



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.04.013

潘妮, 卫仁娟, 詹存, 等. 干旱指数在四川省的适用性分析研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 71-78. PAN Ni, WEI Renjuan, ZHAN Cun, et al. Study about application analysis of drought index in Sichuan Province[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4): 71-78. (in Chinese)

## 干旱指数在四川省的适用性分析研究

潘妮<sup>1</sup>, 卫仁娟<sup>1,2</sup>, 詹存<sup>3</sup>, 梁川<sup>2</sup>, 徐正东<sup>1</sup>

(1. 四川水利职业技术学院, 成都 611230; 2. 四川大学 水利水电学院水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065; 3. 中国电建集团西北勘测设计院有限公司, 西安 710065)

**摘要:** 干旱灾害频发严重制约着四川省的农业发展, 为合理分析四川省干旱情况, 干旱指数的选择尤为重要。本文基于四川省 39 个气象站点 1960 年-2013 年的气象资料, 分别计算 1961 年、1994 年、2006 年和 2009 年-2010 年各站点相对湿度指数  $M$ 、气象干旱综合指数  $CI$ 、标准化降水指数  $SPI$  和标准化降水蒸散指数  $SPEI$ , 利用 Arcgis 反距离插值法进行空间插值, 并与中国气象灾害大典记录的四川省典型年干旱情况进行对比分析, 进而评价四种干旱指数在四川省的适用性。结果表明: 对于 1961 年夏旱,  $M$  指数和  $CI$  指数均表现出无旱或轻旱,  $SPI$  指数结果较实际情况偏小,  $SPEI$  指数监测出了干旱的重灾区, 效果在四个干旱指标中最好, 1994 年夏伏旱,  $M$  指数监测结果偏小;  $CI$  指数出现了空报, 对川东地区和川西高原的监测结果偏小,  $SPEI$  指数在达县、巴中一带结果偏小, 而  $SPI$  指数在成都、绵阳一带的结果偏小。2006 年伏旱,  $M$  指数监测结果偏小;  $CI$  指数比  $M$  指数效果稍好, 但结果仍然偏小;  $SPI$  指数和  $SPEI$  指数监测出的干旱特征与实际一致; 2009 年-2010 年的冬春连旱,  $SPEI$  指数效果最好,  $M$  指数次之,  $SPI$  指数效果最差。  $SPEI$  指数最能反映四川省典型干旱年干旱的空间分布特征。

**关键词:** 四川省; 干旱; 相对湿度指数  $M$ ; 标准化降水指数  $SPI$ ; 标准化降水蒸散指数  $SPEI$ ; 气象干旱综合指数  $CI$

**中图分类号:** S42      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-1683(2017)04-0071-08

### Study about application analysis of drought index in Sichuan Province

PAN Ni<sup>1</sup>, WEI Renjuan<sup>1,2</sup>, ZHAN Cun<sup>3</sup>, LIANG Chuan<sup>2</sup>, XU Zhengdong<sup>1</sup>

(1. Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chengdu 611231, China;

2. College of water resource and hydropower & State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China; 3. Northwest Eng. Co., Ltd., PowerChina, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Drought disaster was frequently occurred, which seriously restricted agricultural development of Sichuan Province. Selecting of drought index is very important in order to reasonably analyze drought situation of Sichuan Province. Based on daily meteorological data from 1960 to 2013 of 39 meteorological stations of Sichuan Province, Relative Humidity Index, Composite Index of Meteorological Drought, Standardized Precipitation Index and Standardized Precipitation Evapotranspiration Index were calculated in 1961, 1994, 2006 and 2009~2010. Inverse distance interpolation of Arcgis was used, and spatial distribution was obtained. Application of four drought indexes in Sichuan Province were evaluated which were compared with records of drought disaster in China's weather disaster. Results showed that: for summer drought in 1961, the moisture index  $M$  and comprehensive drought index  $CI$  showed no or slight drought,  $SPI$  index monitored results were smaller than the actual situation and  $SPEI$  index showed the hardest hit which is the best index for monitoring the drought. For the summer drought in summer,

收稿日期: 2016-10-11      修回日期: 2017-04-04      网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 国际自然科学基金(41271045); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB036401); 四川水利职业技术学院院级科研项目(KY2006-09; KY2006-20)

Funds: National Natural Science Foundation of China(41271045); National key Basic Research Development Plan(2013CB036401); Research Project of Sichuan Water Conservancy Vocational College(KY2006-09; KY2006-20)

作者简介: 潘妮(1983-), 女, 湖北汉川人, 讲师, 主要从事水资源开发及水环境保护方面的研究。E-mail: 137271395@qq.com

$M$  index monitoring results showed smaller,  $CI$  index showed vacancy and were smaller in Eastern Sichuan and Western Sichuan,  $SPEI$  index showed smaller in Bazhong and Daxian, and  $SPI$  index in Chengdu and Mianyang area; For drought in 2006,  $M$  index monitoring results were small, and  $CI$  index were a little better which were still smaller than actual situation, the monitoring results of  $SPI$  and  $SPEI$  were accordance with actual situation; For the 2009 to 2010 winter and spring drought,  $SPEI$  was the best index,  $M$  index followed and  $SPI$  index was the worst. In a word,  $SPEI$  was the best drought index reflecting the spatial distribution of drought in Sichuan Province.

**Key words:** Sichuan Province, drought; relative humidity index  $M$ ; composite index of meteorological drought; standardized precipitation index; standardized precipitation Evapotranspiration Index

由于全球气候的持续变暖, 极端气候事件频繁发生, 青藏高原周边地区气候异常现象出现频率增大, 其中干旱发生频率上升趋势尤为明显, 制约着经济社会的可持续发展, 影响了人类正常生产和生活<sup>[1-3]</sup>。在众多极端气候事件中, 干旱灾害以其持续时间长, 致灾范围广、发生频率大等特点被认为是最严重的自然灾害之一<sup>[4]</sup>。四川盆地地处青藏高原与长江中下游平原之间的过度区, 受复杂地形及大气环流季节转换的影响, 四川省干旱频繁发生, 严重破坏该农业大省的农业和经济发展。因此, 研究干旱对于四川省防旱减灾具有重要意义<sup>[5-6]</sup>。

干旱指标是描述干旱特征的量, 是定量研究干旱的基础。不同地区由于气象、水文和下垫面条件的不同造成了干旱成因的复杂性, 因此, 不同地区和不同特征的干旱情况难以用一种特定干旱指标描述, 即干旱指标具有不同时空尺度, 是在特定的区域和时间上建立的<sup>[7-8]</sup>。气象干旱指标是基于气象观测站不同时间尺度的数据, 利用数学、物理等方法进行干旱指标的计算, 用于监测特定地区特定时段由于气候异常而出现的干旱<sup>[9]</sup>。1965 年, Palmer 提出了干旱指数  $PDSI$ , 该指数具有明确的物理意义, 综合考虑了水分蒸发、径流、土壤前期降水量、水分转化以及水分供求对后期的影响, 然而, Palmer 干旱指数也有其局限性, 该指数是为处理半干燥和干湿气候区的干旱问题而设计的, 前提是降水是该地区唯一或者主要来源<sup>[10]</sup>。1980 年, Bhalme 和 Mooley 提出 Bhalme Mooley 干旱指标  $BMDI$ , 该指标以月尺度的降雨资料进行计算, 并且考虑了降水量的年内分配, 与采用年尺度降水量的指标相比较, 其计算更为合理<sup>[11-12]</sup>。湿润度指数  $M$  于 1992 年由 Humle 提出, 该指数为降水量和蒸发能力的比值<sup>[13]</sup>。姚玉璧, 王劲松等将干燥度定义为多年平均水面蒸发量和多年平均降水量的比值, 并在此基础上重新定义相对湿润指数  $M$ , 确定干旱等级, 广泛应用于西南

地区的干旱监测<sup>[14]</sup>。Mckee(1993, 1995) 定义的标准化降水指数  $SPI$  是实测降水量相对于降水概率分布函数的标准差。其计算简单, 对干旱较为敏感, 可以进行多尺度干旱分析, 广泛应用于美国干旱监测研究<sup>[15]</sup>。2010 年, Vicente Serrano 等引入潜在蒸散量, 在标准化降水指数  $SPI$  的基础上构建了基于气候变暖背景的标准化降水蒸散指数  $SPEI$ , 目前广泛应用于气候变化背景下的干旱分析中<sup>[16]</sup>。基于国外的干旱指标的研究, 张强等提出了综合干旱指数  $CI$ <sup>[2, 17]</sup>, 该指数综合考虑了相对湿润指数  $M$  和标准化降水指数  $SPI$  指数, 适用于中国研究, 已被广泛应用<sup>[18]</sup>。本文基于国内外应用最广泛的四种干旱指数: 标准化降水指数  $SPI$ 、相对湿润指数  $M$ 、气象干旱综合指数  $CI$  和标准化降水蒸散指数  $SPEI$ , 结合中国气象灾害大典和中国气象局干旱灾害数据集记载, 对比分析四川省干旱特征, 分别选择 1961、1994、2006、2009 年-2010 年等干旱灾害影响严重的年份作为干旱典型年, 利用典型年的降水和气温资料, 分析四种干旱指标在四川省的适用性, 并选取最适合四川省的干旱指标。

## 1 区域概况

四川省位于我国西南部, 地理位置为东经  $97^{\circ} 21' - 108^{\circ} 31'$ , 北纬  $26^{\circ} 03' - 34^{\circ} 19'$ , 地处长江上游, 地势呈西高东低走势, 地貌类型以平原、丘陵山地和高原为主, 东部为四川盆地, 盆周为山地, 西部是向青藏高原过度的川西高原<sup>[19]</sup>。四川省位于低纬度地区, 气候类型为亚热带气候, 气候上明显分为西、东两大部分, 受东南和西南季风的共同影响。区域分布上, 盆周山区降水相对丰沛, 多年平均降水量介于  $1\ 200 \sim 1\ 600\ \text{mm}$ , 川西北高原、盆地腹部、金沙江干热河谷降水量较低, 降水量介于  $300 \sim 800\ \text{mm}$  之间。年流出省境水量  $3\ 800$  多亿  $\text{m}^3$ <sup>[20]</sup>。四川省地理位置见图 1。

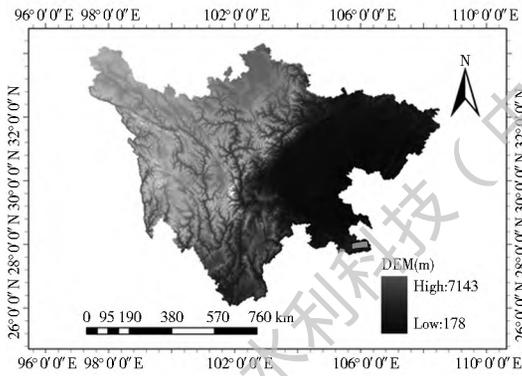


图1 四川省地理位置

Fig. 1 Figure of Geographic Location of Sichuan

## 2 资料与方法

### 2.1 资料

本文选取的资料包括:(1)四川省资料序列较为完整的39个气象站点1960年-2013年共54年的日气象资料,包括日平均气温( $T$ )、日平均最高气温( $T_{\max}$ )、日平均最低气温( $T_{\min}$ )、日照时数( $n$ )、日相对湿度( $RH$ )、日平均风速( $u$ )和日降水量( $P$ )等基本气象数据。该气象资料来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>),数据可靠,并对缺失数据进行了插补。(2)中国气象灾害大典(四川卷)<sup>[21]</sup>和中国气象局干旱灾害数据集,该数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。

### 2.2 方法

#### 2.2.1 相对湿润指数 $M$

相对湿润指数( $M$ )<sup>[21-22]</sup>是表示某地区一定时间段内降水量与实际蒸发量平衡的指标之一,是二者的比值。直观反映区域水分收支盈亏,大小反映干旱程度,其值越小,表明干旱越严重。相对湿润指数主要考虑两个因素,即降水量与可能蒸散量<sup>[13]</sup>。计算公式如下:

$$M = \frac{P - ET_0}{ET_0} \quad (1)$$

式中: $M$ 为相对湿润指数; $P$ 为某时段的降水量(mm); $ET_0$ 为某段时间内的实际蒸散量,用参考作物蒸散量(mm)替代。参考作物蒸散量 $ET_0$ 采用1998年FAO 56分册推荐的Penmar Monteith方程计算,公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

式中: $ET_0$ 为某时段内的参考作物蒸散量(mm); $\gamma$ 为干湿表常数(KPa/°C); $\Delta$ 为饱和水汽压-温度关系曲线的斜率(KPa/°C); $T$ 为空气平均气温(°C); $e_s$

为饱和水汽压(kPa); $e_a$ 为实际水汽压(kPa); $G$ 为第 $i$ 天的土壤热通量(MJ/(m<sup>2</sup>·d)); $R_n$ 为净辐射通量(MJ/(m<sup>2</sup>·d)); $u_2$ 为距地面2m高处的风速(m/s)。

相对湿度干旱等级划分<sup>[23]</sup>见表1。

表1 月尺度相对湿度气象干旱等级划分

Tab. 1 Meteorological Drought Hierarchies of Relative Humidity Degree in Monthly Scale

等级	类型	月尺度( $M$ )
1	无旱	$-0.4 < M$
2	轻旱	$-0.65 < M \leq -0.40$
3	中旱	$-0.80 < M \leq -0.65$
4	重旱	$-0.95 < M \leq -0.80$
5	特旱	$M \leq -0.95$

#### 2.2.2 标准化降水指数 $SPI$

标准化降水指数  $SPI$  是实测降水量相对于降水概率分布函数的标准偏差<sup>[24]</sup>。降水分布属于偏态分布,在分析中可采用  $\Gamma$  分布描述降水量的变化,然后将降水量正态标准化处理求得  $SPI$  值,基于标准化降水累积频率分布进行干旱等级的划分。若  $x$  是某时段的累积降水量,服从  $\Gamma$  分布的累积频率  $G(x)$  计算公式如下:

$$G(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx, x > 0 \quad (3)$$

式中: $x$ 为降水量样本; $\alpha, \beta$ 分别为 $\Gamma$ 分布函数的形状参数和尺度参数;

标准化降水指数  $SPI$  计算公式如下:

$$SPI = S \frac{t - (c_2 t + c_1) t + c_0}{((d_3 t + d_2) t + d_1) t + 1.0} \quad (4)$$

式中: $c_0, c_1, c_2$ 和 $d_1, d_2, d_3$ 为 $\Gamma$ 分布函数转化为累积频率的简化求解计算参数,取值如下:

$c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308, t =$

$\sqrt{\ln \frac{1}{G(x)^2}}$ ;  $S$ 为概率密度的正负系数,当 $G(x) > 0.5$ 时, $S = 1$ ;  $G(x) \leq 0.5$ 时, $S = -1$ 。 $SPI$ 适合于月尺度以上相对当地气候状况的干旱监测与评估。反映的干旱等级<sup>[25]</sup>见表2。

表2  $SPI$ 指数干旱等级划分

Tab. 2 Drought Hierarchies of  $SPI$  Index

等级	类型	$SPI$
1	无旱	$> -0.5$
2	轻旱	$(-1.0, -0.5]$
3	中旱	$(-1.5, -1.0]$
4	重旱	$(-2.0, -1.5]$
5	特旱	$\leq -2.0$

### 2.2.3 标准化降水蒸散指数 $SPEI$

标准化降水蒸散指数  $SPEI$ <sup>[16]</sup>, 是在  $SPI$  指数的基础上, 通过引入潜在蒸散而构建。月平均降水和气温作为标准化降水蒸散指数  $SPEI$  计算的输入, 计算得月降水与潜在蒸散的差值, 并对差值做标准化处理, 使其在不同地域间可以作比较, 其步骤参考文献[6]。

$SPEI$  划分的干旱等级<sup>[26]</sup>见表 3。

表 3 标准化降水蒸散指数干旱等级划分

Tab. 3 Drought Hierarchies of  $SPEI$  Index

等级	类型	$SPEI$
1	无旱	$> -0.5$
2	轻旱	$(-1.0, -0.5]$
3	中旱	$(-1.5, -1.0]$
4	重旱	$(-2.0, -1.5]$
5	特旱	$\leq -2.0$

### 2.2.4 气象干旱综合指数 $CI$

气象干旱综合指数  $CI$  是基于相对湿润指数  $M$  和标准化降水指数  $SPI$  建立起来的, 在《气象标准汇编》GB/T 20481-2006 中被推荐使用<sup>[2]</sup>。其优越性在于该指数同时考虑到了降水和蒸发因子, 具有较好的时空比较性。气象干旱综合指数的计算公式为:

$$CI = 0.4Z_{30} + 0.4Z_{90} + 0.8M_{30} \quad (5)$$

式中:  $Z_{30}$ 、 $Z_{90}$  分别为近 30 d 和近 90 d 标准化降水指数  $SPI$  值;  $M_{30}$  为近 30 d 相对湿润指数值; 0.4 分别为近 30 d 和近 90 d 平均标准化降水系数, 0.8 为近 30 d 平均相对湿润系数。综合气象干旱指数干旱等级划分表<sup>[27]</sup>见表 4。

表 4 综合气象干旱指数干旱等级划分

Tab. 4 Drought Hierarchies of  $CI$  Index

等级	类型	$CI$
1	无旱	$> -0.6$
2	轻旱	$(-1.2, -0.6]$
3	中旱	$(-1.8, -1.2]$
4	重旱	$(-2.4, -1.8]$
5	特旱	$\leq -2.4$

## 3 结果与分析

### 3.1 四川省典型年干旱分析

1961 年四川盆地发生严重夏旱, 主要分布在内江、成都、自贡区(市)、温江、绵阳、宜宾、达县、南充 5 专区大部, 雅安、乐山两专区的局部, 共 115 县(市), 早期长达 20~29 d 的有 42 个县(市), 30~39

d 的有 25 个县(市), 40~52 d 的有 24 个县<sup>[28]</sup>。

1994 年四川盆地发生大范围严重夏伏连旱, 夏旱主要分布在宜宾、自贡、遂宁、绵阳、德阳、内江、南充 7 地, 乐山、广元、泸州、广安、巴中、雅安、成都大部分地方以及万源。伏旱主要分布在自贡、绵阳、遂宁、广元、巴中、南充、达州和广元、德阳、内江、泸州及雅安、成都、宜宾、乐山等地方<sup>[14]</sup>。

2006 年四川盆地伏旱, 四川省东部被高温天气笼罩, 广安、遂宁、内江、泸州、资阳五市和宜宾、自贡、南充三市大部、达州市及三台、巴中共 45 县(市) 7 月 8 月日极端最高气温均突破 40℃, 特别是四川省东部和中部地区, 温度平均偏高 3~4℃<sup>[29]</sup>。

2009 年冬季-2010 年春季冬春连旱, 四川省有 13 个市(州)、71 个县、市(区) 受灾, 攀枝花、凉山州占受灾人数大部, 直接经济损失 13.8 亿元<sup>[30]</sup>。

### 3.2 典型年干旱指数对比分析结果

分别计算 1961 年、1994 年、2006 年、2009 年-2010 年的相对湿润指数  $M$ 、标准化降水指数  $SPI$ 、标准化降水蒸散指数  $SPEI$ 、和气象干旱综合指数  $CI$ , 并利用 Arcgis 进行空间插值作四种干旱指数在四川省各典型年的空间分布, 见图 2-图 5。

由图 2 可以看出, 整个四川, 相对湿润指数  $M$  和气象干旱综合指数  $CI$  均表现为无旱或者轻旱, 不能反映出典型年 1961 年 5 月-6 月四川省的夏旱特征, 特别是未能反映此次干旱灾害的重灾区(川东地区)的干旱特征。相对而言, 标准化降水指数  $SPI$  和标准化降水蒸散指数  $SPEI$  对 1961 年干旱的监测效果较好,  $SPI$  指数监测出了高坪、宜宾、内江等重旱区, 而对达县、绵阳和雅安部分地区的监测结果较实际情况小, 川西地区的甘孜、道孚等地以及川西南地区监测结果偏高。 $SPEI$  指数监测出了 1961 年四川省夏季干旱的重灾区内江、成都、自贡区(市)、温江、绵阳、宜宾、达县、南充等地, 同时也监测出了雅安、乐山东部地区的干旱特征, 效果在四个干旱指标中最好。

由图 3 可知,  $M$  指数的效果最差, 在川东地区的重旱区出现空报, 对整个四川省的干旱监测结果偏小, 未能反映出此次夏伏连旱的特征。 $CI$  指数效果次之差, 对雅安、成都等地出现了空报, 对川东地区和川西高原的监测结果偏小。 $SPI$  指数和  $SPEI$  指数对 1994 年夏伏连旱的监测效果最好, 均能够反映出此次干旱的特征, 相比较而言,  $SPEI$  指数在达县、巴中一带结果偏小, 而  $SPI$  指数在成都、绵阳一带的监测结果偏小。

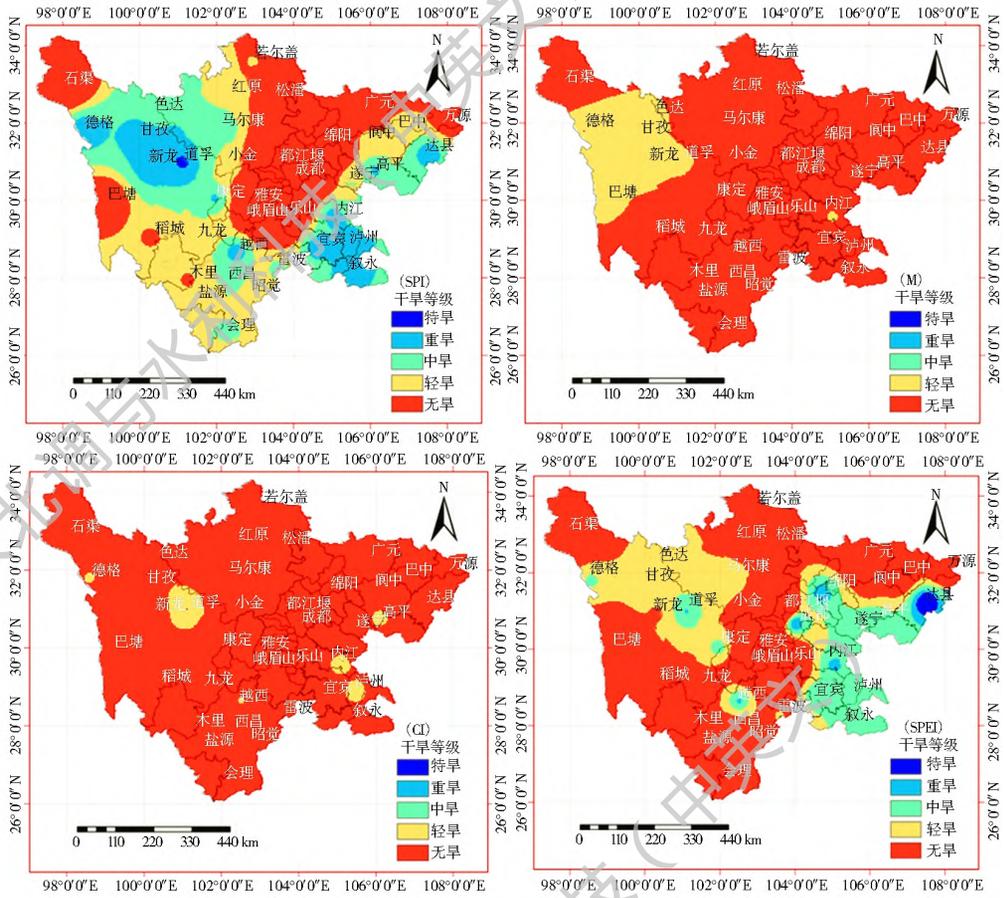


图2 1961年夏旱各干旱指数空间分布

Fig.2 Spatial Distribution of Drought Index of Summer Drought in 1961

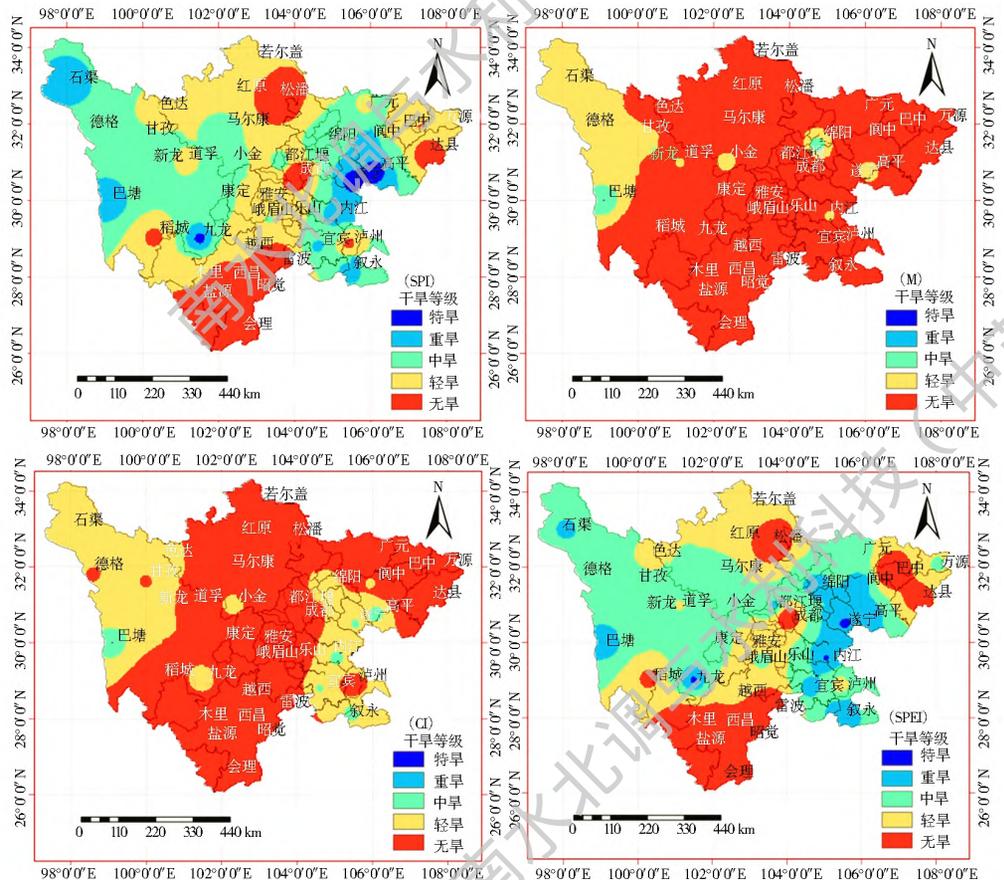


图3 1994年夏伏旱各干旱指数空间分布

Fig.3 Spatial Distribution of Drought Index of Summer Drought in 1994

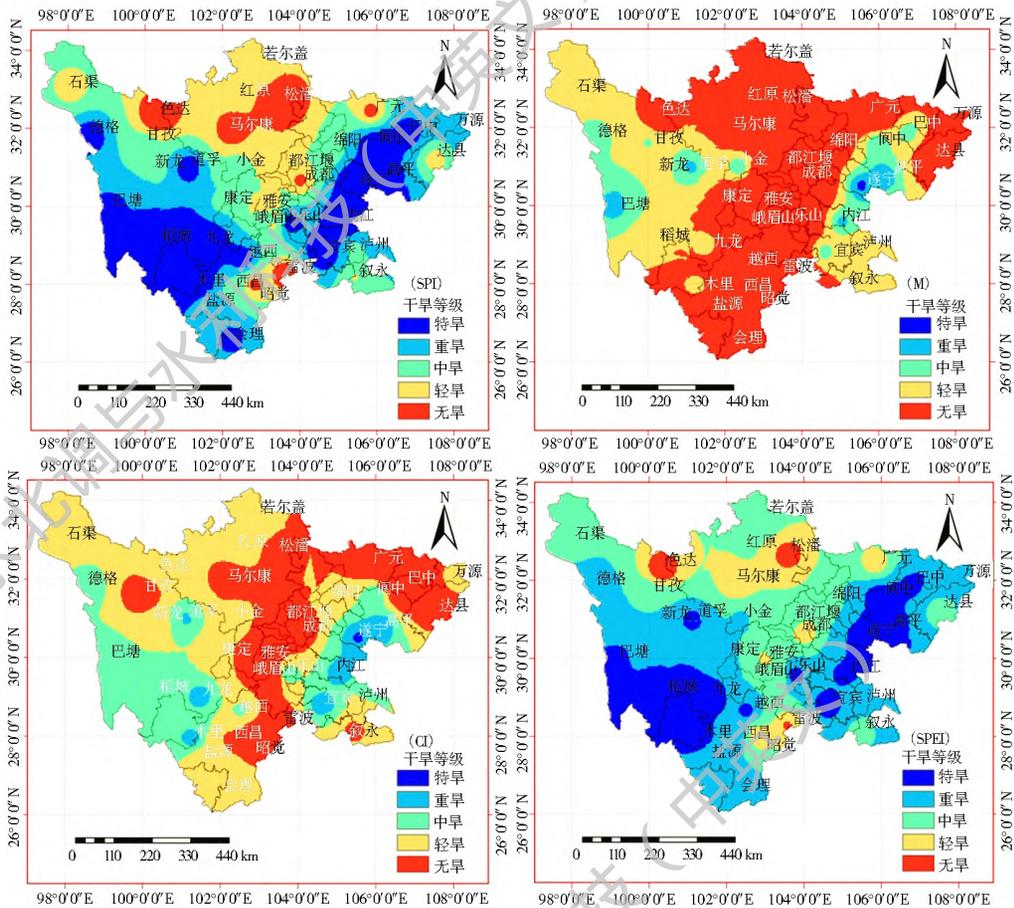


图 4 2006 年伏旱各干旱指数空间分布

Fig. 4 Spatial Distribution of Drought Index of Drought in 1961

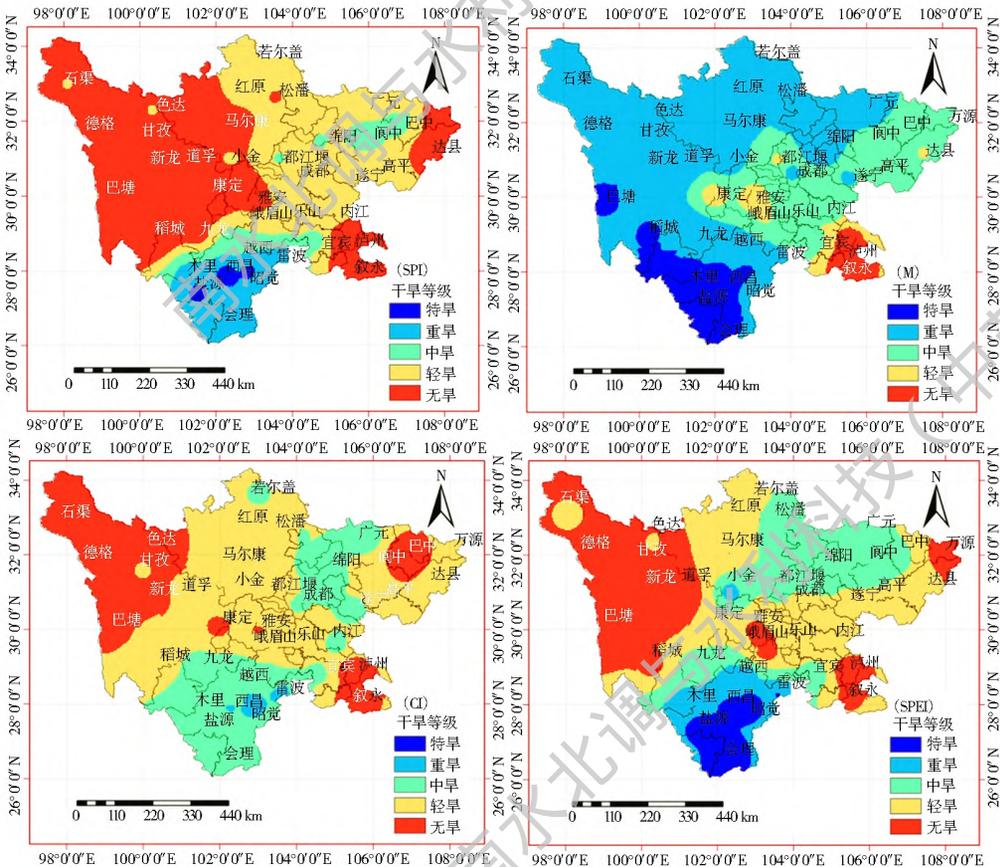


图 5 2009 年-2010 年冬春连旱各干旱指数监测结果空间分布

Fig. 5 Spatial Distribution of Drought Index of Winter-Spring Drought in 1961

由图4可以看出,  $M$  指数的效果最差, 对2006年伏旱监测结果整体偏小, 川中部分地区出现漏报, 川中丘陵区及川西南山地地区干旱强度监测结果偏小;  $CI$  指数比  $M$  指数效果稍好, 虽然监测出了川西南山地和川中丘陵区的干旱, 但监测出的干旱强度较实际情况仍然偏小;  $SPI$  指数和  $SPEI$  指数监测出的干旱特征与实际的干旱结果一致,  $SPI$  指数对达县、成都、叙永附近出现了轻报, 而对乐山的部分地区出现了重报。

2009年-2010年的冬春连旱主要发生在川南地区的攀枝花、凉山一带, 干旱等级达到重旱。由图5可以看出,  $SPEI$  指数效果最好,  $M$  指数次之,  $SPI$  指数效果最差。 $M$  指数和  $SPEI$  指数可以反映攀枝花和凉山一带的干旱特征。 $M$  指数对川西北高原和川中丘陵区形成重报,  $SPI$  指数和  $CI$  指数未能监测出攀枝花地区的重旱,  $SPI$  指数对川北若尔盖等地监测结果偏小。

## 4 结论

通过计算四川省各气象站点四种干旱指数, 利用 Arcgis 进行四种干旱指数的空间分析, 并与中国气象灾害大典记录的四川省典型年干旱情况进行对比分析, 得出以下结论:

(1) 对于1961年夏旱, 相对湿润指数  $M$  和气象干旱综合指数  $CI$  均表现出无旱或者轻旱, 标准化降水指数  $SPI$  和标准化降水蒸散指数  $SPEI$  对此次干旱的监测效果较好,  $SPEI$  指数监测效果在四个干旱指标中最好。

(2) 1994年夏旱,  $M$  指数的效果最差,  $CI$  指数效果次之,  $SPI$  指数和  $SPEI$  指数对1994年夏伏连旱的监测效果最好。

(3) 2006年伏旱,  $M$  指数的效果最差,  $CI$  指数比  $M$  指数效果稍好,  $SPI$  指数和  $SPEI$  指数监测出的干旱特征与实际的干旱结果一致。

(4) 2009年-2010年的冬春连旱,  $SPEI$  指数效果最好,  $M$  指数次之,  $SPI$  指数效果最差。

综合而言,  $SPEI$  指数是四个指数中最能描述四川省典型年干旱空间分布的干旱指标, 相较而言是最适合四川省的干旱指标。干旱指数适用性研究为合理分析四川省干旱提供基础, 对推进四川省农业发展有重要的研究意义。

### 参考文献(References):

[1] 尹晗, 李耀辉. 我国西南干旱研究最新进展综述[J]. 干旱气象, 2013, 31(1): 182-193. (YIN Han, LI Yaohui. Summary of ad-

vance on drought study in Southwest China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, 31(1): 182-193. (in Chinese)) DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-01-0181

[2] GB/T20481-2006 国家气象干旱等级[S]. (GB/T20481-2006 The National meteorological drought grade[S]. (in Chinese))

[3] 张弘, 王文卓, 李琼芳, 等. 不同干旱指数在唐山地区旱情评价中的应用[J]. 水资源保护, 2013, 29(6): 64-69. (ZHANG Hong, WANG Wen zhuo, LI Qiong-fang, et al. Drought evaluation of Tangshan region using multiple drought indices[J]. Water Resources Protection, 2013, 29(6): 64-69. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2013.06.013

[4] 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 Shaohui, LUO Xiaobin. Features, prevention and remedy of droughts in Sichuan since 1949[J]. Journal of Sichuan Normal University: Social Science Edition, 2005, 32(3): 125-132. (in Chinese)) DOI: 10.13734/j.cnki.1000-5315.2005.03.025

[5] 姚兴柱, 夏建国, 朱钟麟. 四川丘陵区水资源评价与利用研究[J]. 农业资源与环境科学, 2005, 21(5): 386-389. (YAO Xingzhu, XIA Jianguo, ZHU Zhonglin. Study on the evaluation and utilization of water resources in Hilly Region of Sichuan[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(5): 386-389. (in Chinese))

[6] 王朕, 梁川, 龙贻东, 等. 基于  $SPEI$  的川中丘陵区干旱时空分布特征[J]. 人民长江, 2015, 45(增刊2): 12-15. (WANG Zhen, LIANG Chuan, LONG Yidong, et al. Temporal-spatial distribution features of drought in Hilly area of Central Sichuan based on  $SPEI$ [J]. Yangtze River, 2015, 45(S2): 12-15. (in Chinese)) DOI: 1001-4179(2015)S2-0012-04

[7] Richard R, Heim J R. A review of Twentieth century drought indices used in the United State[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002: 1149-1165.

[8] 施晔, 梁忠民, 易知之. 区域综合干旱随机评价模型及其应用[J]. 水电能源科学, 2011, 29(9): 1-3. (SHI Ye, LIANG Zhongmin, YIN Zhizhi. Regional comprehensive drought assessment stochastic model and its application[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(9): 1-3. (in Chinese)) DOI: 1000-7709(2011)09-0001-04

[9] 许凯. 我国干旱变化规律及典型引黄灌区干旱预报方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2015. (XU Kai. Drought spatio-temporal variation in China and drought forecast in a typical irrigation area of the Yellow River[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese))

[10] 赵福年. 红壤区农田尺度下干旱指标的建立及使用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012. (ZHAO Funnian. Drought index establishment and usage in red soil area at field scale[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012. (in Chinese))

[11] Bahline H N, Mooley. Large scale drought/flood and monsoon circulation[J]. Mon Weather Rev, 1980, 108: 1197-1211.

[12] 任培贵. 黄土高原不同时间尺度干旱演变及其对植被的影响[D]. 兰州: 西北师范大学, 2014. (REN Peigui. The evolution of drought and its effect on vegetation under different time scale in the Loess Plateau[D]. Lanzhou: Northwest Normal

- University, 2014. (in Chinese)
- [13] Hulme M, Marsh R, Jones P D. Global changes in a humidity index between 1931-60 and 1961-90[J]. *Clim. Res.*, 1992, 2, 1-22. DOI: 10.3354/cr002001
- [14] 姚玉璧, 王劲松, 尚军林, 等. 基于相对湿度指数的西南春季干旱10年际演变特征[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(4): 547-554. (YAO Biyu, WANG Jir song, SHANG Jun lin, et al. Decadal variations of spring drought based on relative moisture index in Southwest of China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(4): 547-554. (in Chinese)) DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2014.04.007
- [15] Mckee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]. *Proceedings of the eighth conference on applied climatology*. Boston, MA: American Meteorological Society, 1993. pp. 179-184.
- [16] Vicente Serrano S M, Begueria S, Lopez Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718. DOI: 10.1175/2009.JCLI2909.1
- [17] 张强, 潘学标, 马柱国, 等. 干旱[M]. 北京: 气象出版社, 2009. (ZHANG Qiang, PAN Xue biao, MA Zhu guo, et al. *Drought* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009. (in Chinese))
- [18] 包云轩, 孟翠丽, 申双和, 等. 基于CI指数的江苏省近50年干旱的时空分布规律[J]. *地理学报*, 2011, 66(5): 599-608. (BAO Yun xuan, MENG Cu li, SHEN Shuang he, et al. Temporal and spatial patterns of droughts for recent 50 years in Jiangsu based on meteorological drought composite index[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 599-608. (in Chinese))
- [19] 江厚安. 粮食主产区财政支农效果评价及政策优化研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010. (JIANG Hou an. *Study on effect evaluation and policy optimization of fiscal support for agriculture in major grain producing areas* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010. (in Chinese))
- [20] 林凡. 四川省水资源供需平衡分析及可持续开发利用研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2008. (LIN Fan. *Study on the supply and demand balance analysis and the sustainable exploitation and utilization of Sichuan Province* [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2008. (in Chinese))
- [21] 徐羽, 吴艳飞, 徐刚, 等. 基于相对湿度指数的重庆市气象干旱时空分布特征[J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 2016, 38(4): 96-103. (XU Yu, WU Yan fei, XU Gang, et al. Temporal and spatial patterns of meteorological drought in Chongqing based on relative humidity index[J]. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2016, 38(4): 96-103. (in Chinese)) DOI: 10.13718/j.cnki.xzdk.2016.04.015
- [22] 龙贻东, 梁川, 詹存. 近50年川中丘陵区的季节性干旱时空变化特征[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(6): 1045-1050. (LONG Yi dong, LIANG Chuan, ZHAN Cun. Spatial and temporal distribution of seasonal drought in hilly area of central Sichuan in recent 50 years [J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(6): 1045-1050. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2015.06.005
- [23] 姚玉璧, 张强, 王劲松, 等. 中国西南干旱对气候变暖的响应特征[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(9): 1409-1417. (YAO Yu bi, ZHANG Qiang, WANG Jir song, et al. The response of drought to climate warming in southwest in China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(9): 1409-1417. (in Chinese)) DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2014.09.005
- [24] 詹存, 梁川, 赵璐. 川中丘陵区季节性干旱时空分布特征及成因分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(21): 82-91. (ZHAN Cun, LIANG Chuan, ZHAO Lu. Temporal and spatial distribution characteristics and causes analysis of seasonal drought in Hilly area of central Sichuan[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(21): 82-91. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.21.011
- [25] 袁云, 李栋梁, 安迪. 基于标准化降水指数的中国冬季干旱分区及气候特征[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(4): 917-925. (YUAN Yun, LI Dong liang, AN Di. Winter aridity division in China based on standardized precipitation index and circulation characteristics[J]. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(4): 917-925. (in Chinese))
- [26] 闫研, 李忠贤. 基于SPEI指数分布华中地区近40a干旱时空分布特征[J]. *气象科学*, 2015, 35(5): 646-652. (YAN Yan, LI Zhong xian. Temporal and spatial characteristics of drought for recent 40 years in central China based on SPEI index[J]. *Journal of the Meteorological Science*, 2015, 35(5): 646-652. (in Chinese)) DOI: 10.3969/2014jms.0109
- [27] 李奇临, 范广州, 周定文, 等. 综合气象干旱指数在西南地区的修正[J]. *西南师范大学学报: 自然科学版*, 2016, 41(1): 138-146. (LI Qi lin, FAN Guang zhou, ZHOU Ding wen, et al. On modification of meteorological drought composite index in southwest China[J]. *Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition*, 2016, 41(1): 138-146. (in Chinese)) DOI: 10.13718/j.cnki.xsxh.2016.01.024
- [28] 詹兆渝. 中国气象灾害大典(四川卷)[M]. 北京: 气象出版社, 2006. (ZHAN Zhao yu. *China's Weather Disaster (Sichuan)* [M]. Meteorological Press, 2006. (in Chinese))
- [29] 刘燕, 徐刚. 2006年四川盆地旱灾分析及减灾措施[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(14): 5982-5983. (LIU Yan, XU Gang. Drought disaster analysis and disaster release measure of Sichuan basin in 2006[J]. *Journal of Anhui Agri. Sci.* 2008, 36(14): 5982-5983. (in Chinese)) DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2008.14.080
- [30] 贺晋云. 中国西南地区极端干旱特征及其对区域气候变化的响应[D]. 陕西: 西北师范大学, 2012. (HE Jir yun. *Characteristics of the extreme drought events and its response to climate change in the Southwest China* [D]. Shanxi: Northwest Normal University, 2012. (in Chinese))