

文章编号: 2096-1618(2020)03-0359-08

基于 SPEI 指数的西南地区近 42 a 干旱时空变化分析

黄 健^{1,2}, 李谢辉¹, 王 磊¹, 陈子凡¹

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 江西省赣州市气象局, 江西 赣州 341100)

摘要:为在全球变暖背景下研究西南地区的干旱灾害,利用 1976–2017 年西南地区 5 省市区 116 个观测站日值数据,基于 SPEI 指数,应用线性趋势、M-K 突变检验和空间插值等方法,通过计算干旱频率和不同等级的干旱强度,对西南地区整体和单个省市区从年和季节尺度进行了时空变化特征分析,主要得出以下结论:西南地区近 42a 以来呈较为明显的干旱化趋势,以 2002 年为突变点,干旱趋势在 2002 年后明显增强;云南和贵州的干旱化趋势最为显著,其次是四川和重庆,西藏最不明显,20 世纪 90 年代后极端干旱事件明显增多。整个西南地区的干旱发生频率较高,高频区主要位于云南北部和东南部,四川中东部,贵州东部和重庆北部,低频区主要位于西藏的中南部。轻旱在 3 种干旱等级中发生频率最高,中旱的高频区域空间分布最广,重旱在 3 种旱情中发生频率普遍最低。SPEI 指数基本能反映出西南地区干旱的时空变化趋势,具有较好的适用性,但仍存在比实际旱情判断相对偏轻的情况。

关键词:应用气象;气象灾害;SPEI 指数;M-K 检验;时空变化;干旱频率;西南地区

中图分类号:P467

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2020.03.018

0 引言

自进入 21 世纪,中国西南地区发生多次严重旱灾,如 2006 年夏季四川严重高温干旱天气导致农作物受灾达 3,100 多万亩,成灾 1,748.3 万亩,绝收 467 万亩,造成 1,000 万人出现临时饮水困难,486 万人和 596.6 万头牲畜出现严重饮水困难^[1];2009 年秋季到 2010 年春季西南地区的特大旱情导致农作物受灾面积达 6,523.5 万亩,其中绝收 1,410 万亩,造成 5,104.9 万人受灾,2,212 万人和 5,104.3 万头牲畜饮水困难^[2-3]。干旱指数由于能够有效地监测和评估干旱的发生与发展,因此得到了广泛的应用。大量研究表明,由于标准化降水蒸散指数 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI) 能客观地描述地表干湿状况变化,表征一个地区干湿状况偏离常年的程度,较适合于气候变暖背景下的中国干旱监测和研究^[4-6]。近年来,国内学者利用该指数在干旱趋势研究、干旱时空特征分析、干旱监测的适用性分析、干旱敏感性分析、旱涝情势演变等方面在中国不同区域范围内进行了研究。

目前,随着西南地区社会经济的不断发展,对该地区的水资源需求不断扩大,同等程度的干旱事件所可能波及的区域范围和造成的经济损失也因此而不断扩大和增加。根据 IPCC 第四和第五次评估报告,全球地表温度在过去近百年来上升 0.56 °C ~ 0.92 °C,全球气候变暖将增加极端气象灾害发生的风险,西南地区的极端干旱事件将有增加的趋势^[7-8]。针对西南地区,熊光洁等^[9]利用 1961–2016 年四川、重庆、云南和

贵州 4 省市 86 个气象站逐月降水量和平均气温资料,使用 SPEI 指数和 EOF、REOF 方法研究了该地区不同时间尺度干旱的空间分布和时间演变特征。贾艳青等^[10]基于 1960–2014 年西南地区(四川、云南、贵州、广西和重庆)141 个气象台站的逐日气象资料,利用日 SPEI 对极端干旱事件的年代际、年际和季节内变化及持续性特征进行了分析。王东等^[11]利用 128 个测站数据和 SPEI 指数,通过对云南、贵州、广西、四川和重庆进行分区,从干旱年际和四季变化趋势,以及干旱事件频次等对西南地区 1960–2012 年的干旱特征进行了分析。可以看出,目前已有关于西南干旱的研究中一般都没有包括西藏地区,而旱灾是西藏最严重的农业气象灾害之一,西藏的干旱气候从西向东从极干旱、干旱、半干旱向半湿润、湿润发展,其大部分地区处于干旱半干旱地区^[12]。在前述研究基础上,主要利用 1976–2017 年包括西藏、四川、云南、贵州、重庆的西南地区日值数据,基于 SPEI 指数,对西南 5 省市区近 42 a 来干旱的时空变化特征进行分析,探讨西南地区整体和各分省市区干旱的发生范围和强度特点及时空变化趋势,以期能为全球变暖背景下西南地区的防旱抗旱工作,以及保障区域内各省市区社会经济繁荣发展、粮食生产和安全提供一定的参考价值。

1 资料与方法

1.1 研究区概况及数据资料

研究区为西南 5 省市区,主要包括西藏、四川、云南、贵州、重庆,总面积约 250 万平方公里,西部为青藏高原,东部为四川盆地,南部为云贵高原,区域内地形差

异大,气候类型多样。西部为高原高山气候,南部和东部地区由于受西南和东南季风影响,为亚热带季风气候。区域内年平均气温14℃~24℃,降水量介于600~2,300 mm,受季风影响,降水季节分布不均,80%~90%的降水发生在5~10月,过去半个世纪以来,该地区是中国干旱最为频发的区域之一^[13]。

使用的日值降水量和温度数据主要来自于中国气象数据网西南地区1976~2017年116个观测站相对完整且连续的日值数据集(图1),其中有44个站点存在少量缺测,缺测时间为2014年7~9月和2017年3月,占有数据的0.15%,对缺测数据,主要采用了插值法进行补充,能保证数据的连续性和可靠性。在116个站点中,四川38个,云南29个,西藏25个,贵州18个,重庆6个。

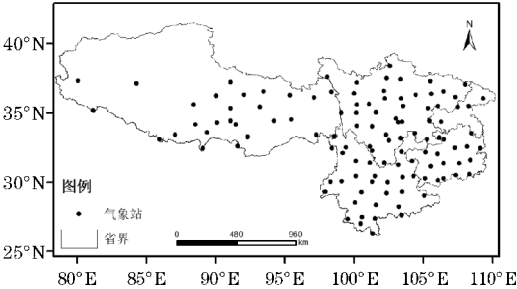


图1 西南地区116个气象站点地理位置分布

1.2 研究方法

1.2.1 标准化降水蒸散指数(SPEI)

SPEI指数的具体计算方法可参阅文献[14]。在计算潜在蒸散量时主要参考了标准中输入因子较少的

Thornthwaite方法,SPEI指数的计算主要通过NCL完成,划分的干旱等级标准为:轻旱(-1.0<SPEI≤-0.5)、中旱(-1.5<SPEI≤-1.0)、重旱(-2.0<SPEI≤-1.5)和特旱(SPEI≤-2.0)。以年、季、月作为时间尺度,其中对季节的定义为:3~5月为春季,6~8月为夏季,9~11月为秋季,12~次年2月为冬季。

1.2.2 其他研究方法

研究主要基于SPEI指数从时空两个方面对西南地区1976~2017年的干旱特征进行分析,对时间变化特征主要采用线性趋势法分别从西南地区整体和5省市区进行年际和季节分析,对空间变化特征主要利用ArcGIS软件对西南地区多年平均干旱频率,季节干旱频率,不同等级干旱频率和干旱强度进行分析。另外,采用Mann-Kendall(M-K)方法对西南地区年尺度SPEI值的变化趋势和突变年进行检验,M-K法的具体原理和步骤可参阅文献^[15],此处不再赘述。按干旱事件发生次数占总数据序列数的比重进行干旱事件发生频率的统计,通过定义连续干旱过程,对不同等级的干旱强度频率进行空间分析。

2 结果与分析

2.1 SPEI指数的时间变化趋势分析

2.1.1 西南地区及各省市区SPEI的年际变化趋势分析

图2为1976~2017年西南地区 and 5省市区SPEI指数的年际变化趋势图。图3为利用Mann-Kendall方法得到的西南地区年际SPEI指数序列的突变检验结果。

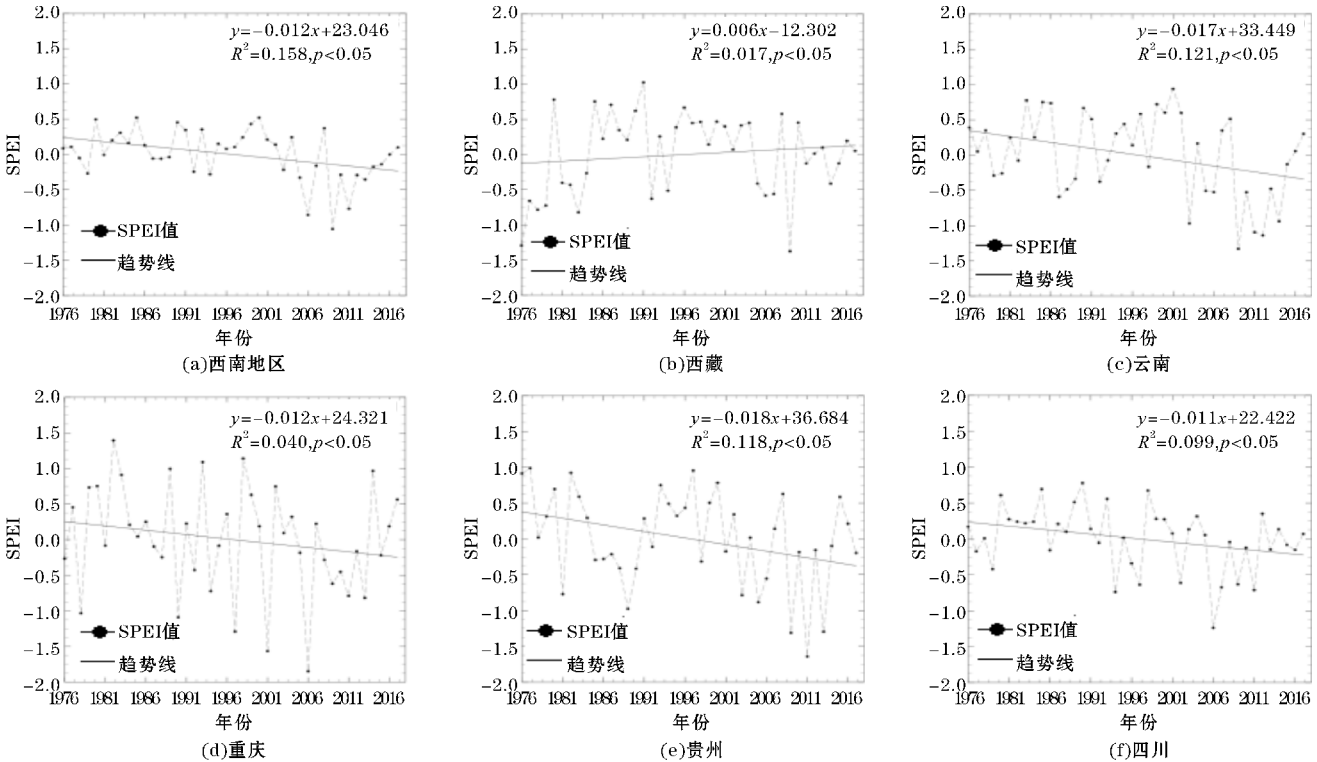


图2 1976~2017年西南地区整体和5省市区SPEI指数年际变化

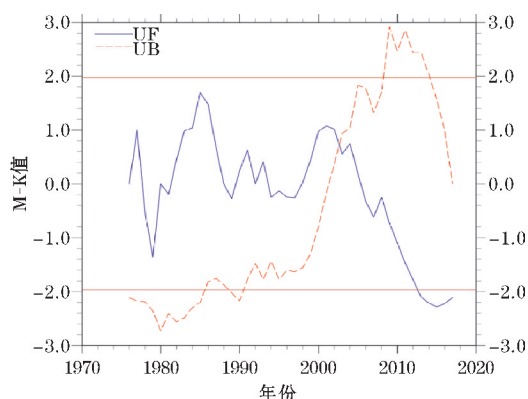


图3 1976–2017年西南地区年尺度 SPEI 指数 M-K 检验

由图2可以看出,从总体趋势来看,西南地区近42 a以来呈较为明显的干旱化趋势,结合图3发现其中有20 a UF值为负,有18 a为正,且UF与UB曲线在临界线内存在交点。SPEI值的变化趋势大致可分为两个阶段,呈现先上升后下降的趋势,以2002年为突变点,1976–2002年整体上呈现出波动中缓慢上升的趋势,在2002年之后呈现出下降趋势,说明西南地区在1976–2002年除了20世纪70年代末期有下降外,其余没有明显的且长时间的干旱化过程,而大约从2002年开始,西南地区整体上展现出干旱化的倾向,且随着时间推移干旱化程度不断加重。

根据SPEI值的定义,SPEI值低于-0.5则表示干旱,因而在1976–2017年SPEI值低于-0.5的3个年份西南地区极有可能发生旱情。查阅实际干旱事件记录和相关文献报道进行对比,发现SPEI值较低的2006年、2009年和2011年西南地区存在发生严重干旱事件的记录,分别为2006年夏季川渝地区干旱事件、2009年秋季川渝云贵地区干旱事件和2011年夏季云南地区干旱事件,SPEI值对西南地区干旱状况的表达与实际情况较为一致,表明SPEI指数可以在一定程度上反映出西南地区干旱的发生情况。同时,由于地理环境和受季风影响范围等自然地理因素的不同,西南地区5省市区的SPEI变化趋势表现出不同的特点,其中干旱化趋势最为显著的区域为贵州,线性倾向率为-0.018/a,其次是云南,线性倾向率为-0.017/a,干旱化趋势最不显著的区域为西藏,线性倾向率为0.006/a。

从各省的年代际变化趋势来看,西藏地区年尺度SPEI值在42 a间有10 a达到了轻度及以上干旱水平,这些干旱年份主要集中在1976–1984年和2005–2009年,干旱事件分布集中,持续时间长;云南地区在20世纪70–90年代,SPEI值基本维持在-0.5以上,到21世纪初,已有3年SPEI值达到中度干旱水平,4年SPEI值达到轻度干旱水平,干旱强度有明显增加的趋势;重庆地区的SPEI值波动最为剧烈,SPEI值最高达到1.4,而最低时达到-1.8,其SPEI值也是5个区域中达到中等以上强度干旱次数最多的地区,42 a来共发生5次,干旱事件主要集中在20世纪末到21世纪初

10 a;四川在20世纪90年代之前发生干旱次数较少,而在此后,干旱发生频率明显增加,且在21世纪该区域的年SPEI值首次达到中度干旱水平,据文献分析20世纪70–80年代四川大部分时期为多雨年,而在90年代之后降水量明显减少,气温开始上升,极端干旱事件增多^[16];贵州在20世纪70–90年代以轻度干旱为主,且干旱事件发生次数少,仅有2 a,而到21世纪,该地区干旱事件发生次数明显增加,18 a间发生干旱的年份达6 a,干旱年份的SPEI值在-0.6~-1.3,干旱事件的平均SPEI达-1.1,其中以2009年、2011年和2013年最为严重,达到中度干旱水平,说明贵州在21世纪初干旱发生频率和强度都有显著增加趋势。

2.1.2 西南地区及各省市区SPEI的季节变化趋势分析

西南地区整体和5个省市自治区1976–2017年四季的季节尺度SPEI年际变化和趋势见图4~6所示。可以看出,对于整个西南地区(图4),其SPEI值在春季和夏季干旱化趋势最为明显,秋季稍弱,冬季的干旱化趋势最弱。春夏两季的线性倾向率分别为-0.013/a和-0.012/a,这两个季节的SPEI值变化也具有一定的相似性,在1976–1999年SPEI值主要在0~0.5波动,而到了21世纪初,这两个季节的SPEI值经历了一个长达10 a左右的减弱过程。1976–1999年,春夏两季总共23 a中各自只有5 a的SPEI值在0以下,与之相对,2000–2014年,春夏两季15 a间分别有11 a和14 a的SPEI值在0以下,其中2011年夏季的SPEI值达到-0.57,是42 a中夏季干旱化最严重的一年。21世纪初的这一干旱化趋势在秋季SPEI值里也得到体现,2007–2014年,西南地区秋季SPEI值经历了一次骤降然后回升的过程,其中2010年秋季的SPEI值达到-0.71,为42 a来的最低值。SPEI值的冬季变化呈现出波动中逐渐下降的趋势,相较于其他3季,冬季SPEI值在本世纪初没有明显的下降过程。

5个省市自治区中,对于西藏地区(图4),其SPEI值在秋季和冬季显现出较为明显的下降趋势,线性倾向率分别为-0.007/a和-0.011/a,而在春季和夏季,该地区的SPEI变化趋势非常小,几乎为0,显现出微弱的上升趋势,但在2000年之后,西藏的干旱年份明显增加,四季中干旱事件发生最多的季节为春季,共有10 a的春季SPEI值低于-0.5的轻旱阈值,干旱事件的发生时间主要集中在统计时段内的最初和最后10 a。对于云南地区(图5),SPEI值达到干旱级别最多的季节为春季,有12 a,其次是冬季,最少的为夏季和秋季,有8 a。从21世纪开始,春旱年份的干旱程度从2001年开始逐年增强,从一开始的轻度干旱水平逐渐加深到中度干旱水平,直到2015年结束,显现出该时间段内的春旱严重程度在不断加深,夏旱和秋旱也显现出类似的趋势,但是各季节旱情程度加深的开始和结束时间点有所不同,夏旱是发生在20世纪90年代中期至今,而秋旱在90年代初就开始呈现出下降趋势,但真正开始加深应当认定

在 90 年代中期,因为从这一时期开始,SPEI 才明显表现出偏离先前时间段的波动趋势,而这一趋势在 00 年代末宣告结束,是 3 个季节中时间最短的,原因在于发生在 2011 年的干旱事件在秋季时得到了缓和并在冬季到来时结束。对于重庆市(图 5),该地区四季皆显现出干旱化趋势,干旱事件主要发生在春季、秋季和夏季,分别发生了 9 次、8 次和 7 次,春旱、夏旱和冬旱主要以轻旱为主,秋旱则以中旱为主,42 a 以来有 5 次达到中旱水平。对于四川地区(图 6),该区域秋季和冬季的 SPEI 指数皆显现出明显的干旱化趋势,分别为 $-0.011/\text{a}$ 和 $-0.013/\text{a}$,春季和夏季较为缓和,分别为 $-0.005/\text{a}$ 和

$-0.002/\text{a}$ 。自 20 世纪 90 年代中期开始,四川省春季、秋季和冬季的干旱事件频率明显增加,特别是秋季和冬季,这两个季节在 90 年代前没有季节尺度 SPEI 值低于 -0.5 的情况发生,而在此后分别有 5 a 和 3 a 出现旱情,表明四川省在 90 年代开始有一次明显的干旱化过程,这一过程一直持续到 21 世纪初,主要对该地区的春季、秋季和冬季旱情产生影响。对于贵州地区(图 6),该地区四季也显现出明显的干旱化趋势,分别为 $-0.004/\text{a}$ 、 $-0.009/\text{a}$ 、 $-0.017/\text{a}$ 和 $-0.007/\text{a}$,其中秋季的干旱化趋势最为明显,且秋旱事件以中旱为主,在 21 世纪初发生频率明显增加。

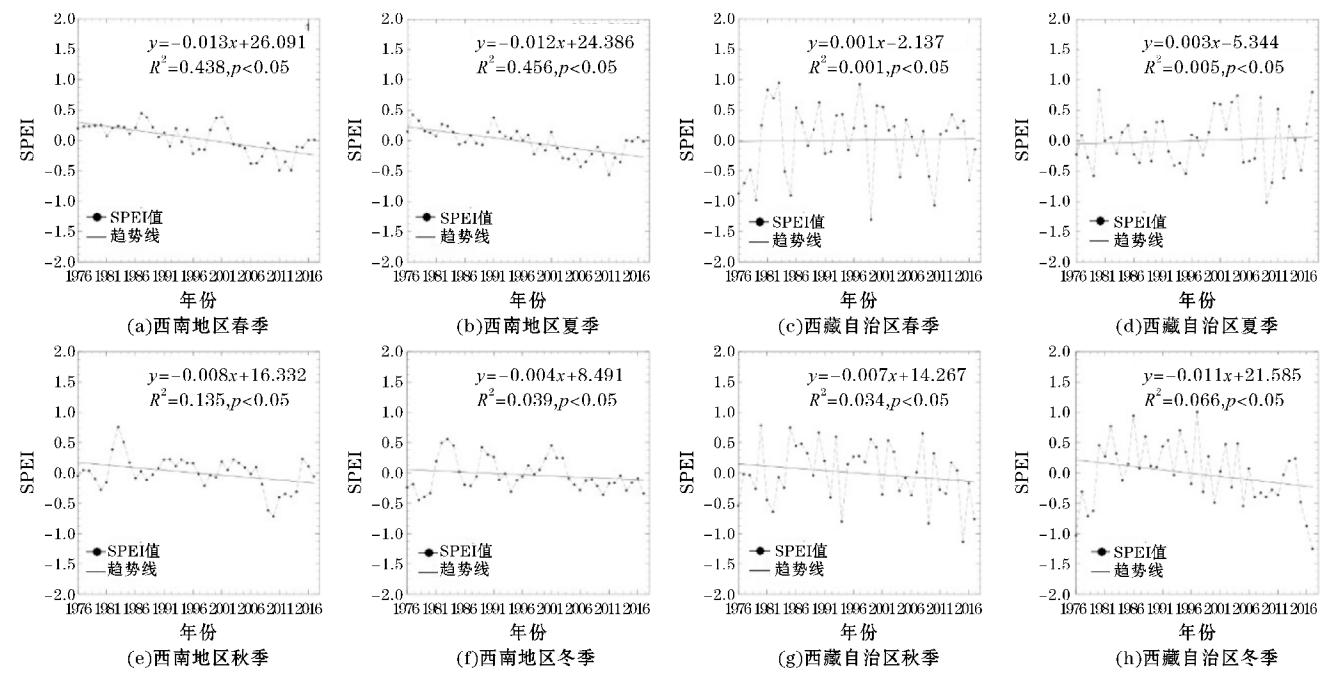


图 4 西南地区 and 西藏自治区 1976–2017 年四季的季节尺度 SPEI 变化

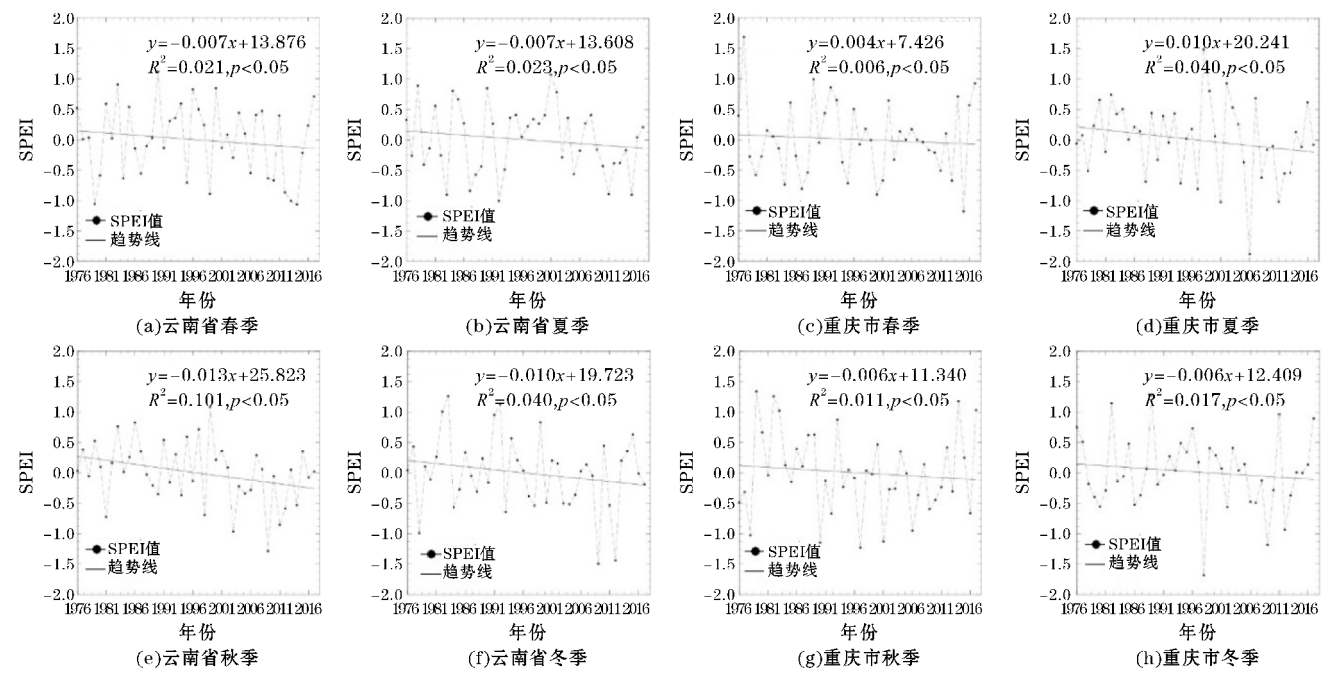


图 5 云南省和重庆市 1976–2017 年四季的季节尺度 SPEI 变化

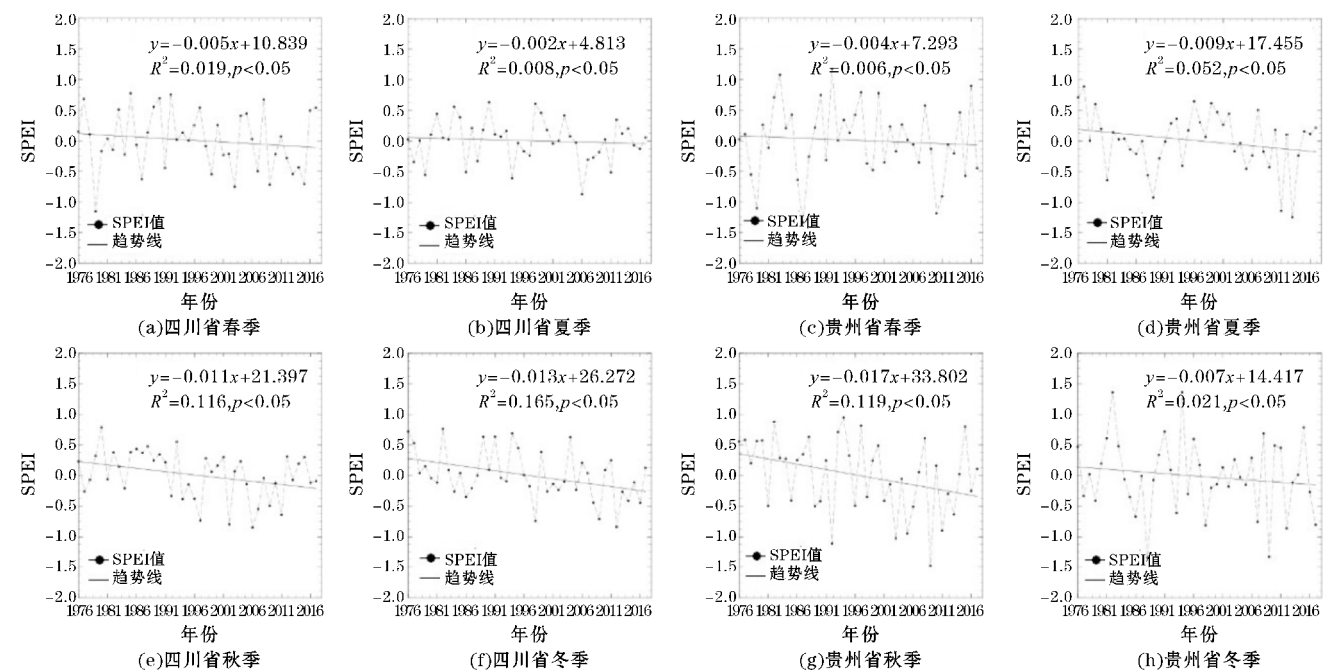


图6 四川省和贵州省1976–2017年四季的季节尺度SPEI变化

2.2 西南地区干旱的空间分布特征

2.2.1 干旱频率的季节空间分布

为了解各季节旱情在西南地区的空间分布情况,对西南地区116个气象站1976–2017年各季节的平均干旱频率进行统计,结果见图7所示。可以看出,春旱

主要发生在云南省大部、四川省中东部和重庆北部,春旱发生频率最大的地区为元江(云南省)和叙永(四川省),达到37%左右,其次为阆中(四川省),达到35%以上;西藏地区总体而言春旱发生频率低于其他4省市。夏旱发生频率总体偏高,发生频率相对较低的地区亦可达到25%以上,旱情主要发生在四川省北部、

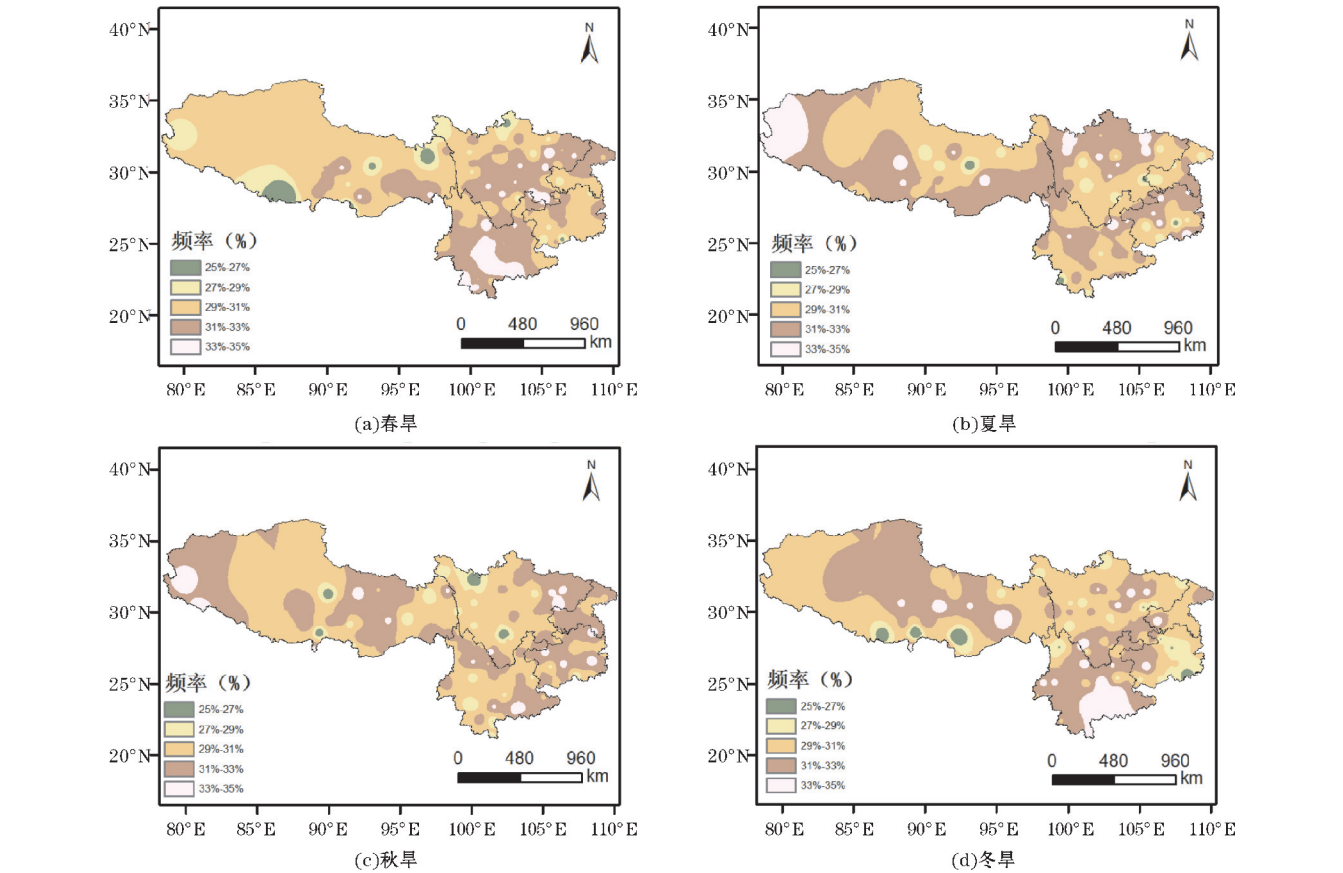


图7 西南地区1976–2017年各季节干旱频率空间分布

云南省中部和贵州省北部,发生频率最高的站点为会泽(云南省),达到 36%,此站点的春旱频率亦达到 33%,反映出该区域干旱事件发生频繁、持续时间长的特征,与该地区实际情况相符合。此外西藏西部和南部地区也表现出较高的夏旱频率,这可能与 SPEI 指数对干旱半干旱地区的气温异常过于敏感有关。秋旱主要发生在西藏申扎、安多和嘉黎地区,四川省阆中、遂宁、南充和巴中地区,贵州省凯里、安顺和毕节以及云南省丽江、江源、蒙自和燕山地区,这些地区的干旱事件发生频率达到 35% 以上,秋旱整体上显示出由西向东从多-少-多-少-多发展的趋势,并且以四川盆地为中心向东部和南部扩展。冬旱主要发生在云南省大部分地区、四川省南部、西藏中部和北部地区,以及贵州的东部,且云南南部的大部分地区和云南与四川、贵州

3 省的交界区域发生较为频繁,云南南部地区的发生频率达到 35%。

2.2.2 不同等级干旱频率和强度的空间分布

将月尺度 SPEI 指数连续低于-0.5 的月份达到或超过 3 个月定义为一次连续干旱过程,对 116 个测站连旱发生频率进行统计,并对连续 3 个月及以上的 SPEI 均值和累积概率按照干旱等级划分标准进行轻旱、中旱、重旱和特旱强度的统计,进而可对西南地区不同等级的干旱强度进行分析^[17]。图 8 为西南地区总体干旱频率和不同等级强度的干旱发生频率空间分布结果,由于特旱等级的旱情,即 SPEI 值低于-2.0 的干旱事件较为罕见,统计时段内普遍低于 2%,因此将特旱与重旱事件归并进行统计来反映极端干旱事件在西南地区的发生和分布情况。

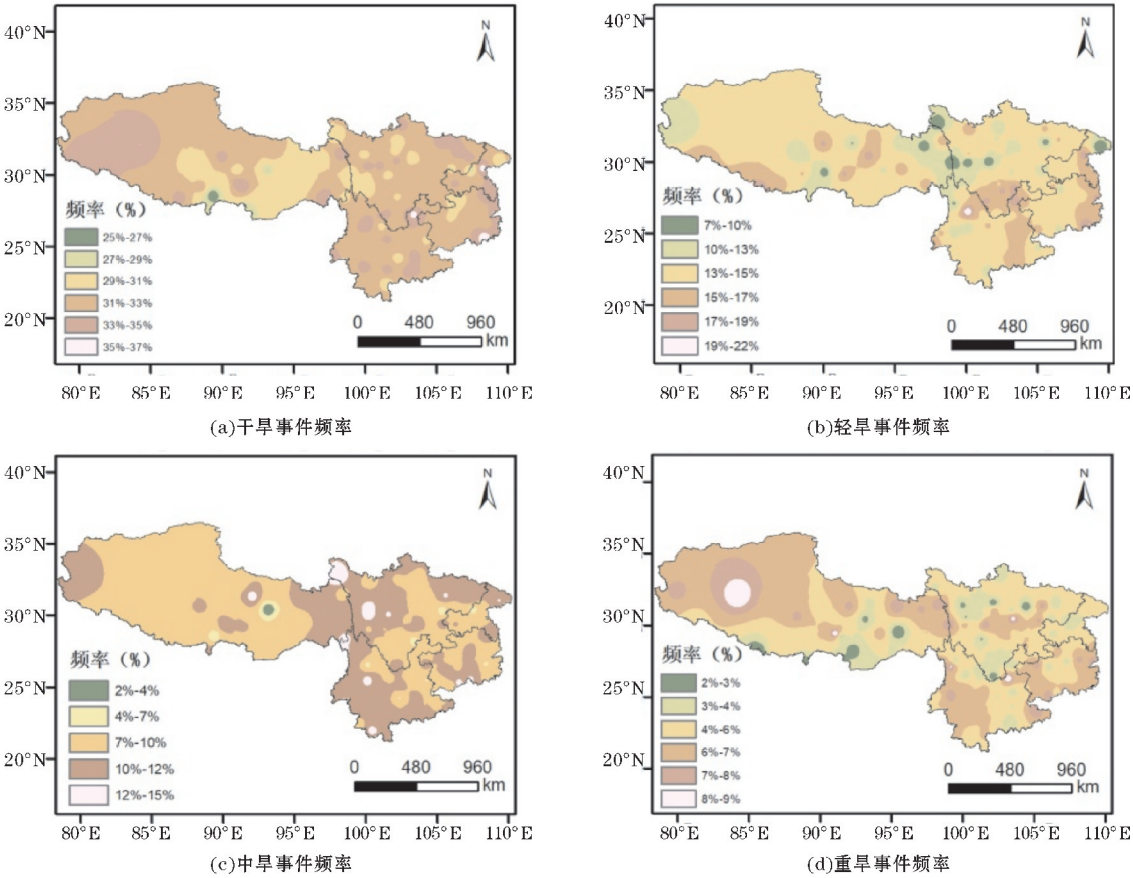


图 8 西南地区 1976-2017 年整体和不同等级强度干旱频率空间分布

可以看出,总体上西南地区干旱发生频率较高,介于 25% ~ 37%,频繁区域主要位于云南北部和东南部、四川中东部、贵州东部和重庆北部,发生频率较低的区域位于西藏的中南部。1976-2017 年,116 个测站的连旱发生频率中,最高的是位于贵州省东南部的榕江县、重庆市北部的万县区和云南省东北部的昭通市,干旱频率达 36% ~ 37%,干旱频率最低的是位于西藏自治区南部的江孜县,为 25%。各省市区的干旱发生频率和强度等级差异较为明显,体现出地理环境因素的差异对于干旱发生的潜在影响。其中西藏地区的干旱发生频率大体显现出从西向东先递减后增加的趋势,

轻旱发生频率空间分布较均匀,发生频次较高,中旱和重旱的发生频率由西向东呈现出两边高中间低的格局。对于云南省,其干旱事件主要以轻旱和中旱为主,重旱则发生较少,四川省的总体干旱事件发生频率平均在 30% 左右,干旱事件在四川东部盆地发生相对较多,而盆地北部的干旱频率有增加趋势,从干旱强度来看,四川盆地西部以轻中旱为主,东部相较而言重旱发生频率较高,并有增加趋势。云南和贵州在西南地区中干旱事件发生频率最高,部分地区达到 33% 以上,两省北部和东部的轻旱事件发生频率相对较高,西南部的中旱和重旱事件发生频率相对较高。

轻早在 3 种干旱等级中发生频率最高,其在整个西南地区的发生频率介于 7% ~ 22%,旱情主要集中在四川省南部、云南北部以及贵州和重庆东部,其中云南丽江地区的轻旱发生频率最高,达 22%,西藏东部到四川西部和重庆东北部的发生频率较低,其轻旱发生频率普遍低于 10%;中旱的高频区域空间分布最广,覆盖区域从西藏东部、四川西部一直到云南省南部,以及四川东北部、重庆北部和贵州南部,这些区域的中旱发生频率介于 10% ~ 15%;重旱在 3 种旱情中发生频率普遍最低,在整个西南地区的发生频率介于 2% ~ 9%,旱情主要集中在西藏东北部、四川中部、云南西南部以及贵州西南至东南部一带,体现出这一区域的主要旱情为中等以上强度的中旱、重旱甚至特旱。

3 结论与讨论

利用西南 5 省市区 1976–2017 年 116 个观测站数据,基于 SPEI 指数,对全球变暖背景下西南 5 省市区整体和单个区域进行了干旱时空变化分析,主要得到以下一些结论:

(1) 年际尺度上,从总体趋势来看,西南地区近 42 a 以来呈较为明显的干旱化趋势,以 2002 年为突变点,干旱趋势在 2002 年后明显增强。从各省的年代际变化趋势来看,以云南和贵州的干旱化趋势最为显著,其次是四川和重庆地区,西藏最不明显,20 世纪 90 年代之后极端干旱事件明显增多。季节尺度上,整个西南地区其 SPEI 值在春季和夏季干旱化趋势最为明显,秋季稍弱,冬季的干旱化趋势最弱。其中,西藏和四川的 SPEI 值在冬季下降最为明显,云南和贵州在秋季下降最为明显,重庆在夏季下降最为明显,对应的这些季节干旱化趋势明显。

(2) 空间变化上,整个西南地区的干旱发生频率较高,介于 25% ~ 37%,频繁区域主要位于云南北部和东南部,四川中东部,贵州东部和重庆北部,发生频率较低的区域位于西藏的中南部。春旱主要发生在云南省、四川省中东部和重庆北部;夏旱发生频率总体偏高,发生频率相对较低的地区亦可达到 25% 以上,旱情主要发生在四川省北部、云南省中部和贵州省北部;秋旱主要发生在西藏申扎、安多和嘉黎地区,四川省阆中、遂宁、南充和巴中地区,贵州省凯里、安顺和毕节以及云南省丽江、江源、蒙自和燕山地区;冬旱主要发生在云南省大部分地区、四川省南部、西藏中部和北部地区,以及贵州的东部,且云南南部的大部分地区和云南与四川、贵州 3 省的交界区域发生较为频繁,云南南部地区的发生频率达到 35%。轻早在 3 种干旱等级中发生频率最高,其在整个西南地区的发生频率介于 7% ~ 22%,中旱的高频区域空间分布最广,发生频率介于 10% ~ 15%,重旱在 3 种旱情中发生频率普遍最低,在整个区域内的发生频率介于 2% ~ 9%。

由于西藏西部是青藏高原的高海拔区,观测站大部分建站时间相对较晚,且站点匮乏,观测资料连续性相对较差,文中的西藏西部阿里和北部那曲地区总共只有 10 个站点,站点资料的缺乏势必会影响分析的结果。在将关于西藏的研究结果与中国气象灾害大典(西藏卷)^[12]和熊俊楠等^[18]利用遥感数据分析的西藏历史干旱监测结果进行对比后发现,其中西藏地区的全年干旱频率在空间分布上呈现出西高东低的特征,以及从不同等级干旱发生频率来看,日喀则市为轻旱,中旱和重旱易发区则集中于日喀则和昌都市中部及东部地区的这些结果是相符的,但在对四季干旱频率的计算中,存在春夏季干旱频率偏低,秋冬季频率较偏高,以及对重旱事件频率高频区西部范围较偏大等不一致的情况。在将西南其余四省市的结果与中国气象灾害大典(四川卷、云南卷、贵州卷、重庆卷)^[19–22]和相关发表文献^[9, 11, 23]进行对比后发现,其结果中西南地区近 42 a 以来呈现出较为明显的干旱化趋势,贵州和云南的干旱化趋势最为明显,西南地区整体和各省市区的季节变化趋势,以及干旱频率和干旱强度的空间分布趋势基本一致,但也存在西南地区整体干旱事件频率和大部分季节干旱频率偏低,部分省市区各季节干旱频率和干旱强度空间分布存在不一致的情况。

从研究结果综合来看,SPEI 指数基本能反映出干旱的时空变化趋势,具有较好的适用性,但对文中所选研究区由 SPEI 值计算的结果仍存在与实际灾情对比旱情相对偏轻的情况。对与实际灾情不符的地方探究原因后认为,首先可能与西部站点较稀疏缺乏有关,其次由于研究区地理位置非常特殊,占有中国 3 大阶梯的各一部分,地形地貌、气候水文与植被复杂多样,其形成干旱的原因也错综繁多,而在计算 SPEI 指数时仅使用考虑温度因素的 Thornthwaite 方法计算蒸散量还不够全面,可以在后续的研究中随着数据资料的丰富和完善而采用考虑风速、土壤、径流、植被等多种因素的由世界粮农组织(FAO)推荐的 Penman-Monteith 方法,并依据地形对研究区进行分区讨论,这样对 SPEI 指数的适用性判断和干旱监测评估将更准确,而这些都是有待后续进一步的研究和探讨。

参考文献:

- [1] 潘建华,刘晓琼. 四川省 2006 年盛夏罕见高温干旱分析[J]. 四川气象, 2006, 26(4): 12–14.
- [2] 王素萍,段海霞,冯建英. 2009/2010 年冬季全国干旱状况及其影响与成因[J]. 干旱气象, 2010, 28(1): 107–112.
- [3] 段海霞,王素萍,冯建英. 2010 年春季全国干旱状况及其影响与成因[J]. 干旱气象, 2010, 28(2): 238–244.
- [4] Chen Huopo, Sun Jianqi. Changes in drought characteristics over China using the Standardized Pre-

- precipitation Evapotranspiration Index [J]. Journal of Climate, 2015, 28(13): 5430–5447.
- [5] Xu Kai, Yang Dawen, Yang Hhanbo, et al. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961–2012: A climatic perspective [J]. Journal of Hydrology, 2015, 526: 253–264.
- [6] 郭燕云, 胡琦, 傅玮东, 等. 基于 SPEI 指数的新疆天山草地近 55 a 干旱特征 [J]. 干旱区研究, 2019(3): 670–676.
- [7] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policy Makers [M]. Paris: IPCC WGI Fourth Report, 2007: 195–199.
- [8] IPCC. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change, 2013: The Physical Science Basis: Summary of for Policy-makers. CE [EB/OL]. http://www.climate-change2013.org/images/uploads/WGIAR5-SPM_Approved27Sep2013.pdf, 2013–10–28.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 王东, 张勃, 安美玲, 等. 基于 SPEI 的西南地区近 53 a 干旱时空特征分析 [J]. 自然资源学报, 2014, 29(6): 1003–1016.
- [12] 刘光轩, 温克刚. 中国气象灾害大典 (西藏卷) [M]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [13] 赵济. 中国自然地理 (第 4 版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [14] 中国气象局. 气象干旱等级 (GB/T 20481–2017) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [15] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [16] 陈超, 庞艳梅, 潘学标. 近半个世纪以来四川盆地气温和降水的变化特征 [J]. 中国农业气象, 2010, 31(S1): 27–31.
- [17] 周丹, 张勃, 任培贵, 等. 基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50 a 干旱特征分析 [J]. 自然资源学报, 2014, 29(4): 677–688.
- [18] 熊俊楠, 李伟, 刘志奇, 等. 基于多源数据的西藏东南部历史干旱监测与分析 [J/OL]. 干旱区地理, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20190517.1404.038.html>, 2019.
- [19] 刘建华, 温克刚. 中国气象灾害大典 (云南卷) [M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [20] 罗宁, 温克刚. 中国气象灾害大典 (贵州卷) [M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [21] 詹兆渝, 温克刚. 中国气象灾害大典 (四川卷) [M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [22] 马力, 温克刚. 中国气象灾害大典 (重庆卷) [M]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [23] 姚玉璧, 张强, 王劲松, 等. 气候变暖背景下中国西南干旱时空分异特征 [J]. 资源科学, 2015, 37(9): 1774–1784.

Analysis on Spatial and Temporal Variations of Drought in Southwest of China in Recent 42 Years based on SPEI Index

HUANG Jian^{1,2}, LI Xiehui¹, WANG Lei¹, CHEN Zifan¹

(1. College of Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Ganzhou Meteorological Bureau, Ganzhou 341100, China)

Abstract: In order to study the drought disaster in southwest China under the background of global warming since the 21st century, applying the 116 observation stations daily data of 5 provinces and cities in southwest China from 1976 to 2017, based on SPEI index, linear trend method, M-K mutation test and spatial interpolation, the spatial and temporal variation characteristics of the total southwest China and single province and city were analyzed on annual and seasonal scale by calculating drought frequency and drought intensity of different grades. Conclusions drawn are as follows: the drought trend in southwest China has been obvious in recent 42 years, with 2002 as the mutation point, the drought trend increased significantly after 2002. The drought trend in Yunnan and Guizhou were most significant, followed by Sichuan and Chongqing, Tibet was the least obvious, and the extreme drought events increased significantly after the 1990s. The frequency of drought was relatively high in the whole southwest region. The high frequency regions were mainly located in the north and southeast of Yunnan, the middle and east of Sichuan, the east of Guizhou and the north of Chongqing, and the low frequency regions were mainly located in the south-central part of Tibet. The frequency of light drought was the highest among the three drought grades, the high frequency region of middle drought has the most wide distribution in space, and the frequency of heavy drought was the lowest among the three drought conditions. Generally, SPEI index can basically reflect the spatial and temporal variation trends of drought in southwest china and it has good applicability, but there is still a relatively lighter judgment than the actual drought situation.

Keywords: applied meteorology; meteorological disasters; SPEI index; M-K test; spatial and temporal variations; drought frequency; southwest of China