

西南地区 1902—2018 年干旱时空演变特征分析

靖娟利^{1,2}, 和彩霞¹, 王永锋^{1,2}, 马炳鑫¹, 刘兵¹

(1. 桂林理工大学 测绘地理信息学院, 广西 桂林 541004; 2. 广西空间信息与测绘重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘 要: 鉴于西南地区干旱的危害程度及其严峻形势, 定量刻画干旱时空特征、揭示干旱发展规律, 已成为抗旱防灾、保障农业健康发展的迫切要求。基于 1902—2018 年标准化降水蒸散指数 (SPEI) 数据, 统计了西南地区不同等级干旱发生频率及干旱强度, 并采用 Sen 趋势分析、Mann-Kendall 检验法和经验正交函数 (EOF) 分析方法研究了西南地区干旱的时空演变特征, 以为西南地区干旱变化及生态维护提供科学依据。结果表明: (1) 1902—2018 年西南地区 SPEI12 整体呈下降趋势, 下降速率为 0.025/10 a, 其中 1954—1974 年呈干旱—湿润的频繁交替, 发生多次不显著突变; (2) 西南地区干旱强度均呈增强趋势, 其中中旱和重旱强度增强趋势显著; (3) 西南地区干旱发生频率存在空间分布差异, 其中轻旱发生频率最高, 极端干旱最低; (4) 西南地区干旱变化趋势以不显著下降为主, 占研究区面积的 68.22%, 表明西南地区百年来呈干旱化趋势; (5) 干旱时空模态分析中, 3 种模态分别反映了研究区干旱全区相同、南北相反、东西相反的分布特征。综上所述, 揭示了西南地区干旱的时空变化基本特征。

关键词: 西南地区; 标准化降水蒸散指数; 干旱频率; Sen 趋势分析; Mann-Kendall 检验; 经验正交函数

中图分类号: P426.616

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)03-0220-08

Spatiotemporal Evolution Characteristics of Meteorological Drought in Southwest China from 1902 to 2018

JING Juanli^{1,2}, HE Caixia¹, WANG Yongfeng^{1,2}, MA Bingxin¹, LIU Bing¹

(1. College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin, Guangxi 541006, China)

Abstract: In view of the severity of drought in southwest China, it has become an urgent requirement to quantitatively characterize the spatio-temporal evolution of drought and reveal the law of drought development. Based on standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) data from 1902 to 2018, we counted the frequency and intensity of droughts of different grades in the southwestern region. Sen trend analysis, Mann-Kendall test and empirical orthogonal function analysis methods were used to study the temporal and spatial evolution characteristics of drought in southwest China in order to provide a scientific basis for drought changes and ecological maintenance in southwest China. The results show that: (1) the annual SPEI in southwest China from 1902 to 2018 showed a downward trend at a rate of 0.025/decade, among which there was a frequent drought-humidity alternation from 1954 to 1974, with multiple insignificant mutations; (2) the drought intensity in the southwestern region showed an increasing trend, among which the intensity of moderate drought and severe drought increased significantly; (3) the frequency of drought in southwestern region was different in spatial distribution, among which the frequency of light drought was the highest and the extreme drought was the lowest; the change trend was mainly insignificant decline, accounting for 68.22%, indicating an aridity trend in the southwest region over the past century; (5) in the analysis of drought spatiotemporal modalities, the three modes reflected the same, south-north and east-west distribution characteristics of drought in the study area, respectively. In summary, spatiotemporal evolution characteristics of meteorological drought in the southwest are revealed.

收稿日期: 2021-05-12

修回日期: 2021-06-08

资助项目: 国家自然科学基金(42161028, 42061059); 广西自然科学基金(2020GXNSFBA297160); 广西空间信息与测绘重点实验室项目(15-140-07-10)

第一作者: 靖娟利(1977—), 女, 陕西长安人, 硕士, 副教授, 主要从事资源环境遥感方面的研究。E-mail: 2003080@glut.edu.cn

通信作者: 王永锋(1977—), 男, 陕西合阳人, 硕士, 实验师, 主要从事环境遥感方面的研究。E-mail: 6605004@glut.edu.cn

Keywords: southwest China; standardized precipitation evapotranspiration index; drought frequency; Sen trend analysis; Mann-Kendall test; empirical orthogonal function

干旱作为全球最常见的自然灾害之一,具有发生频率高、持续时间长、影响范围广的特性,对社会经济发展和全球生态系统有着深刻的影响^[1]。干旱是我国最常见、影响最大的气象灾害,每年因干旱造成的粮食减产约占气象灾害粮食总损失的 50% 以上^[2]。资料^[3]显示西南地区 2009 年、2010 年的严重干旱导致 130.6 万人受灾,1 807.1 万人饮水困难,1 172.4 万头牲畜饮水困难,农作物受灾面积 584.1 万 hm^2 ,绝收面积 121.1 万 hm^2 ,经济损失达 286 亿元;2012 年、2013 年的干旱造成西南地区 2 938.7 万人受灾,725.9 万人饮水困难,329.4 万头牲畜饮水困难,农作物受灾面积 253.5 万 hm^2 ,绝收面积 28.4 万 hm^2 ,直接经济损失近 120 亿元。鉴于西南地区干旱的危害程度及其严峻形势,定量刻画干旱时空特征、揭示干旱发展规律,已成为抗旱防灾、保障农业健康发展的迫切要求^[4]。

目前使用较多的干旱指数有帕默尔指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)、标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, PSI)和标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)。因 SPEI 融合了降水和温度对于区域干旱的影响,同时具有多时间和多空间尺度的特性^[5],被广泛应用于干旱研究中。目前,西南地区干旱特征的研究已有不少,张雷等^[6]计算了 1961—2010 年云南省 SPEI,并对年干旱演变特征、干旱发生频次、干旱持续时间和干湿变化周期进行了分析。蔡娅娅等^[7]计算了 2001—2015 年贵州省 SPEI 并分析了其时空演变特征,认为贵州的西北地区易发生干旱,干旱空间分布差异大,黔西北、黔西南地区为易旱集中区。邢广君^[8]采用 SPEI 分析了 1960—2018 年贵州干旱变化趋势及未来变化趋势的持续性,得出贵州不同时间尺度 SPEI 序列呈显著下降趋势。黄健等^[9]基于 1976—2017 年西南地区的 SPEI,分析了西南地区干旱时空变化特征,认为西南地区近 42 a 以来呈较为明显的干旱化趋势。熊光洁等^[10]利用 1961—2016 年西南 4 省市的 SPEI 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^[11]基于 1960—2014 年西南地区 SPEI 对极端干旱事件的时间变化及持续性特征进行了分析。王东等^[12]利用西南地区 SPEI 分析了 1960—2012 年的干旱特征。

然而,以上研究计算 SPEI 指数时多采用 Thornth-

waite 方法计算潜在蒸散量,该方法仅考虑了温度因子,而 Penman-Monteith 方法在计算潜在蒸散量时综合考虑了气温、风速、日照和相对湿度,考虑的因子更全面,计算结果优于 Thornthwaite 方法;且研究区的区域范围多有不同,小区域范围较多,研究时间序列较短。因此本文基于 Penman-Monteith 法计算的 1902—2018 年西南地区 SPEI 数据集,通过计算不同等级干旱强度和干旱频率,并运用 Sen 趋势分析、Mann-Kendall(M-K)检验及 EOF 分析方法,分析西南地区干旱时空演变特征,以期对于干旱变化及生态维护提供科学依据。

1 研究区概况

西南地区位于中国西南部($97^{\circ}21'—112^{\circ}04'E$, $20^{\circ}54'—34^{\circ}19'N$),包含云南、贵州、四川、广西壮族自治区 4 个省级行政区和重庆市(图 1)。东临湖北和湖南,西紧邻西藏、缅甸,南与老挝、越南毗邻,并相临于北部湾和南海,北与青海、甘肃和陕西接壤。总面积为 137.63 万 km^2 ,占全国总面积的 14.33%。该区地跨中国地貌的三级阶梯,地形崎岖,地质地貌复杂,包括山地、高原、盆地及丘陵,是我国喀斯特地貌的集中分布区。地处北回归线附近,气候以亚热带季风气候和热带雨林气候为主,降水量充沛,雨热同季。气温、降水等气候因子从西北至东南呈现逐渐递增的现象,大部分地区冬暖夏热,年平均气温为 $4.3\sim 24.3^{\circ}\text{C}$,年均降水量为 $340\sim 2\,300\text{ mm}$,雨季多集中在 5—8 月。区内植被类型丰富,主要分布灌丛、针叶林、阔叶林、草丛和沼泽。区内生态环境脆弱,人口-资源-环境矛盾突出,属于全球变化的敏感地带。

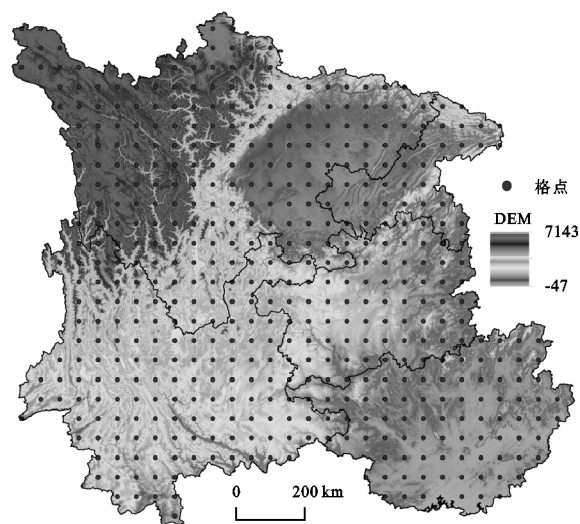


图 1 研究区 DEM 数据及格点分布

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文采用的 SPEI 数据来自 Global Drought Monitor(<http://spei.csic.es/index.html>), 包含 1901—2018 年的全球 SPEI 数据集, 存储格式为 .nc, 空间分辨率 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 。SPEI 计算过程如下: 首先基于 FAO-56 推荐的 Penman-Monteith 公式计算潜在蒸散量, 并计算逐月降水量与蒸散量的差值, 其次采用 log-logistic 概率分布函数计算水分亏缺量, 最后对累积概率密度进行正态标准化得到 SPEI 值^[13]。该数据集基于 CRU 资料构建, 闻新宇^[14]、陈发虎^[15]等运用该数据集对中国及中亚气候变化的研究, 确定 CRU 资料具有较高的可信度和适用性。SPEI 数据具有 1~48 个月的时间尺度, 其中 12 个月时间尺度的 SPEI 主要受到长期降水和气温的影响, 可以较好地反映干旱的年际变化趋势^[16], 故本文选取 SPEI12 数据集中每年的 12 月表示该年的 SPEI 值来研究 1902—2018 年西南地区的干旱时空演变。

因 SPEI 数据集的空间分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$, 故将每个像元当成一个站点来做后续研究, 研究区共包含 495 个像元, 见图 1。研究采用的 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/search>), 空间分辨率为 90 m。

2.2 研究方法

2.2.1 干旱强度 干旱强度是指所有天或月的综合气象干旱指数值在干旱过程内为轻度以上的干旱等级之和^[17], 用来评价研究区内干旱的严重程度。

$$S_{ij} = \sum_{i=1}^m |SPEI_i|$$

式中: j 表示年份; i 表示不同站点; m 为发生干旱的站数; $|SPEI_i|$ 表示 j 年 i 站发生干旱时 SPEI 的绝对值。S 的值越大, 说明干旱越强。本文根据 SPEI 值分成无旱、轻旱、中旱、重旱和极端干旱 5 个等级^[18-19], 计算了不同等级干旱发生强度, 干旱等级划分见表 1。

表 1 干旱等级划分

干旱等级	无旱	轻旱	中旱	重旱	极端干旱
SPEI	>0	$-1<SPEI\leq 0$	$-1.5<SPEI\leq -1$	$-2<SPEI\leq -1.5$	$SPEI\leq -2$

2.2.2 干旱频率 干旱频率是研究期内各站点发生干旱的年数占总年数的比例, 其值越大表明干旱发生越频繁。

$$F_i = \frac{n}{N} \times 100\%$$

式中: i 表示不同站点; n 为该站点发生干旱的年数; N 为研究总年数。

2.2.3 其他研究方法 Sen 趋势检验法是广泛应用于气象及水文过程的非参数趋势分析方法, 近年来也被应用于遥感时序数据趋势分析中^[20]。若趋势度 $\beta>0$, 表示在研究期内 SPEI12 随时间变化呈增长趋势; $\beta<0$, 则表示 SPEI12 随时间变化呈下降趋势。Mann-Kendall(M-K) 检验法对数据无需做特定的分布检验, 能够避免时间序列数据缺失对分析结果的影响, 且能剔除异常值的干扰^[13]。可用于检验各区域长时间序列的变化趋势, 定量反映变化趋势的显著性。本文分别对 SPEI12 时间和空间变化趋势进行 M-K 突变检验及显著性检验, 对统计量 Z 采用双边检验, 取值范围为 $(-\infty, +\infty)$, 通过查找正态分布表, 选取 $|Z|>1.96$ 时通过 $p<0.05$ 显著性检验。

经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分解是气候变化领域常用的时空分解方法^[4]。EOF 方法的基本原理是对包含空间点的场随时间变化进行分解, 将变量场时间和空间变化特征分离, 展开得到前几个特征向量, 用尽可能少的模态表达主要的时空变化特征^[21]。为研究西南地区干旱发生的时间变化规律和空间模态, 本文对 SPEI12 数据变量场进行 EOF 分解, 提取其主要空间模态及其对应时间系数, 揭示干旱的时空变化规律。

为了反映长期的干旱状况, 本文基于 12 个月尺度 SPEI 值提取干旱定量特征, 最终提取结果以反距离权重插值法进行空间展示。

3 结果与分析

3.1 干旱时间变化特征

对 SPEI12 取平均值, 得到西南地区 1902—2018 年 SPEI12 时间变化趋势。从图 2 可看出, SPEI12 均值在 $-1\sim 1$ 居多, SPEI12 整体呈下降趋势, 下降速率为 $0.025/10\text{ a}$, 通过 $p<0.1$ 显著性检验, 表明西南地区呈不显著干旱化趋势。1936 年、1939 年、2006 年、2009 年及 2011 年 SPEI12 值小于 -1 , 达到中旱以上; 其中 2011 年 SPEI12 值最小, 为 -1.512 , 达到重旱。这与查阅的文献^[2, 22-23]干旱结果基本相同, 说明 SPEI12 可以准确反映区域内干旱的年际变化特征。

从图 3 可知, 1902—1934 年 UF 曲线大于 0, 在 1920—1928 年超过了 0.05 显著性曲线, 说明在此时间段西南地区 SPEI12 上升趋势显著, 不易发生干旱。在 1934 年之后, UF 曲线均小于 0, 呈下降趋势; 其中 1942—1947 年、2013—2015 年超过了 0.05 显著性曲线, 表明在这两个时间段西南地区 SPEI12 呈显著下降趋势, 容易发生年际干旱。在 1932 年 UF 曲线和 UB 曲线第一次相交, 是突变的开始, 从湿润转

变成干旱,20 世纪 50 年代中期到 70 年代中期突变点较多,呈干旱—湿润的频繁交替现象,发生多次不显著突变,在 1974 年之后呈干旱化趋势。

3.2 干旱强度时间变化特征

为了进一步分析西南地区干旱变化趋势,本文对 1902—2018 年西南地区不同等级干旱强度进行了统计。从图 4 可以看出,4 个等级的干旱强度均呈增强趋势,其中中旱和重旱强度的增长趋势通过 $p<0.01$ 显著性检验,说明西南地区干旱在逐年加重。轻旱强度平均值为 76.024,整体在其平均值上下波动,1912 年、1940 年、1987 年、2001 年轻旱强度较大,尤以 1987 年为甚,达到 308.156。中旱强度在 20 世纪 50

年代前较弱,其值在 0~126 波动,在 20 世纪 60 年代之后,中旱强度显著增强,其中 1969 年、1992 年、2003 年中旱强度均超过 200;中旱强度的增长速率为 4.652/10 a,在 4 个等级干旱强度中增长最快。重旱强度呈阶段性增长,其增长速率为 4.149/10 a,位居第二;在 1930—1943 年、1958—1972 年、1986—1992 年和 2001—2014 年期间其强度较大,其中 2001—2014 年重旱强度最大。极端干旱强度相对来说较小,在 1906 年、1936—1945 年、1989 年、2006—2011 年极端干旱强度明显,其中 2011 年极端干旱强度最为显著,达到 460.137,与上文的 SPEI12 时间变化趋势基本相符。

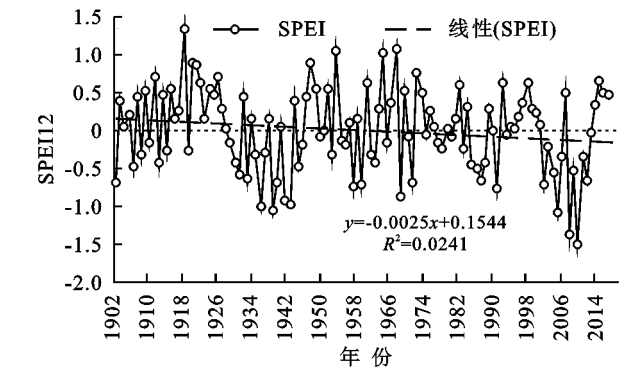


图 2 1902—2018 年西南地区 SPEI12 时间变化趋势

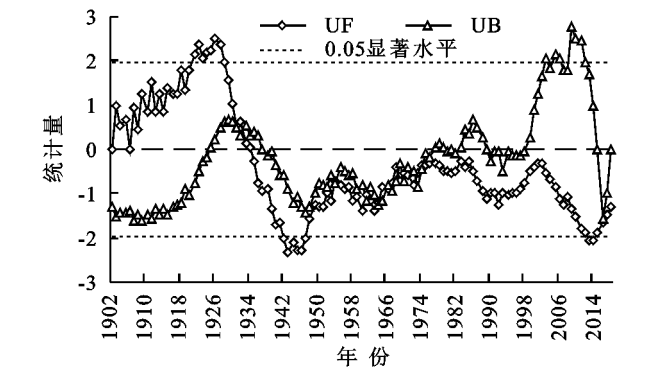


图 3 1902—2018 年西南地区 SPEI12 突变检验

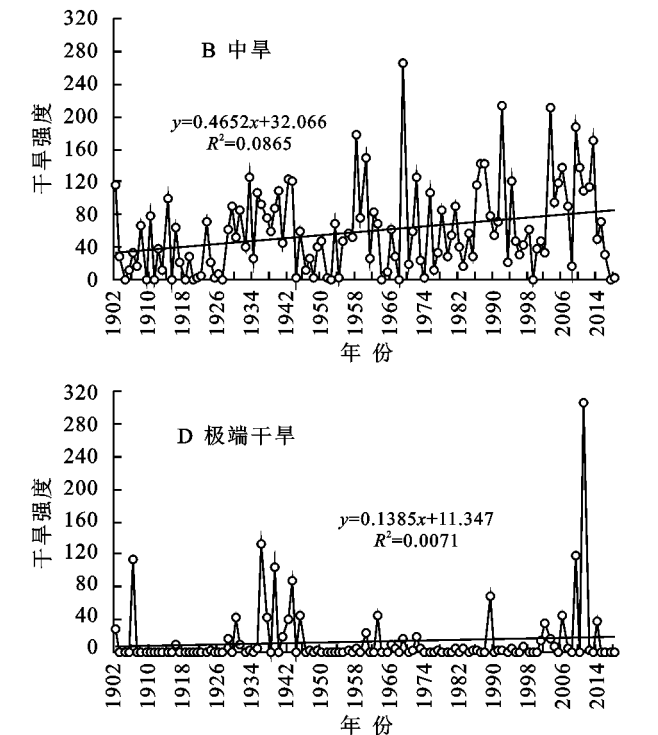
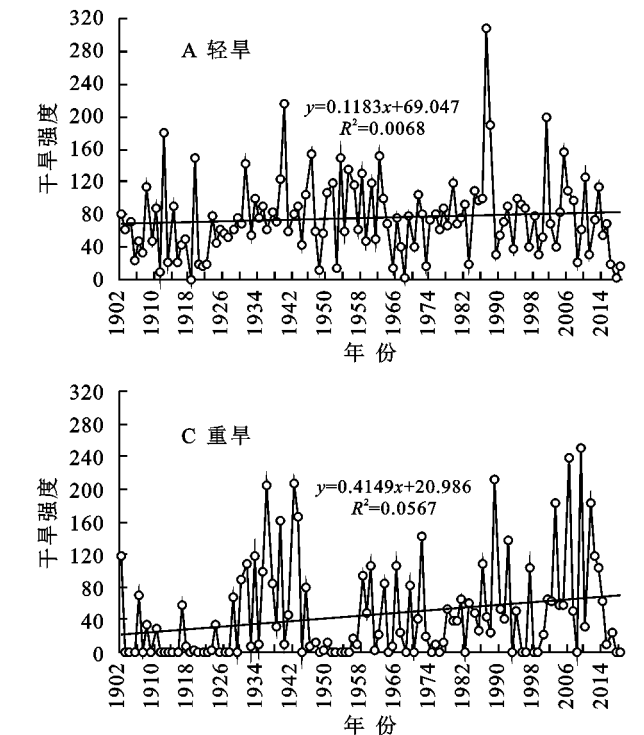


图 4 1902—2018 年西南地区不同等级干旱强度时间变化特征

3.3 干旱频率空间分布特征

从图 5 可以看出西南地区不同等级干旱发生频率存在显著的空间差异性。不同等级干旱发生频率依次为:轻旱>中旱>重旱>极端干旱,其中轻旱发

生频率为 22.26%~40.17%,而极端干旱发生频率为 0.06%~5.06%。轻旱发生频率较低的区域主要分布在若尔盖高原地区,其次为遵义、曲靖、黔西南及防城港地区;四川盆地一带、沙鲁里山、云南文山、贵州

毕节及广西丘陵发生轻旱的频率较高。中旱发生频率最高为 16.23%，主要分布在迪庆、丽江、凉山、攀枝花和昭通及重庆南部和遵义一带，南宁、普洱、怒江、阿坝州有少量分布；甘孜州、楚雄、文山和柳州发生中旱的频率较低，自南向北发生中旱的频率呈低—高一—低的趋势。重旱发生频率较低，最高仅为 11.09%，高值区主要分布在四川西北部的甘孜州和阿坝州、普洱、西双版纳、重庆东南部和广西梧州；四川盆地、云贵高原、广西南宁以西北地区发生重旱的频率较低，形成以研究区中心向四周发生重旱频率升高的现象。发生极端干旱的频率最低，最高仅为 5.06%，发生频率较高的区域主要分布在四川甘孜州西北部和云南

昆明、曲靖，云南普洱、广西来宾以东南、重庆及若尔盖高原地区发生极端干旱的频率较低，研究区从东南往西北发生极端干旱的频率升高。

整体上研究区南部的云南西部、广西发生中旱及以上干旱频率较低，尤其是广西发生极端干旱频率较低，其原因是广西南边与北部湾海域相邻，降水充沛，雨热同季，云南西部降水较广西少，但雨季显著，多集中在 5—8 月，故其发生极端干旱的频率较低。而四川西北部、云贵高原发生干旱频率较高，其原因是四川西北部地形复杂，山岭众多，其海拔多在 4 000~5 000 m，属高原高寒气候区，气候立体变化明显，冬寒夏凉，水热不足。

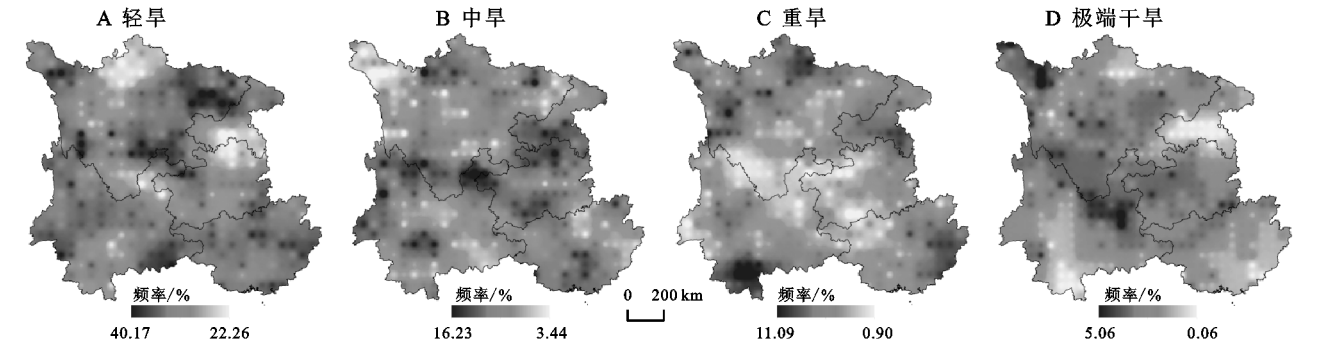


图 5 1901—2018 年西南地区不同等级干旱发生频率空间分布

3.4 干旱空间变化趋势特征

为了更好地揭示西南地区的干旱空间变化特征，对 SPEI12 进行趋势分析及显著性检验，并将干旱变化趋势划分为显著下降($\beta < 0, p < 0.05$)，不显著下降($\beta < 0, p \geq 0.05$)，不显著上升($\beta > 0, p \geq 0.05$)，显著上升($\beta > 0, p < 0.05$) 4 个等级。从图 6 可以看出西南地区干旱变化趋势以不显著下降为主，占研究区面积的 68.22%，说明西南大部分地区干旱化趋势不显著。其次是不显著上升趋势，占 17.41%，主要分布在广西东部的桂林—贵港—北海一带和四川西北部的甘孜州和阿坝州，重庆则有零星分布。显著下降趋势占研究区面积的 13.77%，主要分布在云贵高原的昭通—毕节—六盘水—文山一带，临沧有少量分布，表明云贵高原地区百年来干旱在持续加重。而显著上升区域仅占 0.61%，分布在广西贺州。以上分析表明，整体上广西干旱有所缓解，云贵高原干旱则有加重趋势。

3.5 干旱时空模态分析

对西南地区 495 个格点 1902—2018 年的 SPEI12 组成的矩阵进行经验正交分解，得到相互正交的特征向量，代表西南地区相互独立的旱涝空间分布类型。方差贡献率按照从大到小的顺序排列，贡献率越大的特征向量，其模态对应的旱涝分布形式越典型。每一模态的极大值中心就是旱涝变化的敏感中

心。时间系数可以作为空间系数的权重，来反映某一年对该种旱涝空间分布的贡献率大小。时间系数的绝对值越大，表示这一年该分布形式越典型^[5]。

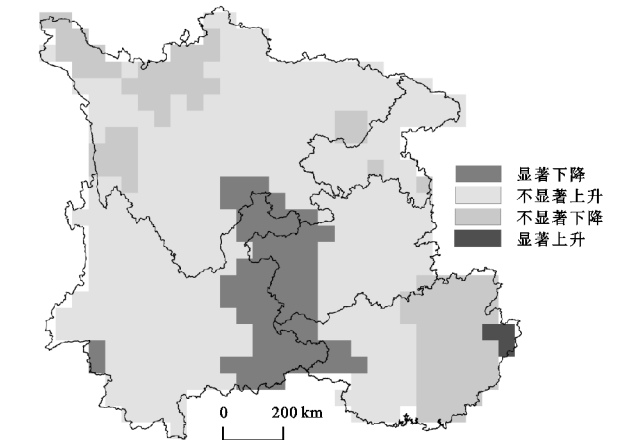


图 6 1902—2018 年西南地区 SPEI12 空间变化趋势

EOF 分析的前 3 个特征向量方差累计贡献率达到 65.36%，已经可以反映西南地区干旱发生的主要空间分布特征。其中第一特征向量的方差贡献率达到 34.00%，是西南地区干旱分布的最重要形式。从图 7 可以看出第一模态的空间分布自云贵高原中心向四周逐渐降低，且其值均为正值，表明西南地区干旱分布特征呈一致性，即整个地区偏干或偏湿。高值中心主要分布在凉山、攀枝花、楚雄、昆明、曲靖、昭通、毕节和六盘水，表示这些地区对干旱敏感。第一

模态对应的时间系数表明了这种分布特征随时间的变化情况。时间系数整体呈下降趋势,且通过 $p < 0.05$ 的显著性检验。时间系数为正值的年份二者乘积为正,表示该年研究区属于偏湿型,典型的年份为

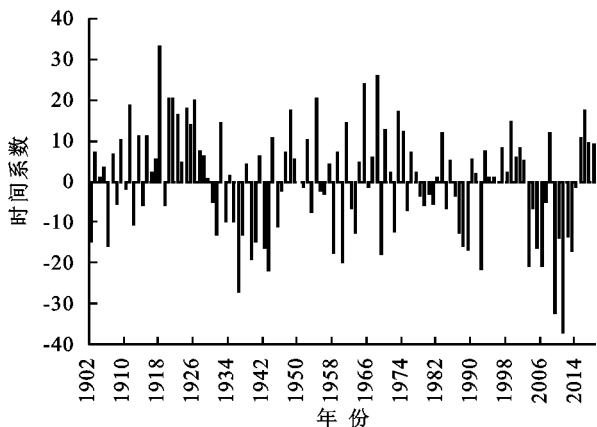


图7 1902—2018年西南地区干旱第一模态空间分布和对应的时间系数

第二特征向量的方差贡献率为18.72%,也是西南地区干旱空间分布比较重要的形式。从图8可以看出,第二模态在空间上以迪庆—凉山—昭通—毕节—贵阳—铜仁一带为界呈现南北相反的分布,空间系数的数值为南正北负。这种分布表明南北干湿相反,北部偏湿则南部偏干,反之北部偏干则南

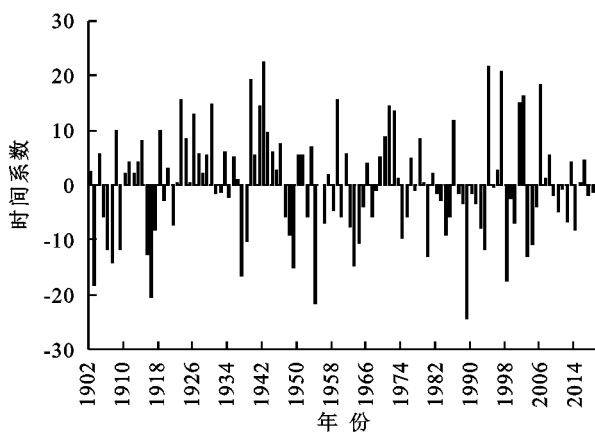
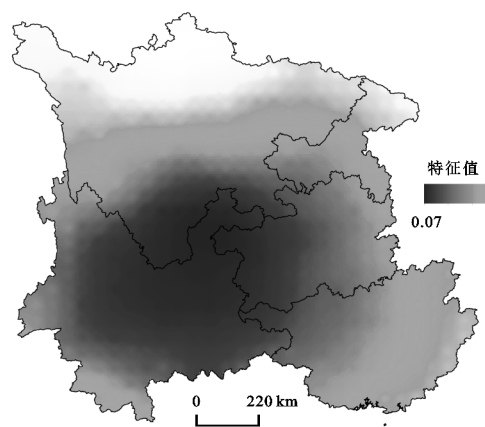


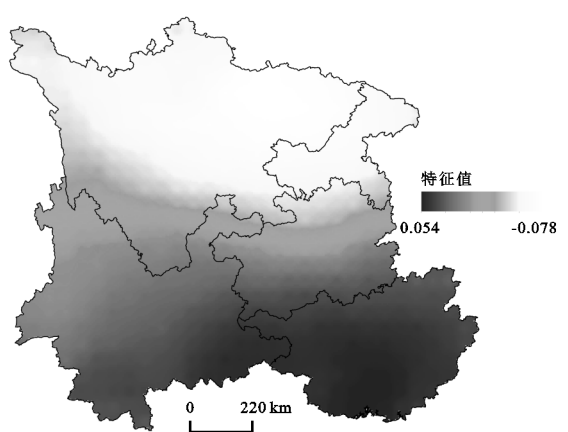
图8 1902—2018年西南地区干旱第二模态空间分布和对应的时间系数

第三特征向量的方差贡献率为12.64%,较前两特征向量贡献率较小,但其对应的空间模态也能对西南地区干旱的空间分布做出一定的解释。从图9可以看出,第三模态在空间上以文山—曲靖—昭通—乐山—雅安—甘孜为界呈东西相反的分布,空间系数的数值为东正西负,这种分布表明东西干湿相反,东部偏湿则西部偏干,反之东部偏干则西部偏湿。东部空间系数为正的高值中心主要分布在黔东南、柳州、桂林等区域,西部的迪庆、怒江和丽江周围则是空间系数为负的集中区。东湿西干的典型年份有1920年、1935年、1994年、2014年,而东干西湿的典型年份有1928年、1966年、1991年,其中该分布最为典型的是1928年。

1918年、1965年、1968年。时间系数为负的年份表示该年研究区属于偏干型,典型年份为1936年、2009年、2011年。这与2009—2010年西南地区发生特大干旱事件相符。



部偏湿。南部空间系数为正的高值中心主要以广西为主,自广西向西逐渐减小。北部以四川盆地为中心的区域是空间系数为负的集中区。南湿北干的典型年份有1939年、1942年、1994年、1997年、2006年,而南干北湿的典型年份有1916年、1954年、1998年、1989年。



4 讨论与结论

4.1 讨论

本文分析 SPEI12 时间变化特征,表明西南地区呈干旱化趋势,尤以1936年、1939年、2006—2009年、2011年的干旱显著,其中2011年的干旱最为显著。该结论与贾艳青等^[24]、王东等^[12]和史晓亮等^[16]的研究结果相符,徐海亮^[25]和崔立鲁等^[26]认为这些年份的干旱主要是由严重少雨引起,2009—2011年降水最少而气温较往年偏高,黄荣辉等^[2]通过成因分析确定2009—2010年西太平洋的异常环流造成我国西南地区气流异常,从而导致水汽难以到达云贵高

原,引起了此区域降水长期偏少。本文研究不同等级干旱强度均呈增强趋势,该结果与王秋云等^[27]的结论一致,其认为西南地区干旱强度在逐渐增强且中部干旱强度增强最明显,东部次之,西部最弱。贺晋云等^[28]研究表明极端干旱频率呈减少趋势,贾艳青

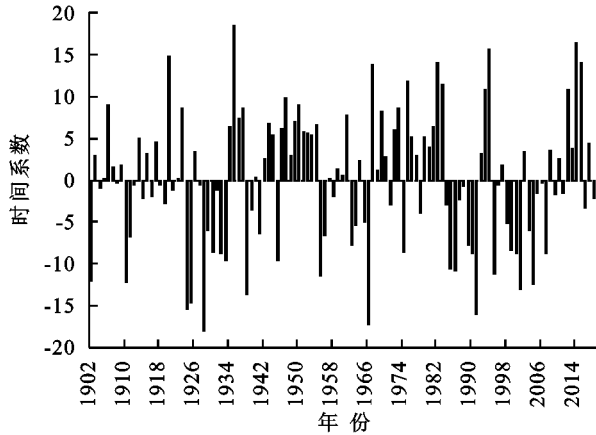


图 9 1902—2018 年西南地区干旱第三模态空间分布和对应的时间系数

西南地区地理位置特殊,地跨我国地貌的三级阶梯,地形崎岖,地质地貌复杂,影响干旱的因子较多,气温和降水是其主要影响因素,但喀斯特地貌、青藏高原产生的南支槽、厄尔尼诺与南方涛动(ENSO)和大气环流等因素对西南干旱也有影响。王东等^[12]研究 ENSO 事件与西南干旱的相对应关系,确定全球 ENSO 事件对西南干旱的发生具有一定的影响。本文所使用的 SPEI12 计算了年尺度的地表水分亏损量,但其还不能完整的说明干旱发生的机制,今后还需深入研究西南干旱的成因。

4.2 结论

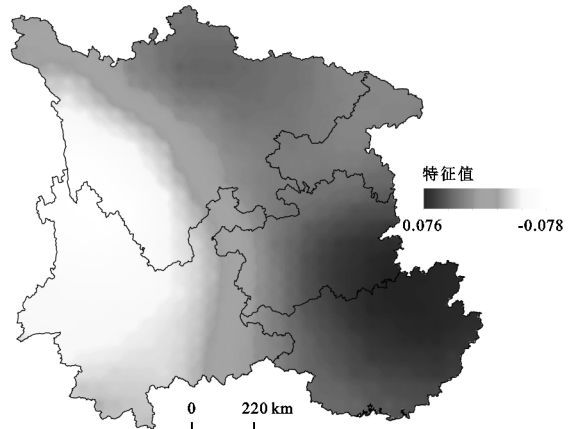
(1) 在时间变化上,西南地区 SPEI12 整体呈下降趋势,下降速率为 $0.025/10\text{ a}$,表明西南地区呈不显著干旱化趋势、尤以 1936 年、1939 年、2006 年、2009 年及 2011 年的干旱最为显著;M-K 突变检验表明在 1932 年西南地区从湿润转变成干旱,在 1954—1974 年期间呈干旱—湿润的频繁交替现象。

(2) 干旱强度时间变化上,西南地区干旱强度均呈增强趋势,其中中旱和重旱强度的增长速率尤为显著,表明西南地区干旱随时间推移并未得到缓解,其中 2011 年的干旱最为显著,中旱、重旱和极端干旱强度均超过 100,极端干旱强度达到 460.137。

(3) 干旱频率空间分布上,轻旱发生频率最高,在 $22.26\%\sim 40.17\%$ 之间波动,极端干旱发生频率最低;不同等级干旱发生频率存在空间分布差异,整体上研究区南部的云南西部、广西发生中旱及以上干旱频率较低。

(4) 干旱变化趋势分析表明,西南地区干旱变化趋势以不显著下降为主,占研究区面积的 68.22% ,说明西南大部分地区干旱化趋势不显著,显著下降的区

等^[11]认同其结论并认为极端干旱强度和持续时间呈减少的趋势,极端干旱程度总体减弱。本研究结果与其相反,出现该结果的原因可能是贾艳青等基于日 SPEI 且研究年限仅为 55 a,而本文基于年尺度 SPEI,时间尺度较长且研究年限为 117 年。



域主要分布在云贵高原中部。

(5) 干旱时空模态分析中,第一模态方差贡献率为 34.00% ,表现为全区一致型变化;第二模态方差贡献率为 18.72% ,反映了研究区南北干湿相反的特征;第三模态方差贡献率为 12.64% ,反映了研究区东西干旱分布相反的情况。

参考文献:

- [1] 王飞,丁建丽,魏阳.“一带一路”国家和地区百年尺度干旱化特征分析[J].地球信息科学学报,2017,19(11):1442-1455.
- [2] 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.
- [3] 王嘉媛,胡学平,许平平,等.西南地区 2 次秋冬春季持续严重干旱气候成因对比[J].干旱气象,2014,33(2):202-212.
- [4] 沈国强,郑海峰,雷振锋.基于 SPEI 指数的 1961—2014 年东北地区气象干旱时空特征研究[J].生态学报,2017,37(17):5882-5893.
- [5] 张玉静,王春乙,张继权.基于 SPEI 指数的华北冬麦区干旱时空分布特征分析[J].生态学报,2015,35(21):7097-7107.
- [6] 张雷,王杰,黄英,等.1961—2010 年云南省基于 SPEI 的干旱变化特征分析[J].气象与环境学报,2015,31(5):141-146.
- [7] 蔡娅娅,谭伟.贵州省 2001—2015 年植被覆盖 NDVI 时空演变及其对 SPEI 的响应[J].农业工程,2019,9(3):30-39.
- [8] 邢广君,崔弼峰.贵州省干旱变化特征及其与大气环流关系[J].南水北调与水利科技,2019,17(6):75-85.
- [9] 黄健,李谢辉,王磊,等.基于 SPEI 指数的西南地区近 42 a 干旱时空变化分析[J].成都信息工程大学学报,2020,35

(3):359-366.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010,23(7):1696-1718.

[14] 闻新宇,王绍武,朱锦红,等.英国 CRU 高分辨率格点资料揭示的 20 世纪中国气候变化[J].大气科学,2006,30(5):894-904.

[15] 陈发虎,黄伟,靳立亚,等.全球变暖背景下中亚干旱区降水变化特征及其空间差异[J].中国科学:地球科学,2011,41(11):1647-1657.

[16] 史晓亮,吴梦月,丁皓. SPEI 和植被遥感信息监测西南地区干旱差异分析[J].农业机械学报,2020,51(12):184-192.

[17] 万红莲,王静.多尺度下宝鸡地区干旱动态格局演变及其与植被覆盖的关系[J].生态学报,2018,38(19):6941-6952.

[18] 师玉锋,梁思琦,彭守璋.1901—2017 年黄土高原地区气候干旱的时空变化[J].水土保持通报,2020,40(1):283-289,325.

[19] 刘世梁,田韞钰,尹洁洁,等.云南省植被 NDVI 时间变化特征及其对干旱的响应[J].生态学报,2016,36(15):4699-4707.

[20] 温庆志,孙鹏,张强,等.基于多源遥感数据的农业干旱监测模型构建及应用[J].生态学报,2019,39(20):7757-7770.

[21] 裴琳,严中伟,杨辉.400 多年来中国东部旱涝型变化与太平洋年代际振荡关系[J].科学通报,2015,60(1):97-108.

[22] 段海霞,王素萍,冯建英.2012 年全国干旱状况及其影响与成因[J].干旱气象,2013,31(1):220-229.

[23] 王素萍,段海霞,冯建英.2013 年春季全国干旱状况及其影响与成因[J].干旱气象,2013,31(2):441-449.

[24] 贾艳青,张勃,马彬,等.1960—2015 年中国西南地区持续性干旱事件时空演变特征[J].干旱区资源与环境,2018,32(5):171-176.

[25] 徐海亮.六十年来西南地区气象干旱灾害及气候环境变化[J].玉溪师范学院学报,2020,36(3):92-103.

[26] 崔立鲁,宋哲,邹正波,等.基于 GRACE 的 2009—2010 年西南地区特大干旱分析[J].人民长江,2020,51(7):13-19.

[27] 王秋云,蔡艺友,方文维,等.西南地区 1971—2012 年干旱变化特征分析[J].陕西气象,2020(6):30-35.

[28] 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.



(上接第 219 页)

[10] 谢文强,蔡国军,王睿,等.基于 CPTu 数据的黏性土不排水抗剪强度神经网络预测[J].土木工程学报,2019,52(S2):35-41.

[11] 许健,冯灿,王掌权.基于 BP 神经网络的重塑黄土冻融过程抗剪强度劣化特性研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(6):13-17.

[12] Wang Y M, Traore S, Kerh T. Neural network approach for estimating reference evapotranspiration from limited climatic data in Burkina Faso[J]. Wseas Transactions on Computers, 2008,7(6):704-713.

[13] Traorea S, Wang Y M, Kerh T. Artificial neural network for modeling reference evapotranspiration complex process in Sudano-Sahelian zone[J]. Agricultural Water Management, 2010,97(5):707-714.

[14] Huang G B, Zhu Q Y, Siew C K. Extreme learning machine: theory and applications[J]. Neurocomputing, 2006,70:489-501.

[15] Zhu B, Feng Y, Gong D Z, et al. Hybrid particle swarm optimization with extreme learning machine for daily reference evapotranspiration prediction from limited climatic data[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020,173:1-13.

[16] 冉赓义,肖璐,崔宁博,等.基于广义回归神经网络模型模拟夏玉米蒸发蒸腾量[J].中国农村水利水电,2020(2):93-99.

[17] 张智韬,劳聪聪,王海峰,等.基于 FOD 和 SVM-DA-RF 的土壤有机质含量高光谱预测[J].农业机械学报,2020,51(1):156-167.

[18] 展超.基于 BP 神经网络的富水砂层渣土改良试验效果预测[J].隧道建设(中英文),2020,40(7):988-996.

[19] 王杰,毕浩洋.一种基于粒子群优化的极限学习机[J].郑州大学学报:理学版,2013,45(1):100-104.

[20] 张念,崔宁博,赵璐,等.基于 PSO-ELM 的温室梨枣树液流量模拟[J].灌溉排水学报,2019,38(8):1-8.

[21] 张颖,李梅.基于粒子群优化极限学习机的水质评价新模型[J].环境科学与技术,2016,39(5):135-139.

[22] 王新民,万孝衡,朱阳亚,等.基于 PSO-ELM 的建筑物爆破震动速度预测[J].科技导报,2014,32(19):15-20.

[23] 陆业奇.含水率对黏土与混凝土接触面抗剪强度影响研究[J].水力发电,2018,44(12):126-129.