

贾艳青, 张勃. 基于日 SPEI 的近 55 a 西南地区极端干旱事件时空演变特征[J]. 地理科学, 2018, 38(3): 474-483. [Jia Yanqing, Zhang Bo. Spatial-temporal Variability Characteristics of Extreme Drought Events Based on Daily SPEI in the Southwest China in Recent 55 Years. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(3): 474-483.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.03.018

# 基于日 SPEI 的近 55 a 西南地区极端干旱事件时空演变特征

贾艳青<sup>1,2</sup>, 张勃<sup>2</sup>

(1. 忻州师范学院地理系, 山西 忻州 034000; 2. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 利用 1960~2014 年中国西南地区 141 个气象台站的逐日气象资料, 引入一个新的干旱指数——逐日标准化降水蒸散指数(日 SPEI), 对极端干旱事件的年代际、年际、季节内变化及持续性特征进行了分析, 结果表明: 空间上, 近 55 a 西南春季和年极端干旱程度呈一致的减弱趋势, 重庆、四川与贵州的交界处及四川西北部极端干旱程度明显缓解, 而夏、秋两季极端干旱表现出增强的趋势并有一定的区域性特征。时间上, 春季和全年极端干旱频率、强度和持续天数逐渐减少, 春季极端干旱的减弱程度较全年明显; 夏、秋两季极端干旱频率、强度和持续天数呈增加趋势, 夏季极端干旱的加重趋势比秋季明显。从极端干旱事件的持续性来看, 20 世纪 60 年代和 21 世纪初(2000~2014 年)西南遭受的极端干旱最严重, 持续期达 60 d 以上的站点分别占到站点总数的 60% 和 73%。

**关键词:** 极端干旱事件; 日 SPEI; 中国西南

**中图分类号:** S166

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0690(2018)03-0474-10

干旱是最常见、对社会经济影响最大的气候灾害, 中国平均 2~3 a 就发生一次严重的干旱灾害<sup>[1-3]</sup>。西南地区是中国干旱发生频率较高的区域之一, 频发的旱灾导致了水资源匮乏、生态环境退化和粮食减产等一系列问题, 对当地农业发展和社会经济造成巨大损失<sup>[4-7]</sup>。近年来, 西南干旱的研究备受关注。已有的研究主要集中在干旱特征<sup>[8-13]</sup>和个例分析研究<sup>[14,15]</sup>方面, 对西南极端干旱的研究较少。少数极端干旱的研究关注了不同时空尺度上干旱的变化特征, 缺乏日尺度上极端干旱时空演变特征的分析, 对极端干旱演变细节的认识也比较薄弱, 多数研究截止于 2010 年之前, 欠缺近几年最新的极端干旱演变情况的分析研究, 而这部分研究对深入认识西南干旱演变特征和制定有效的防灾减灾措施非常重要。

选择合适的指标表征干旱的发生时间、强度及空间范围是干旱研究的基础<sup>[16]</sup>。前人已对气象干旱指标作了大量研究, 提出许多干旱定量化研究方法。其中, 帕默尔干旱指数(PDSI)<sup>[17]</sup>基于温

度、降水和土壤水分含量, 是目前全球干旱研究中应用最广泛的指数, 但其计算方案中参数对区域的选择非常敏感, 限制了该指数在全球及区域干旱监测中的应用。标准化降水指数(SPI)<sup>[18]</sup>可以监测多时间尺度的干旱, 但其仅考虑降水因素, 忽略了水分平衡的影响, 对研究气候变暖背景下干旱趋势效果不佳<sup>[19]</sup>。Vicente-Serrano 等<sup>[19]</sup>在 SPI 的基础上引入潜在蒸散, 构建了综合降水和气温变化共同影响的干旱监测与评估的指数——标准化降水蒸散指数(SPEI)。然而, 目前常用的这些干旱指数对干旱的评估与监测均比较笼统, 无法清晰地给出干旱发生、发展以及结束的时间, 具体表现为: 第一, 上述指数只能监测到月尺度的平均干旱程度, 不能监测更短时间尺度的干旱特征; 第二, 监测干旱强度时过低估计短时间连续强干旱的程度, 而高估长时间弱干旱的强度, 而农作物在关键生长期, 持续数天的干旱即可导致其死亡。基于此, 本研究选择 SPEI 对其进行改进, 改进后的日 SPEI 实现了对区域气象干旱强度的实时动态监

**收稿日期:** 2017-04-06; **修订日期:** 2017-05-08

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41561024)、山西省高等学校哲学社会科学研究项目(2015265)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (41561024), Philosophy Social Science Research Project of Shanxi Colleges and Universities (2015265).]

**作者简介:** 贾艳青(1980-), 女, 山西忻州人, 博士研究生, 讲师, 主要从事气候变化与地表过程研究。E-mail: jiaqy5170@sina.com

测,可监测到每一天的干旱状况并可在更短的时间尺度上表征干旱的发生、持续时间和严重程度。本文主要在日尺度上探讨西南极端干旱时空演变规律,为西南干旱监测和干旱评估提供理论依据和技术支撑。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

西南地区位于 $91^{\circ}21' \sim 112^{\circ}04'E$ 、 $20^{\circ}54' \sim 34^{\circ}19'N$ 之间,行政区包括四川、云南、贵州、广西和重庆5省(市、区),是中国重要的农业生产区。该区临青藏高原,地形地貌和气候情况均较复杂。地形以山地和高原为主,气候主要是亚热带山地高原气候。受地形(自西北向东南海拔高度降低)和季风气候等因素的影响,气候复杂多变。大部分地区年均温在 $14^{\circ}C \sim 24^{\circ}C$ ,降水量 $600 \sim 2\,300\text{ mm}$ ,降水的季节分布极不均匀,干湿季分明。湿季(5~10月)降水量占全年降水的 $80\% \sim 90\%$ ,而干季(11月至次年4月)只占 $10\% \sim 20\%$ <sup>[20]</sup>。1949年至今的主要气象灾害中,干旱灾害频次约占总自然灾害的 $1/3$ ,为各项灾害之首<sup>[5]</sup>。

### 1.2 资料来源

研究区141个站点1960~2014年的日值数据来自中国气象局国家气象信息中心“中国地面气候日值数据”和“中国地面气候资料日值数据V3.0”,包括逐日降水量(mm)、最高气温( $^{\circ}C$ )、最低气温( $^{\circ}C$ )、风速(m/s)、日照时数(h)、相对湿度(%)。少数站点的观测数据存在缺测问题,主要是日照时数和风速,采用求多年同日平均值的方法补全。潜在蒸散使用Penman-Monteith模型计算,其计算公式中会自动用模拟值代替缺测值,因此少量的数据缺测不会影响最终的计算结果。研究区及所选气象站点分布见图1。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 日 SPEI 计算

本研究对 SPEI 指标做了改进,改进后的日 SPEI 干旱指数计算过程与月 SPEI 类似,具体计算步骤如下:

1) 计算逐日潜在蒸散( $ET_0$ )。采用 FAO-56 (1998)推荐的 Penman-Monteith 模型计算:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

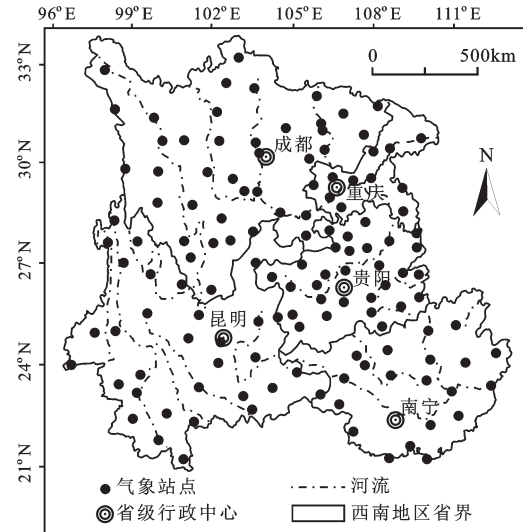


图1 西南地区气象站点分布

Fig.1 The location of meteorology stations in the Southwest China

式中: $ET_0$ 为日潜在蒸散量,mm; $\Delta$ 为温度随饱和水汽压变化的斜率, $kPa/^{\circ}C$ ;  $U_2$ 为离地2 m高处风速,m/s; $e_a$ 为空气饱和水汽压, $kPa$ ;  $e_d$ 为空气实际水汽压, $kPa$ ;  $T$ 为平均气温, $^{\circ}C$ ;  $r$ 为湿度表常数, $kPa/^{\circ}C$ ;  $R_n$ 为到达地面的净辐射, $MJ/(m^2d)$ ;  $G$ 为土壤热通量密度, $MJ/(m^2d)$ 。

2) 计算逐日降水量与潜在蒸散的差值:

$$D_i = P_i - (ET_0)_i \quad (2)$$

式中, $D_i$ 为降水与蒸散差值的累计值,  $P_i$ 为日降水量。设  $D_{i,j}^k$  为第  $i$  年第  $j$  天开始,  $k$  天内累积降水差额,则

$$\begin{cases} D_{i,j}^k = \sum_{l=31-k+j}^{30} D_{i-1,l} + \sum_{l=1}^j D_{i,l} & j < k \\ D_{i,j}^k = \sum_{l=j-k+1}^j D_{i,l} & j \geq k \end{cases}$$

3) 采用了三参数的 log-logistic 概率分布对  $D_i$  数据序列进行拟合。

$$f(x) = \frac{\beta \left( \frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1}}{\alpha} \left[ 1 + \left( \frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (3)$$

式中:参数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别为尺度、形状及初始状态参数,采用线性矩的方法拟合获得:

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta)}, \quad \beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2}$$

$$\gamma = w_0 - \alpha\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta)$$

式中: $\Gamma$ 为阶乘函数, $w_0$ 、 $w_1$ 和 $w_2$ 为原始数据序列  $D_i$

的概率加权矩。由此可以得到  $D_i$  概率密度的累计概率密度函数:

$$F(x) = \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (4)$$

4) 对累计概率密度进行正态标准化:

$$P = 1 - F(x) \quad (5)$$

当累积概率  $P \leq 0.5$  时, 概率加权矩 ( $w$ ) 公式为:

$$w = \sqrt{-2 \ln(P)} \quad (6)$$

$$SPEI = w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \quad (7)$$

当  $P > 0.5$  时, 以  $1 - P$  表示  $P$ :

$$SPEI = -(w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3}) \quad (8)$$

式中:  $c_0 = 2.515\ 517$ ,  $c_1 = 0.802\ 853$ ,  $c_2 = 0.010\ 328$ ,  $d_1 = 1.432\ 788$ ,  $d_2 = 0.189\ 269$ ,  $d_3 = 0.001\ 308$ 。

### 1.3.2 气象极端干旱过程的确定

极端干旱事件定义为: 当日 SPEI 指数连续 15 d 每天的值低于 -2 时, 则为一次极端干旱过程。干旱过程开始日期为第 1 天 SPEI 值达到极端干旱等级以上的日期, 结束日期为最后一天 SPEI 指数为无极端干旱的日期, 当 SPEI 指数连续 5 d 为无旱等级时极端干旱过程结束。极端干旱过程开始到结束的天数为干旱持续时间。过程内各日 SPEI 指数绝对值之和, 表示极端干旱过程的强度, 其值越大干旱程度越强。

### 1.3.3 Mann-Kendall 趋势检验法

采用 Mann-Kendall (M-K) 趋势检验方法对西南 141 个气象站极端干旱事件的变化趋势进行显著性检验。M-K 趋势检验是非参数统计检验方法, 计算简单, 是目前水文学中常用的趋势诊断方法。M-K 趋势系数小于 0 表示时间序列呈下降趋势; 反之, 则表示时间序列呈上升趋势; 并且趋势系数的绝对值大于 1.96 时, 表明变化趋势通过 0.05 的显著性水平检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 春、夏、秋季及年极端干旱事件的空间趋势变化

统计分析得知, 西南地区冬季仅有极少数站点 (若尔盖、红原、峨眉山) 出现极端干旱事件, 故只分析春、夏、秋季及年尺度的极端干旱时空演变特征。图 2a~c 显示, 春季极端干旱事件频率、强度和持续天数呈下降趋势的站点数多于上升趋势的站点数。其中, 四川西北部及四川、贵州交界处极

端干旱频率减少趋势较明显, 四川西部、南部和云南东部的部分站点极端干旱强度和持续天数减少趋势较明显, 而若尔盖高原和四川盆地北部极端干旱频率、强度和持续天数均表现为增加趋势。夏季多数地区的极端干旱频率、强度和持续天数表现为增加趋势 (图 2d~f)。夏季极端干旱频率变化幅度较小 (图 2d), 空间区域差异性表现不明显, 明显增加的地区位于四川西北部部分地区。夏季极端干旱强度和持续天数的空间分布相差无异 (图 2e, f), 呈增加趋势的站点主要分布在四川大部、广西东部、贵州北中部以及重庆中部, 主要是由于近 30 a 来气温升高、降水减少、蒸发量增大造成的暖干趋势所致<sup>[21]</sup>。秋季极端干旱频率、强度和持续天数变化与夏季类似, 以增加趋势为主 (图 2g~i)。除西南东部以及四川西部、云南中西部极端干旱强度和持续天数 (图 2h, i) 表现为下降趋势外, 其余站点均为增加趋势, 最为明显的区域是四川和贵州交界处的部分站点。由此可见, 西南夏、秋两季极端干旱程度均为增加的趋势。分析其原因, 主要是自 20 世纪 90 年代后期开始, 南亚夏季风的减弱导致西南地区夏、秋两季降水量偏少, 加之在气温显著升高的协同作用下, 致使该区干旱频繁发生<sup>[22]</sup>。此外, 海拔对季风期极端干旱的影响也较大。图 2d~f 和图 2g~i 显示干旱加重趋势明显的地区多位于海拔较高的横断山地北部及高海拔与低海拔过渡地带的贵州北部和滇、川、桂三省交界处。

年尺度极端干旱事件频率、强度和持续天数变化趋势有明显的区域差异 (图 2j~l)。极端干旱频率 (图 2j) 减少的地区零星分布在四川西北部、云南东南部、广西中部以及重庆、四川和贵州交界处, 明显增加的地区呈斑块状分布在云南西北部、四川东北部、贵州东部和西南部、广西北部 and 南部地区。全年极端干旱强度和持续天数趋势变化空间分布类似 (图 2k, l), 减少趋势较明显的站点分布在四川西北部和云南东部, 增加趋势明显的地区位于四川东南部、贵州北部、广西北部 and 南部局部地区。可以看出, 近 55 a 西南极端干旱变化较复杂, 极端干旱频率、强度和持续时间增加的地区多位于四川盆地东南、横断山北部、贵州北部等地势较高的区域以及广西北部 and 南部。究其原因, 近半个世纪以来西南平均气温升高<sup>[22]</sup>, 西南季风的减弱又导致降水量减少且在年和年



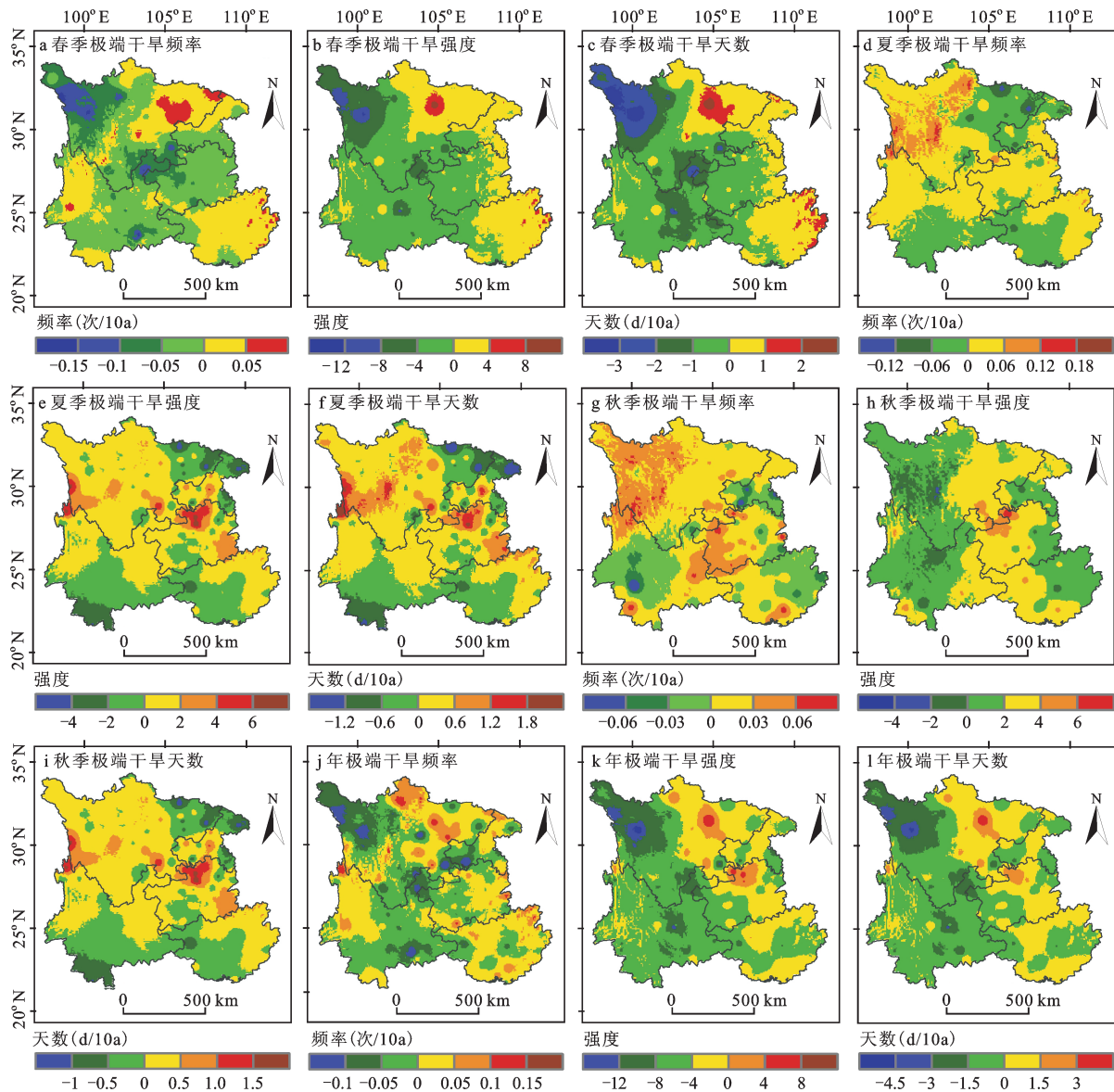


图2 1960~2014年西南地区春、夏、秋及年极端干旱频率、强度和持续天数趋势系数空间分布

Fig.2 Spatial trend of extreme drought frequency, intensity, duration in spring, summer, autumn and annual time scales in the Southwest China from 1960 to 2014

际时空分布不均<sup>[23,24]</sup>,这改变了西南干旱的时空分布特征。此外,西南丰富的气候带加上不同地形的影响,再叠加山地的垂直变化,导致部分地区干旱灾害频发。

## 2.2 极端干旱事件的时间演变

### 2.2.1 极端干旱事件年际演变

西南春季极端干旱事件频率、强度和持续天数均呈明显下降趋势(图3a~c),年际倾向率分别为 $-0.02$ 次/10a、 $-1.15/10a$ 、 $-0.45$  d/10a。夏季极端干旱频率无明显变化,极端干旱强度和持续天数呈上升趋势(图3d~f)。秋季极端干旱频率、强度和持

续天数均处于上升趋势(图3g~i),变化速率分别为 $0.01$ 次/10a、 $0.36/10a$ 、 $0.1$  d/10a。全年极端干旱频率、强度和天数均呈小幅下降趋势(图3j~l),年际倾向率分别为 $-0.01$ 次/10a、 $-0.3/10a$ 、 $-0.18$  d/10a。7 a低通滤波曲线显示,春季极端干旱频率、强度和天数的变化呈波动减小趋势,1963年极端干旱发生较频繁,干旱频率、强度和持续时间分别为 $0.72$ 次、 $45$ 、 $17$  d,1997年出现最低值,干旱频率、强度和持续天数分别为 $0.04$ 次、 $0.76$ 、 $0.31$  d。夏季极端干旱频率、强度和持续天数上升趋势较秋季明显。夏季极端干旱在1972年较严重,干旱频率、强度和



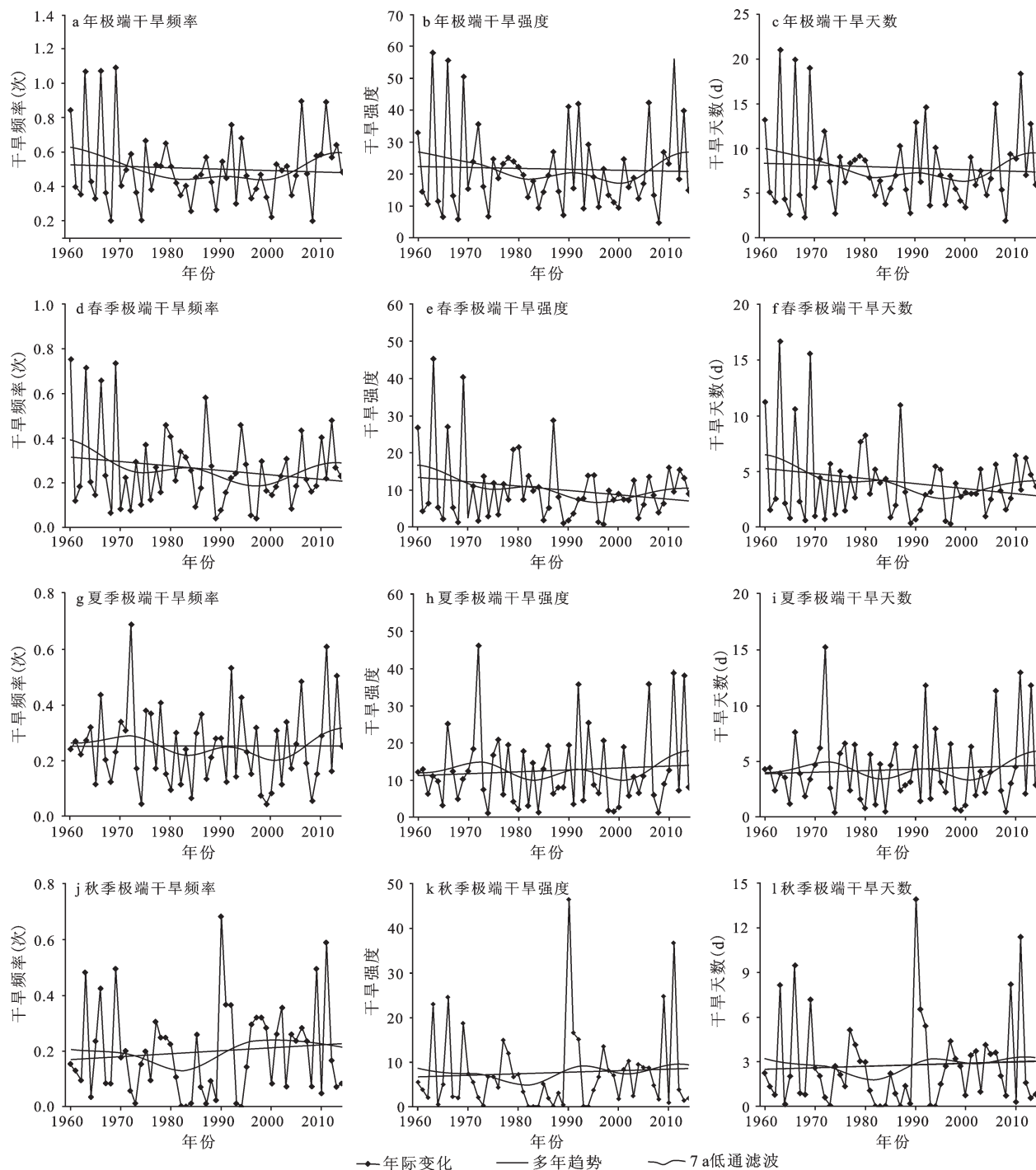


图3 西南地区极端干旱事件频率、强度和持续天数的年际演变

Fig.3 Inter annual variation of extreme drought frequency, intensity and duration in the Southwest China

持续天数分别为0.7次、46、15 d。秋季在1982、1983和1992年未发生极端干旱事件,极端干旱程度在1990年较严重,干旱频率、强度和持续时间分别为0.7次、46、14 d。综上,西南全年及春季极端干旱程度有所减轻,尤其春季减轻趋势较明显;夏、秋两季极端干旱呈加重趋势,夏季加重趋势比

秋季明显。可见,旱灾对西南农业生产影响严重,有研究表明<sup>[25]</sup>,2010~2012年的西南大旱导致 $351 \times 10^4 \text{hm}^2$ 受灾和 $212 \times 10^4 \text{hm}^2$ 成灾。近60 a以来,西南干旱受灾、成灾和绝收面积均呈增加趋势,多年平均受灾、成灾和绝收面积分别为 $212 \times 10^4 \text{hm}^2$ 、 $94 \times 10^4 \text{hm}^2$ 、 $16 \times 10^4 \text{hm}^2$ 。

### 2.2.2 极端干旱事件的年代际演变

表 1 列出了近 55 a 西南春、夏、秋季及全年各年代出现的极端干旱事件的次数、强度和持续天数。总体上看,西南 20 世纪 60 年代极端干旱程度较严重,之后 20 世纪 70 年代、80 年代和 90 年代极端干旱程度有所缓解,2000 之后极端干旱事件演变到近 55 a 最严重的程度。有统计表明<sup>[4]</sup>,西南地区近 60 a 来各年代农作物干旱综合损失率逐渐增大,21 世纪农作物干旱综合损失率为 7.3%,高于全国平均水平(5.5%)。特别是 2009 年 9 月中旬至 2010 年 3 月,西南地区遭受了严重的极端干旱灾害<sup>[25]</sup>。广西西北部、贵州西南部、云南中部和东北部冬小麦、油菜、甘蔗的受旱严重,冬小麦产量损失达  $8.3 \times 10^4$  t,约占 2009 年西南五省市冬小麦总产量的 13.7%,贵州和云南冬小麦减产分别达到 31% 和 48%。

季节变化方面,春季,20 世纪 60 年代极端干旱程度最严重,之后极端干旱程度有所缓解,到 2000 年之后极端干旱程度又加重。夏季,20 世纪 60、70 年代极端干旱程度较强,80、90 年代极端干旱程度较弱。秋季极端干旱事件程度从 20 世纪 70 年代开始减弱,到 90 年代开始增强。2000~2014 年,西南夏、秋两季极端干旱事件发生次数最多、干旱强度最严重及干旱持续时间最长。在各个年代,西南夏季的极端干旱最严重。研究表明,2011 年西南夏、秋两季的干旱,经济损失高达 218.5 亿元。其中贵州受灾最重,部分地区水稻和玉米绝收,农业经济损失高达 158 亿元<sup>[22]</sup>。

### 2.3 极端干旱事件的持续性特征

西南地区近 55 a 各年代极端干旱事件持续天数分布如图 4。近 55 a,西南极端干旱持续时间较长的区域集中在西南东北部和西北部(图 4a)。分析发现,持续天数的高值区逐渐向东北部转移,20 世纪 60 年代有 70% 的站点持续天数在 60 d 以上

(图 4b),高值区在整个研究区内零散分布在四川西北部和东北部、云南东部以及四川、重庆和贵州交界地带,其中纳溪、太华山站的极端干旱持续天数达到 300 d 以上。20 世纪 70 年代 53% 的站点出现了持续 60 d 以上的极端干旱事件(图 4c),高值区域主要集中在四川西北部、东北部以及重庆,其中广元、太华山等 9 个站点的极端干旱持续天数在 200 d 以上。20 世纪 80 年代 48% 的站点极端干旱持续时长在 60 d 以上(图 4d),高值区主要分布在四川西部、贵州东北部和云南的东南部,其中德钦、巴塘、太华山、理塘站极端干旱持续天数在 200 d 以上。20 世纪 90 年代极端干旱持续天数的高值区开始转移到西南东部(图 4e),48% 的站点持续天数在 60 d 以上,其中广元站极端干旱天数达到 200 d 以上。2000~2014 年 73% 的站点极端干旱持续时长在 60 d 以上(图 4f),高值区集中在四川东北部、重庆大部分地区以及贵州北部地区,其中绵阳、广元站极端干旱持续时长在 300 d 以上。

按照干旱持续时间对西南极端干旱事件排序,分析持续天数最长的 15 次极端干旱事件,见表 2。空间上,这些站点主要分布在四川东部、贵州西部和北中部以及云南东部。从持续天数来看,雷波、綦江分别在 1963 年 3 月 26 日~6 月 29 日和 2011 年 7 月 4 日~10 月 1 日遭受了持续时长达 90 d 以上的极端干旱,綦江、思南、桐梓、宜宾站在 2011 年遭受了较严重的极端干旱灾害,最长极端干旱持续天数分别为 90 d、72 d、54 d、52 d,其中夏、秋季干旱是主要的极端干旱类型。1963 年 3~6 月、1966 年 7~10 月、1969 年 3~5 月,雷波、太华山、凯里、息烽、纳溪 5 个站点发生了较长持续时长的极端干旱。分析得知,四川、贵州、重庆交界处附近的站点在 20 世纪 60 年代和近期均经历过较严重的极端干旱灾害。另外,西南部分地区春旱持续时间较长。康定、蒙自分别在 1973 年 3~5 月和

表 1 1960~2014 年西南地区极端干旱事件特征年代际变化

Table 1 Decadal variation of extreme drought characteristics in the Southwest China from 1960 to 2014

年代	年			春			夏			秋		
	频次	天数	强度	频次	天数	强度	频次	天数	强度	频次	天数	强度
1960~1970	6.5	102.3	274.4	3.9	65.0	166.6	2.8	40.9	119.4	2.4	35.8	94.2
1971~1980	4.9	80.1	219.9	2.5	41.4	105.9	2.8	47.8	141.8	1.7	24.4	65.6
1981~1990	4.1	65.6	183.4	2.3	34.6	89.4	2.3	37.6	109.6	1.3	20.0	60.5
1991~2000	4.4	65.3	180.6	2.1	28.8	74.9	2.2	36.8	110.4	2.2	27.3	72.3
2001~2014	7.7	118.7	328.6	3.6	52.0	131.1	3.9	69.7	209.5	3.2	45.2	123.4

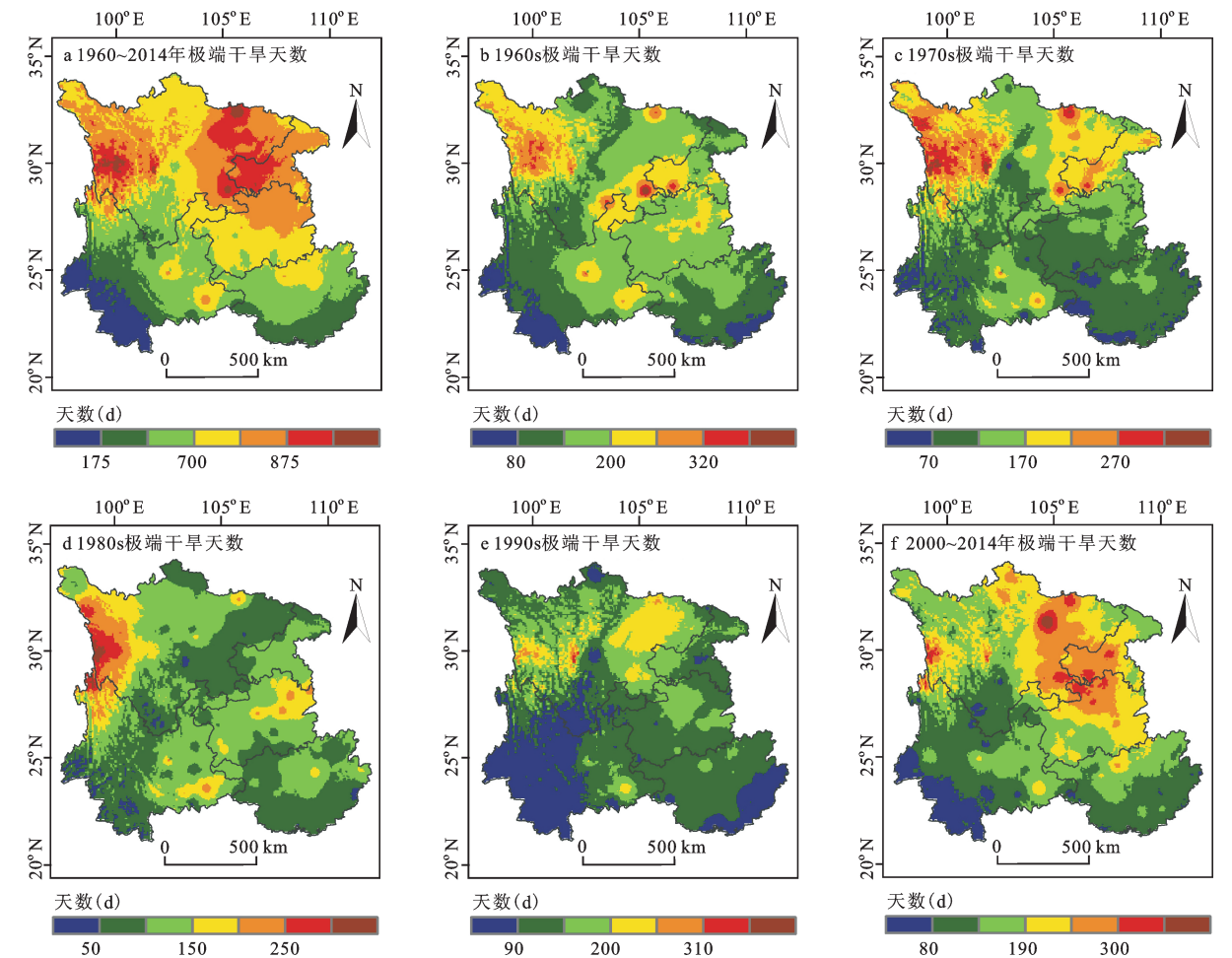


图4 西南地区各年代极端干旱事件持续天数的空间分布  
Fig.4 Spatial distribution of extreme drought duration in the Southwest China

表2 1960~2014年西南地区持续时间最长的极端干旱事件

Table 2 Top 15 extreme drought events ranked by duration in the Southwest China from 1960 to 2014

站点	发生时段	跨越季节	持续时间(d)	累计指数	平均指数
雷波	1963.03.26~1963.06.29	春、夏季	97	295	3.0
綦江	2011.07.04~2011.10.01	夏、秋季	90	269	3.0
太华山	1969.03.08~1969.05.27	春季	81	233	2.9
广元	2007.04.02~2007.06.17	春、夏季	76	182	2.4
思南	2011.07.19~2011.09.29	夏、秋季	72	221	3.1
普安	1987.03.09~1987.05.17	春季	69	185	2.7
兴仁	1987.03.09~1987.05.17	春季	69	194	2.8
康定	1973.03.02~1973.05.09	春季	68	190	2.8
蒙自	1980.03.14~1980.05.19	春季	67	163	2.4
凯里	1966.08.08~1966.10.11	夏、秋季	65	207	3.2
息烽	1966.07.29~1966.09.30	夏、秋季	61	186	3.0
桐梓	2011.08.07~2011.09.29	夏、秋季	54	165	3.1
宜宾	2011.04.30~2011.06.20	春、夏季	52	186	3.6
纳溪	1963.03.22~1963.05.09	春季	49	151	3.1
遂宁	2006.07.21~2006.09.07	夏、秋季	49	185	3.8



1980 年 3~5 月发生过 68 d、67 d 的极端干旱,普安、兴仁在 1987 年 3~5 月发生了持续 69 d 的极端干旱。

### 3 结论与讨论

1) 近 55 a 来西南年及春季极端干旱频率、强度和持续天数呈减少趋势且空间分布基本一致,重庆、四川与贵州的交界处以及四川西北部极端干旱程度明显缓解,西南东北部极端干旱程度明显增强。夏、秋两季大部分区域极端干旱程度呈增强趋势,重庆、四川和贵州交界处附近区域极端干旱事件频率、强度和持续天数增加趋势较明显。

2) 年尺度上,近 55 a 来西南春季和年极端干旱事件频率、强度和持续天数均呈减少趋势,春季极端干旱减少趋势更明显;夏、秋两季极端干旱事件频率、强度和持续天数处于增加趋势,夏季增加幅度较大。年代际尺度上,20 世纪 60 年代和 21 世纪初(2000~2014)是西南年及春、夏、秋三季极端干旱程度较严重的阶段。

3) 近 55 a 来,西南极端干旱事件的持续天数经历了先减少后增加的变化。21 世纪初(2000~2014 年)西南地区遭受的极端干旱最严重,73%的站点极端干旱持续期达到 60 d 以上;20 世纪 60 年代次之,60%的站点极端干旱持续期达 60 d 以上。

SPEI 综合考虑了降水与潜在蒸散对干旱的影响,在区域干旱监测上具有灵活的时间尺度优势,但它只能检测到月尺度的平均干旱程度,修正后的日 SPEI 指数克服了这个不足,对干旱的刻画具体到每天、每周、每月和更长的时间尺度,关键可识别干旱的起止日期和持续天数。SPEI 原始计算过程中潜在蒸散的计算使用的是仅考虑温度的 Thornthwaite 模型,而 Penman-Monteith 模型计算潜在量时综合考虑了气温、风速、日照和相对湿度,更适合反映全球升温下的区域干旱变化<sup>[30]</sup>。因而,本文选用物理机制更完备的 Penman-Monteith 模型计算潜在蒸散。目前,对西南极端干旱演变特征的研究结论还存在争议<sup>[11,16,31]</sup>。贺晋云等<sup>[31]</sup>研究表明,近 53 a 西南极端干旱频率呈减少趋势;王东等<sup>[11]</sup>和熊光洁等<sup>[16]</sup>的研究结论与之相反。本文对西南地区的分析结果,部分印证了贺晋云等<sup>[31]</sup>的研究结论,表明西南地区极端干旱频率、强度和持续时间呈减少的趋势,极端干旱程度总体减弱。本研究结果与尹晗等<sup>[30]</sup>针对西南地区的研究结论非常相似,均认为西南地区极端干旱频率在

空间上全区变化并不一致,变化较为复杂且成片交错分布。西南干旱成因较多,日 SPEI 虽然基于日尺度的地表水分收支,但喀斯特地貌、大气环流、青藏高原的作用、ENSO 和热带洋面热力状况等因素对西南极端干旱也有影响,该指数还不能很好地解释干旱发生的机制。今后还需深入研究西南极端干旱发生的物理机制,在干旱灾害风险特征和防治方面作深入探讨。

### 参考文献(References):

- [1] 黄荣辉,刘永,王林,等. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析[J]. 大气科学, 2012, 36(3): 443-457. [Huang Ronghui, Liu Yong, Wang Lin et al. Analyses of the causes of severe drought occurring in Southwest China from the fall of 2009 to the spring of 2010. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2012, 36(3): 443-457.]
- [2] 翁白莎,严登华. 变化环境下我国干旱灾害的综合应对[J]. 中国水利, 2010(7): 4-8. [Weng Baisha, Yan Denghua. Reflections on integrated coping strategies for drought in China in changing environment. China Water Resources, 2010(7): 4-8.]
- [3] 马建华. 西南地区近年特大干旱灾害的启示与对策[J]. 人民长江, 2010, 41(24): 7-12. [Ma Jianhua. Revelation and counter-measures of catastrophic drought disasters in recent years in Southwest China. Yangtze River, 2010, 41(24): 7-12.]
- [4] 韩兰英,张强,姚玉璧,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, Zhang Qiang, Yao Yubi et al. Characteristics and origins of drought disasters in Southwest China in nearly 60 years. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(5): 632-639.]
- [5] 徐新创,葛全胜,郑景云,等. 区域农业干旱风险评估研究——以中国西南地区为例[J]. 地理科学进展, 2011, 30(7): 883-890. [Xu Xinchuang, Ge Quansheng, Zheng Jingyun et al. Drought risk assessment on regional agriculture: A case in Southwest China. Progress in Geography, 2011, 30(7): 883-890.]
- [6] 赵志平,吴晓蕾,李果,等. 2009-2011 年我国西南地区旱灾程度及其对植被净初级生产力的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(2): 350-360. [Zhao Zhiping, Wu Xiaopu, Li Guo et al. Drought in southwestern China and its impact on the net primary productivity of vegetation from 2009-2011. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 350-360.]
- [7] 王东,张勃,安美玲,等. 基于 SPEI 的西南地区近 53a 干旱时空特征分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(6): 1003-1016. [Wang Dong, Zhang Bo, An Meiling et al. Temporal and spatial distributions of drought in Southwest China over the past 53 years based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. Journal of Natural Resources, 2014, 29(6): 1003-1016.]
- [8] 王允,刘普幸,曹立国,等. 基于湿润指数的 1960-2011 年中国西南地区地表干湿变化特征[J]. 自然资源学报, 2014, 29(5): 830-838. [Wang Yun, Liu Puxin, Cao Liguang et al. Characteris-

- tics of southwestern China dry-wet condition based on wetness index in 1960-2011. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(5): 830-838.]
- [9] 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分布特征[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(19): 85-92. [Wang Mingtian, Wang Xiang, Huang Wanhua et al. Temporal and spatial distribution of seasonal drought in southwest of China based on relative moisture index. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(19): 85-92.]
- [10] 杨金虎, 张强, 王劲松, 等. 近60年来西南地区旱涝变化及极端和持续性特征认识[J]. *地理科学*, 2015, 35(10): 1333-1340. [Yang Jinhu, Zhang Qiang, Wang Jinsong et al. Extreme and persistent feature of drought and flood of Southwest China in past 60 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(10): 1333-1340.]
- [11] 苏秀程, 王磊, 李奇临, 等. 近50a中国西南地区地表干湿状况研究[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(1): 104-116. [Su Xiucheng, Wang Lei, Li Qilin et al. Study of surface dry and wet conditions in Southwest China in recent 50 years. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(1): 104-116.]
- [12] 熊光洁, 张博凯, 李崇银, 等. 基于SPEI的中国西南地区1961-2012年干旱变化特征分析[J]. *气候变化研究进展*, 2013, 9(3): 192-198. [Xiong Guangjie, Zhang Bokai, Li Chongyin et al. Characteristics of drought variations in Southwest China in 1961-2012 based on SPEI. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis*, 2013, 9(3): 192-198.]
- [13] 吕俊梅, 琚建华, 任菊章, 等. 热带大气MJO活动异常对2009-2010年云南极端干旱的影响[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(4): 599-613. [Lv Junmei, Ju Jianhua, Ren Juzhang et al. The influence of the Madden-Julian Oscillation activity anomalies on Yunnan's extreme drought of 2009-2010. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(1): 98-112.]
- [14] 徐栋夫, 李栋梁, 王慧. 我国西南地区秋季干湿分类及主要类型异常年环流特征分析[J]. *大气科学*, 2014, 38(2): 373-385. [Xu Dongfu, Li Dongliang, Wang Hui. Autumn dry-wet conditions and main types of atmospheric circulation in anomalous years in Southwest China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2014, 38 (2): 373-385.]
- [15] 李永华, 徐海明, 刘德. 2006年夏季西南地区东部特大干旱及其大气环流异常[J]. *气象学报*, 2009, 67(1): 122-132. [Li Yonghua, Xu Haiming, Liu De. Features of the extremely severe drought in the east of Southwest China and anomalies of atmospheric circulation in summer 2006. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(1): 122-132.]
- [16] 轩俊伟, 郑江华, 刘志辉. 基于SPEI的新疆干旱时空变化特征[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(2): 338-344. [Xuan Junwei, Zheng Jianghua, Liu Zhihui. SPEI-based spatiotemporal variation of drought in Xinjiang. *Arid Zone Research*, 2016, 33(2): 338-344.]
- [17] Palmer W C. Meteorological drought[R]. US department of Commerce Weather Bureau Research Paper, 1965, 45: 8.
- [18] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales: *Proceedings of Vulnerability*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [19] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-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.
- [20] 赵济. 中国自然地理(第4版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997. [Zhao Ji. *Physical Geography of China*(4th edition). Beijing: Higher Education Press, 1997.]
- [21] 郭洁, 李国平. 若尔盖气候变化及其对湿地退化的影响[J]. *高原气象*, 2007, 26(2): 422-428. [Guo Jie, Li Guoping. Climate change in Zoigê Plateau marsh wetland and its impact on wetland degradation. *Plateau Meteorology*, 2007, 26(2): 422-428.]
- [22] 宋艳玲, 蔡雯悦, 柳艳菊, 等. 我国西南地区干旱变化及对贵州水稻产量影响[J]. *应用气象学报*, 2014, 25(5): 550-558. [Song Yanling, Cai Wenyue, Liu Yanju et al. Drought change in Southwest China and its impact on rice yield in Guizhou province. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2014, 25(5): 550-558.]
- [23] He Yaoqi, Wang Yongjin, Kong Xinggong et al. High resolution stalagmite  $\delta^{18}\text{O}$  record over the past 1000 year from Dongge Cave in Guizhou[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(10): 1003-1008.
- [24] Yang Xunlin, Zhang Pingzhong, Chen Fahu et al. Modern stalagmite oxygen isotopic composition and its implications of climatic change from a high-elevation cave in the eastern Qinghai-Tibet Plateau over the past 50 years[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52 (9): 1238-1247.
- [25] 李强子, 闫娜娜, 张飞飞, 等. 2010年春季西南地区干旱遥感监测及其影响评估[J]. *地理学报*, 2010, 65(7): 771-780. [Li Qiangzi, Yan Nana, Zhang Feifei et al. Drought monitoring and its impacts assessment in Southwest China using remote sensing in the spring of 2010. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65 (7): 771-780.]
- [26] 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 advance on drought study in Southwest China. *Journal of Arid Meteorology*, 2013, 31(1): 182-193.]
- [27] 贺晋云, 张明军, 王鹏, 等. 近50年西南地区极端干旱气候变化特征[J]. *地理学报*, 2011, 66(9): 1179-1190. [He Jinyun, Zhang Mingjun, Wang Peng et al. Climate characteristics of the extreme drought events in Southwest China during recent 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1179-1190.]

## Spatial-temporal Variability Characteristics of Extreme Drought Events Based on Daily SPEI in the Southwest China in Recent 55 Years

Jia Yanqing<sup>1,2</sup>, Zhang Bo<sup>2</sup>

(1. Department of Geography, Xinzhou Normal University, Xinzhou 034000, Shanxi, China; 2. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

**Abstract:** The quantification of drought frequency, duration, intensity, and changes in areal-extent over time is not only essential in the drought risk management making process, but also combat of extreme drought hazard making. However, the current common drought indices can only identify average drought severity over a drought period and cannot indentify drought characteristics at short time scales. The climatic condition in southwestern China, largely an agricultural region, has been considerably variable in the past several decades. Drought has occurred more frequently and has become one of the most serious hazards in the last and current century in Southwest China. The extreme drought events frequently occur, as drought events have taken place in Southwest China. The present study aims to assess the changes in Southwest China's extreme drought events in 1960-2014. Using daily meteorological data collected from 141 stations across the Southwest China from 1960 to 2014, the daily Standardized Precipitation Evapotranspiration Index(daily SPEI) is developed based on daily meteorological data in this study. Latency evaporation is calculated by Penman-Monteith method, from inter-decadal, inter-annual, inter-seasonal variability, persistent characteristic of extreme drought events analyzed over Southwest China in past 55 years by daily SPEI index. The results showed that: From the point of view of space trends to see, it displayed consistent decreased extreme drought trend in spring and whole year over Southwest China in past 55 years. The Chongqing, on the border between Sichuan and Guizhou, north-west of Sichuan are the areas in which severity of extreme drought events has significantly decreased in the past 55 years. But it displayed increased extreme drought trend along with regional extreme drought trend feature in summer and autumn. The frequency, intensity and duration of extreme drought events have significantly increased on the border among of Sichuan, Guizhou, Yunnan, and Chongqing in summer and autumn. From the point of view of time evolution to see, frequency, intensity, duration of extreme drought events is decreasing in spring and whole year, and frequency, intensity, duration of extreme drought events is growing in summer and autumn over Southwest China in past 55 years. The tendency rates of frequency, intensity, duration are  $-0.01$ ,  $-0.3$ ,  $-0.18$  d per decades in whole year. The frequency, intensity, duration of extreme drought events in spring showed decreasing trends at rates of  $-0.02$ ,  $-1.15$ ,  $-0.45$  d per decades. The intensity, duration of extreme drought events in summer have increased by  $0.5$ ,  $0.14$  d per decades, respectively. The frequency, intensity, duration of extreme drought events in autumn showed increasing trends at rates of  $-0.01$ ,  $0.36$ ,  $0.1$  d per decades. By comparison, spring extreme drought lessen trend is evident than that of whole year, summer extreme drought is stronger than autumn. As a whole, extreme drought degree is strongest in summer, but it is weakest in spring. From inter-decadal scales of view of extreme drought events to see, the severity of extreme drought events was higher in 1960-1969 and in 2000-2014 during the past 55 years. From the point of view of persistent characteristic to see, duration of persistent drought event is longest in 1960-1969 and in 2000-2014 during 1960-2014. Of the two stages, about 60% and 73% meteorological stations have suffered extreme drought lasting more than 60 days.

**Key words:** extreme drought events; daily SPEI; the Southwest China