191 9)、 $CI_1$ (0.184 9)和 $CI_4$ (0.041)。这足以说明进行伏旱遥感监测时,将降水考虑在内并且突出降水的累积效应的重要性。因此本文初步确定 $CI_2$ 这一权重组合的旱情监测模型是最适于四川省的月尺度伏旱遥感监测 $SDCI$ 模型。



### 3.4 综合月尺度伏旱遥感监测模型的验证

用于模型验证的数据是2000—2015年同期的土壤表层10 cm和20 cm的相对湿度实测数据, 因为有效的实测站点数据有限, 这里亦提取实测站点对应的各权重组合模型的计算结果与土壤表层10 cm和20 cm相对湿度数据进行相关分析, 亦统计各模型最大相关系数出现的频率以及年际平均的相关系数大小。结果发现, 均以 $SDCI$ 模型与土壤表层10 cm和20 cm相对湿度之间最大相关系数出现的频率最高, 其值分别达到0.36和0.42, 其年际平均的相关系数亦达到最大, 分别为0.27和0.31。 $CI_1$ 与10 cm、20 cm相对湿度的相关系数分别为0.25和0.27,  $CI_3$ 对应的相关系数为0.26和0.28,  $CI_4$ 对应的相关系数为0.15和0.14。因此, 这足以验证上述所确定的月尺度伏旱遥感监测 $SDCI$ 模型就是适用于四川省的最优模型。该模型不仅能有效地应用于气象站点缺乏区域的月尺度伏旱监测, 且精度高于那些不考虑降水或考虑降水较少的模型, 这都足以说明在伏旱监测中考虑并突出降水累积效应对提高旱情监测精度的重要性。

## 4 四川省不同地貌背景区的旱情时空演变规律

### 4.1 四川省不同地貌背景区旱情等级划分及其空间分异

不同地貌背景区因水、热、土、气、生条件差异显著, 相同的伏旱监测结果往往对应着不同的干旱特征。因此, 结合区域实测土壤相对湿度数据以及历史旱情状况, 确定不同地貌背景区的旱情等级划分标准。

川东盆地区实测站点数量较多, 对该区域依据实测的土壤相对湿度数据进行干旱等级的划分<sup>[13]</sup>。高原与盆地过渡区和川西高原区因区域实测站点数量较少, 主要依赖历史旱情实况确定干旱等级。具体旱情等级划分标准如表1所示。最终得到四川省7、8月基于不同地貌背景区的不同伏旱等级多年平均状态的空间分布情况(图2、图3)。

四川省7月多年平均旱情强度较强, 且中度干旱表现突出, 面积高达

表1 不同地貌背景区旱情等级划分标准  
Table1 The drought grade division standard  
in different geomorphic areas

干旱等级	川东盆地区	高原与盆地过渡区	川西高原区
特大干旱	0.00~0.25	0.00~0.22	0.00~0.15
严重干旱	0.25~0.35	0.22~0.32	0.15~0.20
中度干旱	0.35~0.45	0.32~0.42	0.20~0.25
轻度干旱	0.45~0.55	0.42~0.52	0.25~0.30
无旱	0.55~1.00	0.52~1.00	0.30~1.00

177 134 km<sup>2</sup>, 到8月旱情整体减弱, 平均 $SDCI$ 减少了0.06, 中度干旱等级区面积亦减少了47 407 km<sup>2</sup>。但就各地貌背景区而言, 月尺度伏旱强度又具有较强的一致性, 均表现为川东盆地旱情强度最强, 高原与盆地过渡区次之, 川西高原最弱。这是因为川东盆地四周环山, 夏季焚风现象显著, 热量较高, 多年均温比高原与盆地过渡区及川西高原区偏高2~3 ℃, 多年平均降水偏少10 mm, 植被指数亦偏小0.1。具体分析7月伏旱发现, 不同伏旱等级分布具有明显的空间异质性, 表现为中度干旱多集中分布于川东盆地, 这也与王杰等<sup>[23]</sup>的研究结果相一致, 高原与盆地过渡区以轻度干旱为主, 川西高原则多表现为轻度干旱和无旱(图2)。川东盆地的中度干旱等级区面积达到107 798 km<sup>2</sup>, 占该地貌背景区的面积比例高达79%。地貌以平原、丘陵为主的川东盆地中部成都、宜宾一带有2%的区域呈严重干旱的状态, 这一结果与巫娜等<sup>[24]</sup>的研究结果一致。高原与盆地过渡区的轻度干旱等级区面积为60 429 km<sup>2</sup>, 占该地貌背景区的78%, 其次有19%的中度干

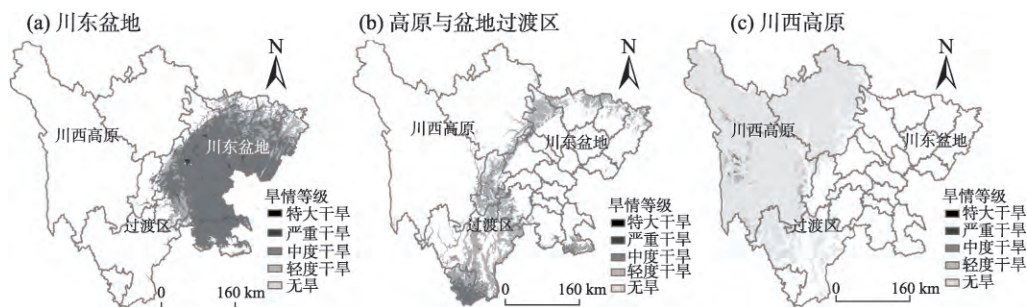


图2 四川省不同地貌背景区7月不同伏旱等级空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of different grade of drought in July under different geomorphic background

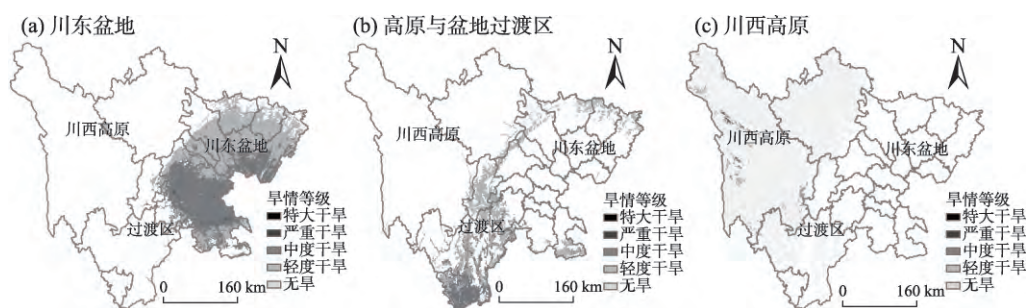


图3 四川省不同地貌背景区8月不同伏旱等级空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of different grade of drought in August under different geomorphic background

旱集中发生于攀西地区南部一带,这与王明田等<sup>[25]</sup>的研究结果相吻合。川西高原的轻度干旱等级区面积为172 484 km<sup>2</sup>,其所占面积比达到66%,主要分布于甘孜藏族自治州一带。该区域32%的无旱多集中于海拔3 000 m以上的阿坝藏族自治州,这也与王杰等<sup>[23]</sup>的研究结果相吻合。甘孜藏族自治州西南部受该时期西南型低涡频繁出现所带来的充足降水的影响<sup>[26]</sup>,使得区域以无旱居多。进入8月,川东盆地受西南型盆地低涡向东北偏移的影响<sup>[26]</sup>,区域降水的增多使得旱情强度整体上有所减弱,由7月的中度干旱占主导转变为8月的轻度干旱主导,该旱情等级区面积占到了56%,而中度干旱等级区的范围缩小至川东盆地南部眉山、内江和宜宾市一带(图3),面积减少了48 294 km<sup>2</sup>。高原与盆地过渡区旱情亦有所减弱,*SDCI*值增加了0.02,表现为该地貌类型区北部的无旱等级区面积有所增加,面积比由7月仅有的3%增加至8月的16%,但中度干旱等级区面积向北扩张了2 639 km<sup>2</sup>,不仅出现在攀枝花市一带,还影响到北边的凉山彝族自治州一带。川西高原则由于西南型低涡在8月的北移<sup>[26]</sup>,使得无旱区域向北萎缩,面积减小至17%,而轻度干旱区域范围有所扩大,面积增加至211 335 km<sup>2</sup>,所占比例高达81%。

#### 4.2 四川省不同地貌类型区伏旱趋势时空演变分析

本研究采用一元线性回归分析法,计算各像元*SDCI*随时间变化的回归斜率,记为*slope*,利用*slope*对旱情发展趋势进行分级。*slope*>0表明旱情有变轻的趋势;反之则旱情有加重趋势。对降水量、植被指数、地表温度数据亦采用此方法,求得其对应的*slope*。具体计算如下:

$$slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n ix_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (3)$$

式中: 变量  $i$  为 2000—2015 年的年序列号,  $x_i$  为第  $i$  年  $SDCI$  值。因为自然间断点法是基于数据中固有的自然分组, 对分类间隔加以识别, 可对相似值进行最恰当的分组, 并使各个组之间的差异最大化。故本研究对 7—8 月的伏旱发生的趋势强度依据  $slope$  大小应用自然间断点法进行分级, 确定为 5 个等级: 明显加重 ( $-2.1 \sim -0.7$ )、轻度加重 ( $-0.7 \sim -0.3$ )、基本不变 ( $-0.3 \sim 0.0$ )、轻度减缓 ( $0 \sim 0.3$ )、明显减缓 ( $0.3 \sim 2.0$ ) (图 4), 可直观反映出 2000—2015 年 16 a 间四川省 7、8 月月尺度伏旱的年际空间变化趋势。

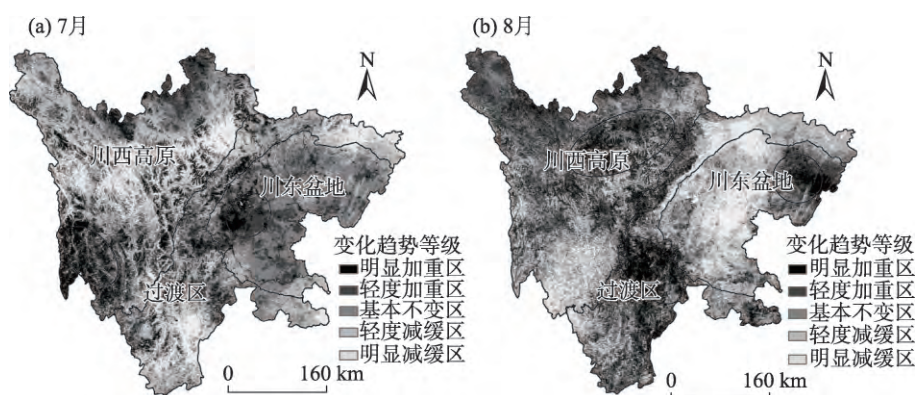


图4 四川省伏旱演变趋势

Fig. 4 Drought evolution trend of Sichuan Province

四川省伏旱演变趋势表现为 7 月旱情变化趋势以减缓变化为主, 而 8 月则呈加重趋势, 但这种演变趋势呈现出因地貌背景区的明显差异, 具体表现为川东盆地 7 月旱情以加重变化趋势占主导, 集中于川东盆地中部的成都、眉山一带, 8 月旱情则主要表现为减缓变化趋势, 旱情加重区则萎缩至川东盆地东部的达州、南充一带; 高原与盆地过渡区及川西高原 7 月旱情以减缓变化趋势为主, 8 月旱情多表现为加重变化趋势, 高原与盆地过渡区 8 月的旱情加重区呈向南部扩张的态势, 川西高原的旱情加重区则由该类型区的西南部转移至北部一带。

7 月, 川东盆地旱情加重变化趋势区面积比为 42% [图 4(a)], 其中旱情明显加重区面积达到 15 067 km<sup>2</sup>, 占到旱情加重区的 26%。该区域旱情明显加重是因为区域 7 月降水呈减少变化 ( $slope$  高达  $-1.17$ ), 并为降水量减少的高值中心 [图 5(a)], 与杜华明等<sup>[27]</sup>的研究结论相一致。在降水显著减少的背景下, 虽然温度呈下降变化, 但其  $slope$  值仅为  $-0.63$ , 不能逆转旱情, 使得区域旱情形势极为严峻。正是在这种干旱加重趋势的胁迫下, 植被状况亦恶化 ( $slope$  为  $-0.016$ ), 表现出比西部更严重的干旱趋势, 这一结论与王杰等<sup>[23]</sup>的研究结果一致。以旱情减缓变化趋势为主的高原与盆地过渡区, 其面积比为 41%, 而旱情加重区面积只有 21 743 km<sup>2</sup>, 仅占到 28%, 只集中于该地貌类型区的中部, 靠近川东盆地一带 [图 4(a)], 体现出旱情影响范围极广, 会波及其周边区域。川西高原旱情减缓变化趋势区的面积最大, 高达 104 861 km<sup>2</sup>, 所占面积比例达到 40%。这一结论与



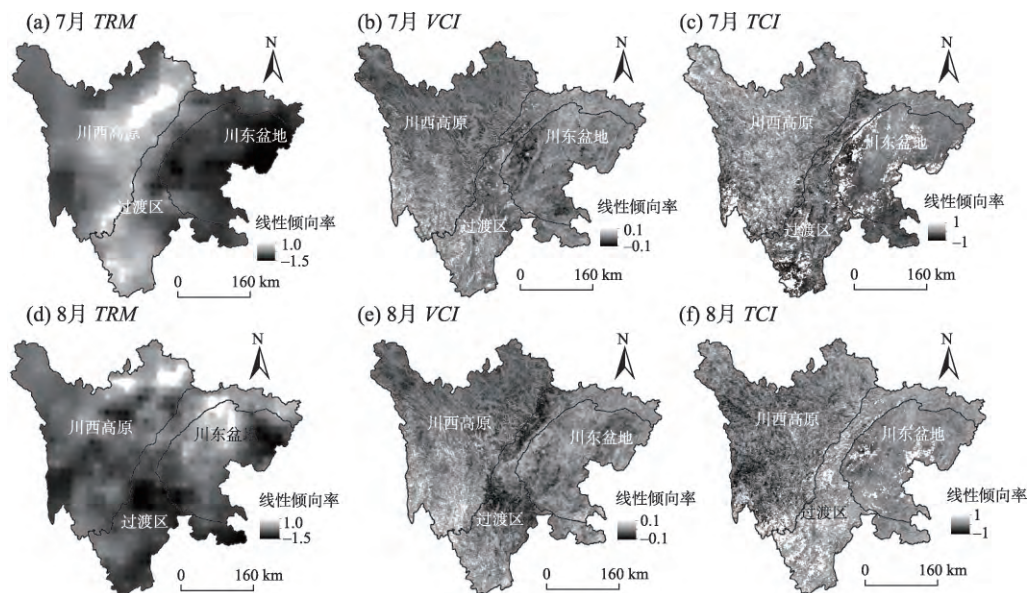


图5 四川省TRM、VCI、TCI演变趋势

Fig. 5 Evolution trend of precipitation, vegetation and surface thermal state in Sichuan Province

杜华明等<sup>[27]</sup>提出的1990年以来川西地区旱涝灾害表现为向偏涝趋势发展的结果是一致的。该类型区旱情呈加重变化趋势的区域主要集中于川西高原西南部山地一带[图4(a)],这是因为该区域多年平均温度升高( $slope$ 为0.52),多年平均降水呈减少变化趋势( $slope$ 为-0.41),导致植被状况呈现出恶化趋势( $slope$ 为-0.05)。这一地区旱情加重变化趋势的结果也与杜华明等<sup>[27]</sup>的研究相吻合。8月,川东盆地由于多年平均降水增多( $slope$ 为0.46),使得旱情有所缓解,表现为减缓变化趋势为主,面积达到58 434 km<sup>2</sup>,占43%,旱情加重区向东北萎缩至东部达州一带[图4(b)],面积仅为37 170 km<sup>2</sup>,该区域多年平均降水显著减少( $slope$ 为-0.95),以-0.52为变化梯度的地表温度的降低不可能逆转旱情,因此植被仍呈现出萎缩趋势( $slope$ 为-0.05)。而高原与盆地过渡区及川西高原区由于多年平均降水减少( $slope$ 分别为-1.01、-0.69),多年平均地表温度仅有小幅降低( $slope$ 分别为-0.02、-0.25),导致两个类型区均以旱情加重变化趋势占主导,该变化类型区面积分别达到27 537、114 193 km<sup>2</sup>,面积占比分别为35%、44%。高原与盆地过渡区的旱情加重区多集中于该区的中部及南部一带。川西高原旱情加重区则转移到阿坝北部丘状高原一带[图4(b)]。

#### 4.3 四川省不同地貌背景区的旱情频率时空特征分析

基于历年各期SDCI值,以及不同地貌背景区旱情等级的划分标准,统计各像元7、8月伏旱发生的频率,对两个月求平均得到伏旱的平均发生频率(图6),进一步基于不同地貌背景区统计得到各背景区7、8月不同伏旱等级发生频率(表2)。

四川省7月整体上伏旱发生频率较高,达到0.65,进入8月伏旱发生频率整体降低,减少至0.60。这是因为7月在西南低涡形成初期,降水范围不大,降水强度也偏弱。而随着8月西南低涡的发展,降水范围也随之扩大,雨量也显著增大<sup>[26]</sup>,使得伏旱有所缓解。就各地貌背景区而言,川东盆地历年伏旱发生频率最高,其次是高原与盆地过渡



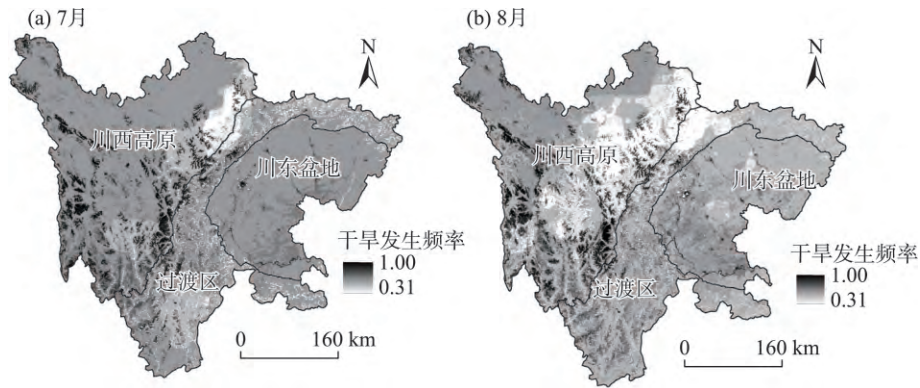


图6 四川省伏旱频率分布

Fig. 6 Distribution of summer drought frequency in Sichuan Province

区、川西高原，这一结果也与邓绍辉等<sup>[28]</sup>的研究结论完全一致。川东盆地和高原与盆地过渡区以中度伏旱较为频发，川西高原则多为轻度伏旱。7月川东盆地区历年旱情发生频率为0.95，且以中度干旱（0.45）为主（表2），这一旱情等级与王杰等<sup>[23]</sup>的研究结果相吻合。伏旱频发区在川东盆地东南部的宜宾、自贡、泸州一带[图6(a)]，该区域也与邓绍辉等<sup>[28]</sup>提出的盆地伏旱频发区相吻合。高原与盆地过渡区历年旱情发生频率为0.87，且旱情强度较弱，中度干旱发生频率（0.36）低于川东盆地。在该地貌背景区，旱情发生频率高的地方主要集中于川南高海拔山地区，以攀西一带较为突出[图6(a)]，其旱情发生频率达到0.93，这与王明田等<sup>[25]</sup>提出的伏旱频发区相吻合。川西高原区历年旱情平均发生频率为0.60，且轻度干旱最为频发（0.36）。区域的西部和西南部一带伏旱最为频发（0.72），这一发生地区也与王明田等<sup>[25]</sup>的研究结果基本一致。进入8月，7月初生位置位于盆地西南部的盆地涡向东北方向移动，雨区多分布在盆地涡中心及周围，尤其是盆地涡移动方向的东南方多为暴雨区<sup>[26]</sup>，这一现象使得川东盆地伏旱发生频率减少至0.87，其东北一带伏旱发生频率明显减少且以轻度干旱较为频发（0.35），伏旱频发区与7月较为一致；高原与盆地过渡区旱情发生频率减少至0.74，仍以中度干旱频率最高（0.35）；川西高原由于西南型低涡的北移<sup>[26]</sup>使得伏旱频率减少至0.59，其北部阿坝高原一带伏旱较7月有明显缓解，区域整体上仍以轻度干旱较为频发（0.37）。

表2 四川省不同地表背景区不同旱情等级发生频率

Table 2 The frequency of different level of drought under different geomorphic background						
干旱等级	川东盆地		高原与盆地过渡区		川西高原	
	7月	8月	7月	8月	7月	8月
特大干旱	0.03	0.11	0.02	0.04	0.01	0.003
严重干旱	0.25	0.16	0.18	0.12	0.05	0.02
中度干旱	0.45	0.25	0.36	0.35	0.18	0.20
轻度干旱	0.22	0.35	0.31	0.23	0.36	0.37

5 结论与讨论

5.1 结论

1) 本研究通过构建植被指数（VCI）、地表温度（TCI）和降水（TRM）的加权模型，并经与同期降水标准化Z指数的相关分析，确定最优权重组合的、适于四川的月尺度伏旱遥感监测模型 $SDCI=0.25\times VCI+0.5\times TRM+0.25\times TCI$ ，并通过了同期的土壤相对湿

度实测数据的验证,说明该模型应用四川旱情监测的有效性,也说明在进行旱情监测时,考虑并突出降水累积效应在旱情遥感监测中的重要性。

2) 7月四川省多年平均旱情强度较强,以中度干旱表现突出,8月旱情强度较7月有所减弱。7月,川东盆地旱情强度最强,高原与盆地过渡区次之,川西高原区最弱。进入8月,川东盆地受西南型盆地低涡向东北偏移的影响,区域降水的增多使得旱情强度有所减弱,中度干旱区面积有所减少。川西高原亦受西南型低涡北移影响,无旱区面积亦减少。

3) 四川省7月旱情以减缓变化为主,8月旱情则呈加重趋势。但各地貌背景区旱情演变的时空分布特征则表现为川东盆地7月旱情以加重变化趋势占主导,集中于川东盆地中部成都、眉山一带,8月旱情则为减缓变化趋势,旱情加重区萎缩至川东盆地东部的达州、南充一带;高原与盆地过渡区及川西高原7月旱情以减缓变化趋势为主,8月旱情多表现为加重变化趋势,高原与盆地过渡区8月的旱情加重区呈向南部扩张的态势,川西高原的旱情加重区则由该类型区的西南部转移至北部一带。

4) 四川省7月伏旱发生频率较高,而随着西南型低涡的发展,降水范围和雨量的增大都使得区域8月伏旱发生频率降低。川东盆地历年伏旱发生频率最高,且以中度伏旱最为频发;其次是高原与盆地过渡区,仍以中度伏旱较为频发,川西高原伏旱发生频率最低,多为轻度伏旱。

## 5.2 讨论

研究构建植被、温度和降水三者的旱情遥感监测模型,与标准降水Z指数进行相关分析并通过了与同期土壤墒情数据的验证,确定最优权重组合的四川省SDCI旱情监测模型。最后从月尺度伏旱多年平均状态、演变趋势、发生频率三个方面,对四川省伏旱进行了分析。但文章也存在以下不足:

1) 本研究SDCI旱情遥感监测指数模型权重的确定主要依据各参数指标监测特点和前人经验,虽然选取的4种权重组合基本可以在一定程度上比较充分地代表了气温、降水和植被对旱情影响的贡献,但是确定方法上过于主观;此外,在最优权重的确定和验证上,因为实测验数据不足,不能依据绝对相关系数的大小来确定和验证最优权重,而依据最大相关系数出现的频率和年际相关系数平均值的大小。以上两方面都会造成监测结果出现一定误差,使得可信度也有所下降。因此,未来在构建综合考虑植被、温度和降水的旱情遥感监测指数模型时,最优权重的确定和验证应该在增加更多有效实测站点数据的基础上,采用科学的优化算法,确定最优的权重组合,从而才能更好地提高模型监测结果的准确性和可信度。

2) 四川多云雾的现实状况使得瞬时的旱情遥感监测可行性很低,因此只能对数据进行去云的合成处理,这种合成处理的结果只能得到某一段时间内的平均状态,故本研究只探讨了四川省月尺度的旱情规律,而这并不能实现有效的实时旱情监测,因此未来可结合多源数据,提高四川这一多云雾、复杂地貌背景区的旱情监测时效性。

3) 本研究对四川省这一复杂地貌背景区的旱情等级进行划分时,等级阈值的确定是结合历史实况和实测数据,该方法偏重于定性层面,如何在实测数据缺乏的现实状况下尽可能提高旱情等级划分的精度和准确度是未来研究的一个方向。

4) 本研究在对旱情多年平均状态、演变趋势和发生频率的分析中,得到了一些有用的规律和结论,但就引起旱情异质性的原因仅做了现象描述和定性分析,未来可进一步

定量地揭示导致旱情时空异质性的驱动力, 为未来旱情的防御和治理提供更为可靠的理论依据。

### 参考文献(References):

- [1] 王鹏新, WAN Z M, 龚健雅, 等. 基于植物指数和土地表面温度的干旱监测模型 [J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 527-533. [WANG P X, WAN Z M, GONG J Y, et al. Advances in drought monitoring by using remotely sensed normalized difference vegetation index and land surface temperature products. *Advances in Earth Science*, 2003, 18(4): 527-533. ]
- [2] 胡豪然, 毛晓亮, 梁玲, 等. 近50年川渝地区夏季极端高温事件的时空演变特征 [J]. 高原山地气象研究, 2008, 28(3): 15-20. [HU H R, MAO X L, LIANG L, et al. Temporal and spatial variations of extreme high-temperature event of summer over Sichuan and Chongqing region in the last 50 years. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2008, 28(3): 15-20. ]
- [3] 胡豪然, 李跃清. 近50年来川渝地区夏季高温及严重干燥事件分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(7): 832-838. [HU H R, LI Y W. On high temperature and severe dry event of summer over Sichuan and Chongqing region in last 50 years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(7): 832-838. ]
- [4] 黄友听, 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]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 186-195. [HUANG Y X, LIU X G, SHEN Y L, et al. Advances in remote sensing derived agricultural drought monitoring indices and adaptability evaluation methods. *Transaction of the CSAE*, 2015, 31(16): 186-195. ]
- [5] 马彬, 张勃, 周丹, 等. 基于标准化降水蒸散指数的中国东部季风区干旱特征分布 [J]. 自然资源学报, 2016, 31(7): 1185-1197. [MA B, ZHANG B, ZHOU D, et al. Analysis of drought characteristics of the East China monsoon area based on standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(7): 1185-1197. ]
- [6] 樊高峰, 苗长明, 毛裕定. 干旱指标及其在浙江省干旱监测分析中的应用 [J]. 气象, 2006, 32(2): 70-74. [FAN G F, MIAO C M, MAO Y D. Application of drought indexes to dryness assessment in Zhejiang Province. *Meteorological Monthly*, 2006, 32(2): 70-74. ]
- [7] 陈学凯, 雷宏军, 徐建新, 等. 气候变化背景下贵州省农作物生长期干旱时空变化规律 [J]. 自然资源学报, 2015, 30(10): 1735-1749. [CHEN X K, LEI H J, XU J X, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of drought during crop growth period in Guizhou Province from climate change perspectives. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(10): 1735-1749. ]
- [8] 白力改, 燕琴, 张丽, 等. MODIS干旱指数对华北干旱的敏感性分析 [J]. 干旱区地理, 2012, 35(5): 708-716. [BAI L G, YAN Q, ZHANG L, et al. Sensitivity analysis of response of MODIS derived drought indices to drought in North China. *Arid Land Geography*, 2012, 35(5): 708-716. ]
- [9] 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. [QI S H, WANG C Y, NIU Z. Evaluating soil moisture status in China using the temperature/vegetation dryness index (TVDI). *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(5): 420-427. ]
- [10] 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): 46-51. [WANG X, CHEN D D, LI J J. Application of temperature-vegetation dryness index to monitor drought in Sichuan Basin based on the MODIS data. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2015, 35(2): 46-51. ]
- [11] 王春林, 陈慧华, 唐力生, 等. 基于前期降水指数的气象干旱指标及其应用 [J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(3): 157-163. [WANG C L, CHEN H H, TANG L S, et al. A daily meteorological drought indicator based on standardized antecedent precipitation index and its spatial-temporal variation. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2012, 8(3): 157-163. ]
- [12] 张顺谦, 卿清涛, 侯美亭, 等. 基于温度植被干旱指数的四川旱情遥感监测与影响评估 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 141-146. [ZHANG S Q, QING Q T, HOU M T, et al. Remote sensing and impact estimation for Sichuan hot-drought based on temperature vegetation dryness index. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(9): 141-146. ]
- [13] GHULAM A, QIN Q, ZHAN Z. Designing of the perpendicular drought index [J]. *Environmental Geology*, 2007, 52(6): 1045-1052.
- [14] 张峰. 川渝地区农业气象干旱风险区划与损失评估研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 1-152. [ZHANG F.



- Regionalization of Agricultural Meteorological Drought Risk and Loss Evaluation in Sichuan- Chongqing Area. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 1-152. ]
- [15] 杨绍镠, 闫娜娜, 吴炳方. 农业干旱遥感监测研究进展 [J]. 遥感信息, 2010(1): 103-109. [YANG S E, YAN N N, WU B F. Advances in agricultural drought monitoring by remote sensing. Remote Sensing Information, 2010(1): 103-109. ]
- [16] 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(23): 213-224.
- [17] GOETZ S J. Multisensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site [J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(15): 71-94.
- [18] MORAN M S, CLARKE T R, INOUE Y. 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.
- [19] 鞠笑生, 杨贤为, 陈丽娟, 等. 我国单站旱涝指标确定和区域旱涝级别划分的研究 [J]. 应用气象学报, 1997, 8(1): 26-33. [JU X S, YANG X W, CHEN L J, et al. Research on determination of station indexes and division of regional flood drought grades in China. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1997, 8(1): 26-33. ]
- [20] 袁文平, 周广胜. 标准化降水指标与Z指数在我国应用的对比分析 [J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 523-529. [YUAN W P, ZHOU G S. Comparison between standardized precipitation index and Z-index in China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2004, 28(4): 523-529. ]
- [21] RHEE J, IM J, CARBONE G J. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114: 2875-2887.
- [22] 王帅兵, 李常斌, 杨林山, 等. 基于标准化降水指数与Z指数的洮河流域干旱趋势分析 [J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 565-572. [WANG S B, LI C B, YANG L S, et al. Drought trend analysis based on standardized precipitation index and the Z index in the Tao River Basin. Arid Zone Research, 2015, 32(3): 565-572. ]
- [23] 王杰, 倪长健, 姚鹏, 等. 近30年四川省夏季农业干旱危险性空间分布特征分析 [J]. 自然灾害学报, 2013, 22(5): 247-253. [WANG J, NI C J, YAO P, et al. Analysis of spatial distribution characteristics of summer agricultural drought hazard in Sichuan Province during recent 30 years. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(5): 247-253. ]
- [24] 巫娜, 罗凝谊, 许勇. 四川盆地干旱灾害统计特征 [J]. 气象科技, 2014, 42(2): 309-313. [WU N, LUO N Y, XU Y. Statistical characteristics of drought disasters in Sichuan Basin. Meteorological Science and Technology, 2014, 42(2): 309-313. ]
- [25] 王明田, 王翔, 黄晚华, 等. 基于相对湿度指数的西南地区季节性干旱时空发布特征 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 85-92. [WANG M T, WANG X, HUANG W H, et al. Temporal and spatial distribution of seasonal drought in southwest of China based on relative moisture index. Transactions of the CSAE, 2012, 28(19): 85-92. ]
- [26] 李超, 李跃清, 蒋兴文. 四川盆地低涡的月际变化及其日降水分布统计特征 [J]. 大气科学, 2015, 39(6): 1191-1203. [LI C, LI Y Q, JIANG X W. Statistical characteristics of the inter-monthly variation of the Sichuan Basin vortex and the distribution of daily precipitation. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(6): 1191-1203. ]
- [27] 杜华明, 延军平. 四川省气候变化特征与旱涝区域响应 [J]. 资源科学, 2013, 35(12): 2491-2500. [DU H M, YAN J P. Climatic change and drought-flood regional responses in Sichuan. Resources Science, 2013, 35(12): 2491-2500. ]
- [28] 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, 32(3): 125-132. [DENG S H, LUO X B. Features, prevention and remedy of droughts in Sichuan since 1949. Journal of Sichuan Normal University (Social Sciences Edition), 2005, 32(3): 125-132. ]

## Remote Sensing Monitoring of Summer Drought at Monthly-scale Considering Vegetation, Temperature and Precipitation in Sichuan Province

LU Xiao-ning<sup>1</sup>, ZHANG Jing-yi<sup>1</sup>, WANG Ling-ling<sup>2</sup>, MENG Cheng-zhen<sup>1</sup>, ZENG De-yu<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;

2. Zigong Meteorological Bureau, Zigong 643000, China)

**Abstract:** Considering the comprehensive role of precipitation (*TRM*), vegetation (*VCI*) and surface thermal state (*TCI*) in the occurrence and development of droughts, a drought monitoring model is constructed at monthly scale in Sichuan Province based on remote sensing data during 2000–2015. Furthermore, the condition, evolution trend and frequency of droughts in different morphological areas are discussed. The results show as follows: 1) The *SDCI* modes is the most applicable model for drought monitoring at month scale in mountain areas, which can be described as  $SDCI=0.25 \times VCI+0.5 \times TRM+0.25 \times TCI$ . This model embodies the importance of precipitation in drought monitoring. 2) In temporal scale, the intensities of droughts in July are the strongest, while those in August become weaker. In spatial scale, the intensities of droughts in East Sichuan Basin are the strongest in both July and August, then followed by those in the transition area between Plateau and Basin, while those in plateau area in west of Sichuan is the weakest. 3) In greatly, the summer drought in July becomes weaker while the summer drought in August becomes more severe. However, it shows spatial difference. The summer drought in east Sichuan Province becomes aggravated in July but weaker in August; while in plateau and basin transition zone and western Sichuan Plateau, the summer drought becomes weaker in July but aggravated in August. 4) The frequency of occurrence of droughts is the highest in the eastern Sichuan Basin, followed by the plateau and basin transition zone, and then the western Sichuan Plateau. Moderate droughts occurred frequently in eastern Sichuan Basin and Plateau and Basin transition zone, while mild droughts occurred frequently in the Western Sichuan Plateau.

**Key words:** drought; Sichuan Province; remote sensing monitoring; geomorphic regionalization