

中国亚热带干旱多尺度时空格局及演变趋势

尹世燕^{1,2,3}, 毛方杰^{1,2,3}, 周国模^{1,2,3}, 杜华强^{1,2,3},
李雪建^{1,2,3}, 陈琦^{1,2,3}, 闫梦洁^{1,2,3}

(1.浙江农林大学 亚热带森林培育国家重点实验室, 杭州 310000; 2.浙江农林大学
浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点试验, 杭州 310000; 3.浙江农林大学 环境与资源学院, 杭州 310000)

摘 要:为探讨不同时间尺度下中国亚热带区域干旱的时空特征,利用 1 km 气象数据计算 1959—2019 年亚热带区域标准化降水蒸散发指数(SPEI),并且结合干旱线性变化趋势、影响范围、强度及频率,分析了不同时间尺度(1 月、3 月、6 月、12 月)下中国亚热带区域干旱的时空特征。结果表明:(1) 干旱时期主要集中在 2004—2014 年,干旱化区域空间上呈现明显的东西对比,时间尺度上秋季的干旱化趋势最为显著;(2) 各时间尺度的干旱影响范围都处于不断波动上升的趋势,尤其是在 1995 年之后,干旱影响范围上升趋势尤为明显;(3) 季节和干湿季较大干旱强度零星分布在亚热带西南部及湖南、江西等省,年际较大干旱强度则主要集中在亚热带东南部;(4) 秋季发生干旱的频率最高,年际发生中度及以上干旱频率最高,春季高频中度及以上干旱频率集中在四川、西藏等地,秋季和年际主要集中在四川、重庆和贵州的交界处,夏季、冬季以及干湿季则零星分布在亚热带各省份。综上,亚热带总体呈现干旱化趋势,季节、干湿季和年际尺度的干旱影响范围时间序列变化趋势较为相似,但干旱强度和干旱发生频率在空间上存在一定差异。

关键词:亚热带; 干旱; SPEI; 多尺度; 时空特征

中图分类号:P426; P429

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0242-12

Multi-scalar Spatiotemporal Pattern and Evolution Trend of Drought in Subtropical China

YIN Shiyao^{1,2,3}, MAO Fangjie^{1,2,3}, ZHOU Guomo^{1,2,3}, DU Huaqiang^{1,2,3},
LI Xuejian^{1,2,3}, CHEN Qi^{1,2,3}, YAN Mengjie^{1,2,3}

(1.State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University,
Hangzhou 310000, China; 2.Zhejiang Province Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest
Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A&F University, Hangzhou 310000, China;
3.School of Environment and Resources Science, Zhejiang A&F University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: In order to investigate the spatio-temporal characteristics of drought in subtropical regions of China at different time scales, standardised precipitation evapotranspiration index (SPEI) was calculated using 1 km meteorological data from 1959 to 2019, and the linear variation trend, influence area, intensity and frequency of drought were combined. The temporal and spatial characteristics of drought in subtropical regions of China under different time scales (1, 3, 6, 12 months) were analysed. The results are as follows: (1) The drought period is mainly concentrated in 2004—2014, the spatial contrast between the east and the west of the drought area is obvious, and the drought trend in autumn is the most significant on the time scale; (2) The drought area is fluctuating with an increasing trend, especially obvious after 1995; (3) The time scalar of seasons and dry/wet seasons with high drought intensity has scattered distribution in Hunan Province, Jiangxi Province, and other southwestern provinces. The high intensity of yearly scalar is mainly concentrated in the southeast of the subtropical China; (4) droughts most frequently occurred in autumn, and the frequency of mid-above drought in interannual is the highest. In spring, the frequency of mid-above

收稿日期:2021-09-17

修回日期:2021-10-01

资助项目:国家自然科学基金(31901310,31670644,31800538,U1809208);浙江农林大学科研发展资助项目(2017FR042)

第一作者:尹世燕(1997—),女,安徽马鞍山人,在读硕士,研究方向为森林经理学。E-mail:18255556196@163.com

通信作者:毛方杰(1988—),男,浙江杭州人,博士,副教授,主要从事森林碳汇和模型模拟研究。E-mail:mfangjie@gmail.com

drought is concentrated in Sichuan Province and the Tibetan Autonomous Region. In autumn and inter-annual, it is mainly concentrated in the junction of Sichuan Province, Chongqing City and Guizhou Province. In summer, winter and dry/wet seasons, it is scattered in subtropical provinces. Above all, subtropical China generally presents a trend of aridification. The time series of seasonal, dry/wet seasons, and the inter-annual have similar trends in drought influence area, but the intensity and frequency have some differences throughout the whole study area.

Keywords: subtropical; drought; SPEI; multi-scalar; spatiotemporal characteristics

气象干旱是指某时段,由于蒸发量和降水量的收支不平衡,水分支出大于收入而造成的水分短缺现象。干旱虽然仅占世界全部自然灾害的5%,但其带来的损失却占全部自然灾害造成损失的30%^[1]。而中国是受干旱最严重的国家,年均受旱面积约为 $21.57 \times 10^5 \text{ km}^2$,总受灾面积的55%^[2]。亚热带具有明显的季风特征,降雨具有明显季节和年际变化,加之全球气候变化的影响,使得过去几十年来极端天气事件频发,尤其是极端干旱,造成的社会经济损失巨大,仅2016年西南地区的秋季极端干旱就已造成17.4万人受灾,直接经济损失1400余万元^[3]。

干旱评价历来是国内外研究的热点。目前干旱评价指标主要有综合气象干旱指数(CI)、Palmer干旱指数(PDSI)、标准化降水指数(SPI)和标准化降水蒸散指数(SPEI)等。CI指数既反映短时间尺度(月),又反映长时间尺度(季)降水量气候异常情况,适合实时气象干旱监测和历史同期气象干旱评估^[4],谢五三等^[5]基于CI指数获得淮河流域的历年干旱日数与受灾面积和成灾面积的相关性通过了0.01的显著性水平检验,表明CI指数在淮河流域具有较好的区域适应性;PDSI指数表征一段时间内实际水分供应持续少于当地气候适宜水分供应的水分亏缺,适用于月尺度的水分盈亏监测和评估^[6],Jia等^[7]利用1951—2012年PDSI长期月自校准数据,研究了中国西部地区干旱的时空变化特征;SPI指数该计算简单,仅考虑降水因素,且具有多时间尺度^[8],Sobral等^[9]描述1979—2009年里约热内卢州年度SPI指数的变化,并与ENSO事件结合分析里约热内卢州的干旱时空变化特征。然而,CI指数权累积过程中容易出现不合理旱情加剧的问题;PDSI指数权重因子来源于美国中西部的站点,使得该指数在全球不同的地方不具有空间可比性,并且数据要求高,需要土壤持水量资料作为输入量,计算复杂^[10];SPI指数考虑致旱因子过于单一,未考虑影响干旱的其他因素如温度、蒸散等^[11]。

SPEI综合考虑温度、湿度、降水和蒸散等气象因素,并融合了SPI多时间尺度特征,能够从多时空尺

度稳定地评价干旱时空特征^[12],适于监测全球变暖背景下干旱的变化特征,在世界上得到了广泛应用,Polong等^[13]利用SPEI指数研究了肯尼亚塔纳河流域(TRB)干湿事件的时空变化特征,Hernandez等^[14]采用SPEI指数并结合两种大气环流模式(GCMs)的降水和温度预测得出:21世纪,德克萨斯州南部的沿海半干旱地区干旱程度将逐渐增加,Jia等^[7]利用日尺度的SPEI指数对1960—2016年中国西南地区干旱的区域时空特征进行识别,揭示了中国西南地区干旱特征的变异特征。

虽然以上研究已表明SPEI指数几乎在世界各地都进行过干旱特征研究,然而,大部分的研究使用的气象数据过于粗糙,而局部区域的研究无法代表整个亚热带干旱的时空特征,并且多在单一尺度上对干旱进行分析,未充分发挥SPEI在亚热带干旱评价中的重要作用。政府间气候变化专业委员会(IPCC)于2013年发布的第5次评估报告中指出,干旱在世界范围内不仅影响范围呈增大趋势,而且未来发生频率将持续增加。因此,本文以中国亚热带为研究区域,基于1 km空间分辨率气象格点数据,获取相同分辨率的SPEI格点数据作为干旱等级划分指标,结合干旱变化趋势、影响范围、强度及频率,探讨不同时间尺度下中国亚热带区域干旱的时空特征。

1 研究区概况

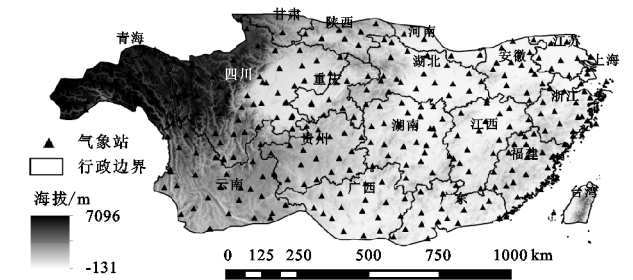
中国亚热带位于23°—35°N,92°—123°E,包括秦岭淮河以南、雷州半岛以北、横断山脉以东的20个省市,面积约占中国总面积的1/4(图1)。该地区东亚季风盛行,具有冬冷夏热、四季分明的气候特点,年平均气温在15.74~16.81℃,年均降水量为800~1600 mm,物种丰富,植被类型多样,顶级群落为常绿阔叶林^[15]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

1959—2019年研究区气象资料(包括月平均气温和月降水量数据)是基于国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>)提供的全国824个气象站的日气象

资料处理获取。首先,利用 1 km 空间分辨率的距离加权方法对日气象数据进行插值,获取同等空间分辨率下的全国日气象格点数据;其次,利用 Aster DEM V3.0 (<https://ssl.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/>)对气温进行了修正,并假设气温下降速率为 6.5℃/km^[16];然后,根据日气象资料的平均值或总和计算月气象因子的值,获取全国月气象资料;最后,通过裁剪获得中国亚热带地区月气象资料。



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)123 号的标准地图制作,底图无修改。

图 1 中国亚热带地理位置

2.2 研究方法

2.2.1 SPEI 的计算 本文用不同时间尺度的 SPEI 来研究 1959—2019 年亚热带地区的干旱时空格局,包括 1,3,6,12 个月,分别用 SPEI1, SPEI3, SPEI6, SPEI12 表示。其中 SPEI1 可反映出短期内干旱情况;SPEI3 可反映出季节的变化规律(SPEI3_{spring}:3—5 月, SPEI3_{summer}:6—8 月, SPEI3_{autumn}:9—11 月, SPEI3_{winter}:12—2 月);SPEI6 可反映出干湿季的变化规律;而 SPEI12 则反映了干旱的年际变化。其中干湿季的判断依据为 1959—2019 年月平均降水数据,以 100 mm(1959—2019 年月平均降水中值)为分界线划分亚热带地区的干湿两季(图 2, SPEI6_{dry}:10—3 月, SPEI6_{wet}:4—9 月)。SPEI 的计算过程见参考文献[11]。

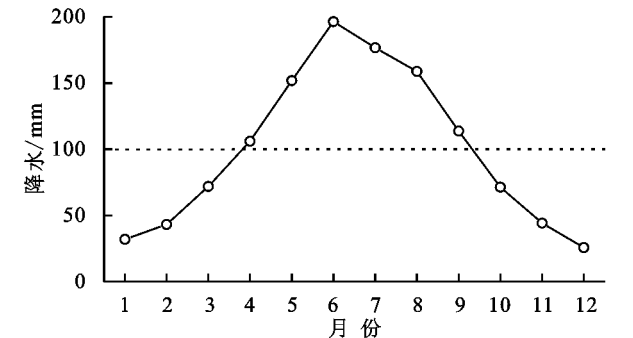


图 2 1959—2019 年月平均降水

2.2.2 干旱线性变化趋势 干旱随时间变化的趋势和特征采用线性回归的方式计算,公式如下:

$$\theta = \frac{y \sum_{i=1}^n i \cdot \text{SPEI}_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{SPEI}_i}{y \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: θ 为变化趋势(当 $\theta > 0$ 时,代表 c 正在增加,当 $\theta < 0$ 时,代表 SPEI 正在减小); y 为发生干旱年数; i 为第几年的个数($i = 1, 2, \dots, n$); SPEI_i 为第 i 年的 SPEI 值。

2.2.3 干旱程度影响范围 干旱程度影响范围是指对应年份里发生不同等级干旱的栅格数占总研究区域栅格数量的比例,计算公式如下:

$$A_d = \frac{n_d}{N} \times 100\% \quad (2)$$

式中: A_d 为不同等级干旱的影响范围; n_d 为不同等级干旱的栅格数; N 为总研究区域栅格数量。

2.2.4 干旱强度 干旱强度定义为发生干旱时 SPEI 累积值的平均值的绝对值,其值越大干旱程度越强,计算公式如下:

$$I = \left| \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \text{SPEI}_i \right| \quad (3)$$

式中: I 为干旱强度; m 为发生干旱次数; SPEI_i 为研究期间内发生干旱时 SPEI 的值。

2.2.5 干旱频率 干旱频率是用来评价某区域有资料年份内干旱发生频繁程度即该区域发生干旱年数占总年数百分比,计算方法为:

$$F = \frac{r}{H} \times 100\% \quad (4)$$

式中: F 为干旱频率; r 为发生干旱年数; H 为总年数。

2.2.6 干旱等级及强度划分 基于 SPEI 和 I 将干旱划分无干旱、轻度干旱、中度干旱、严重干旱、极端干旱 5 个等级^[17],见表 1。

表 1 干旱等级及干旱强度划分

干旱等级	标准化降水蒸散发指数	干旱强度
无干旱	> -0.5	< 0.5
轻度干旱	$(-1, -0.5]$	$[0.5, 1)$
中度干旱	$(-1.5, -1]$	$[1, 1.2)$
严重干旱	$(-2, -1.5]$	$[1.2, 1.5)$
极端干旱	≤ -2	≥ 1.5

3 结果与分析

3.1 多时空尺度 SPEI 变化及干旱趋势分析

不同时间尺度下 SPEI 值波动规律明显不同,随着时间尺度的增大,波动整体上呈现逐步减小趋势(图 3),表明 SPEI 在不同时间尺度上体现出不同的干旱周期性和连续性。1959—1999 年,亚热带地区干旱发生频率低、持续时间短,干旱危害较小。主要发生在 1963 年、1972 年、1979 年、1987 年、1999 年。而 2000 年以后,亚热带地区进入到干旱频繁的阶段,干旱持续时间长,2004—2014 年都处于持续干旱状

态。由于月尺度(SPEI1)波动较大,且短时间的降水和温度无法决定区域的干湿程度,因此,本文重点从

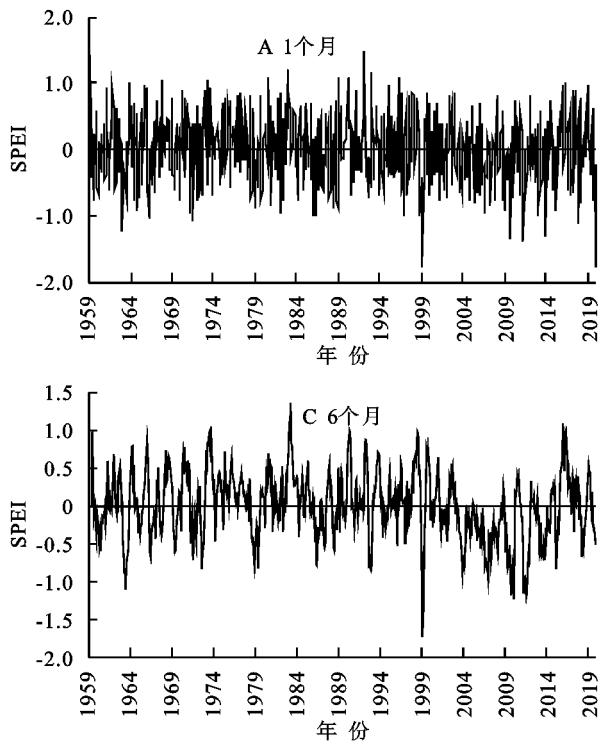
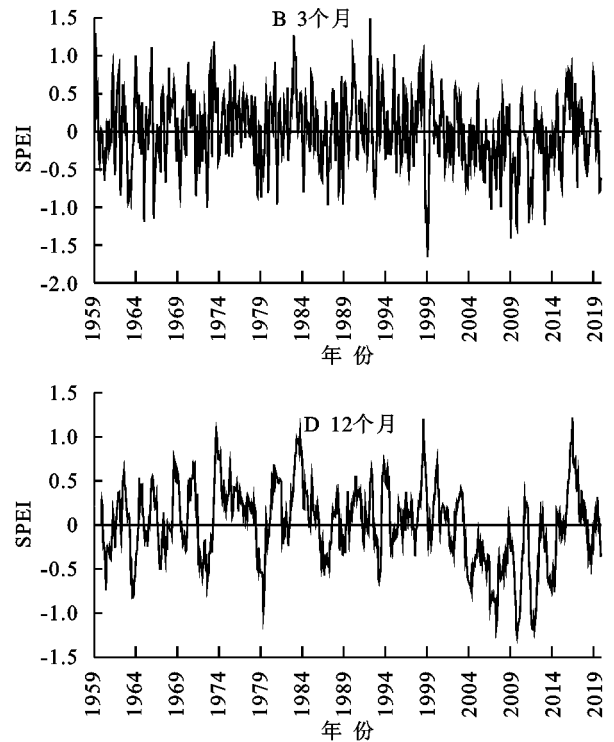


图3 1959—2019年不同时间尺度 SPEI 时间序列

季节变化上(图4), $SPEI3_{spring}$, $SPEI3_{autumn}$, $SPEI3_{winter}$ 分别有 75.2%, 94.7%, 51.5% 区域呈现下降趋势, 总体下降速率分别为 0.055/10 a, 0.096/10 a, 0.015/10 a。其中, $SPEI3_{spring}$ 下降区域主要分布在亚热带东部和西北部, 尤其是陕西、江苏和浙江部分地区下降趋势超过 0.2/10 a 以上, 干旱趋势从 1992 年开始大幅增加, 在 2003—2010 年干旱较为严重; $SPEI3_{autumn}$ 在四川、广东、云南三省交界处下降趋势尤为明显, 下降趋势超过 0.3/10 a 以上, 干旱趋势以 1989 年为界, 主要集中在 1998—2009 年, 尤其是 1998 年、2009 年出现了中度干旱, $SPEI3_{autumn}$ 分别为 -1.21, -1.27; $SPEI3_{winter}$ 下降区域主要分布在亚热带西部, 尤其在四川西南部部分地区, 下降趋势超过 0.4/10 a 以上, 干旱趋势以 1998 年为界, 主要发生在 1999 年, 以及 2009—2019 年, 特别是 1999 年发生了严重干旱, $SPEI3_{winter}$ 达 -1.66; $SPEI3_{summer}$ 呈现下降趋势范围仅占亚热地区的 42.7%, 主要分布在亚热带西部, 且除了个别年份, 如 1972 年, 发生轻度干旱外, 总体较为正常。

干湿季变化上(图5), $SPEI6_{dry}$, $SPEI6_{wet}$ 分别有 65.1%, 69.4% 区域呈下降趋势, 总体下降速率分别为 0.049/10 a, 0.038/10 a。其中, $SPEI6_{dry}$ 下降区域主要分布在亚热带西部的大部分地区, 尤其是四川、甘肃部分地区下降趋势超过 0.3/10 a 以上, 干旱时

季尺度(SPEI3)、干湿季尺度(SPEI6)和年尺度(SPEI12)分析 1959—2019 年干旱演变规律。



期主要集中在 1999 年, 2004—2015 年, 同样也诊断出 1999 年发生了严重干旱事件, $SPEI6_{dry}$ 达 -1.54; $SPEI6_{wet}$ 下降区域主要分布在亚热带西部和东部的少部分地区, 下降趋势主要集中在 0~ -0.2/10 a, 干旱事件集中发生在 2003—2013 年, 特别是 2009 年、2011 年干旱较为严重, $SPEI6_{wet}$ 分别达 -0.87, -1.14。

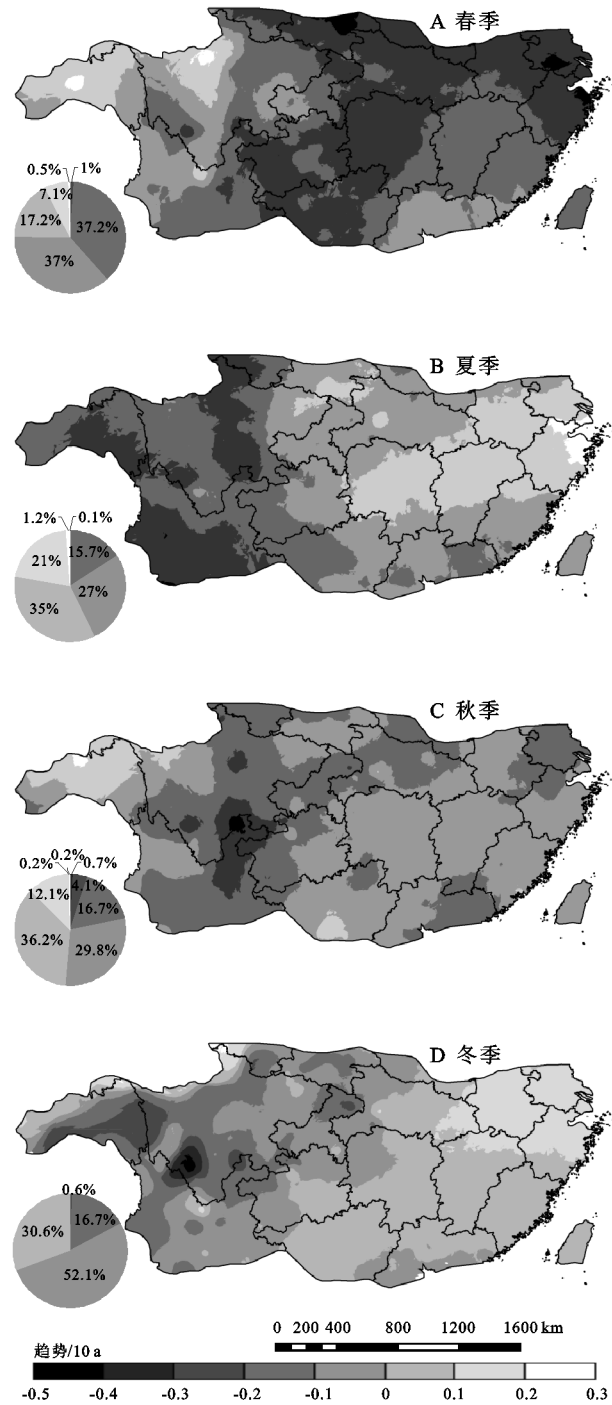
年际变化上(图6), $SPEI12$ 有 73.8% 区域呈现下降趋势, 总体下降速率为 0.06/10 a, 下降区域主要分布在亚热带西部的大部分地区, 尤其是四川、云南部分地区下降趋势超过 0.2/10 a 以上, 干旱趋势自 2001 年波动明显, 干旱时期主要集中在 2001—2013 年, 特别是 2009 年和 2011 年发生了中度干旱事件, $SPEI12$ 分别达 -1.16, -1.18。

3.2 多时空尺度干旱程度影响范围分析

就整体干旱程度影响范围而言(图7), 1959—2019 年, 除夏季以外的时间尺度的干旱程度影响范围都处于不断波动上升的趋势, 尤其是在 1995 年之后, 上升趋势尤为明显。 $SPEI3_{spring}$, $SPEI3_{autumn}$, $SPEI3_{winter}$, $SPEI6_{dry}$, $SPEI6_{wet}$ 和 $SPEI12$ 分别在 2007 年(71.9%)、1998 年(81.5%)、1999 年(95.1%)、1999 年(86.4%)、2011 年(75.3%)和 2009 年(81.9%)达到干旱程度影响范围极值, $SPEI3_{summer}$ 呈现明显“凹”字型的波动趋势, 在 1990—2005 年出现明显的“下降—

上升”的波动趋势以外,其余年份波动幅度较小,在 1972 年(73.4%)达到干旱程度影响范围极值。

就不同干旱程度影响范围而言,1959—1995 年期间,亚热带大部分区域都处于轻度干旱和中度干旱,少部分区域处于严重干旱,极少发生极端干旱事件,即使发生,极端干旱事件影响范围极小,但自



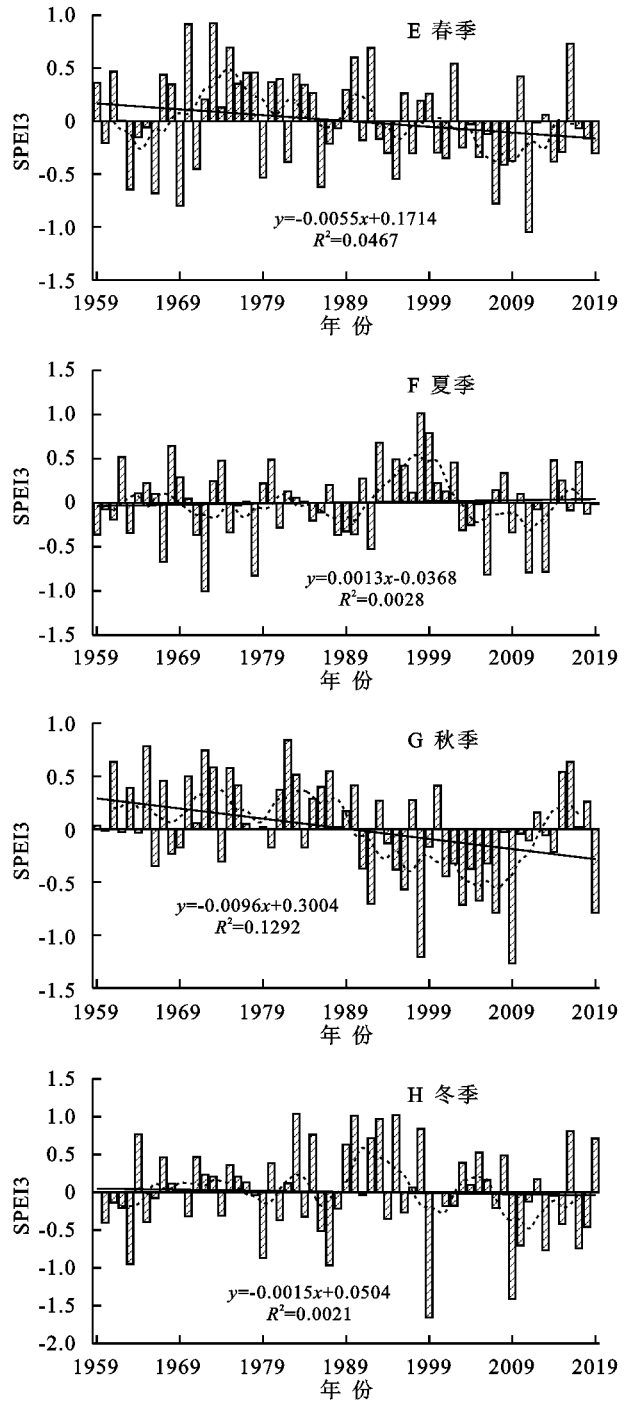
注:直线为一元线性拟合,虚线为 5 a 滑动平均 SPEI 值,下同。

图 4 1959—2019 年四季干旱趋势空间分布和 SPEI3 时间变化趋势

3.3 多时空尺度干旱强度空间分布特征

就亚热带干旱强度空间分布而言(图 8),1959—2019 年期间,各时间尺度 SPEI 的干旱强度范围为

1995 年之后,极端干旱事件频发,极端干旱影响范围不断扩大,SPEI3_{spring}, SPEI3_{summer}, SPEI3_{autumn}, SPEI3_{winter}, SPEI6_{dry}, SPEI6_{wet} 和 SPEI12 分别在 2011 年(27.8%)、2006 年(21.9%)、2009 年(21.9%)、1999 年(27%)、1999 年(37.8%)、2011 年(23.7%)和 2011 年(20.8%)达到极端干旱影响范围极值。



0.91~1.55,并且大部分区域的干旱强度主要集中在 1.0~1.2,即处于中度干旱状态。

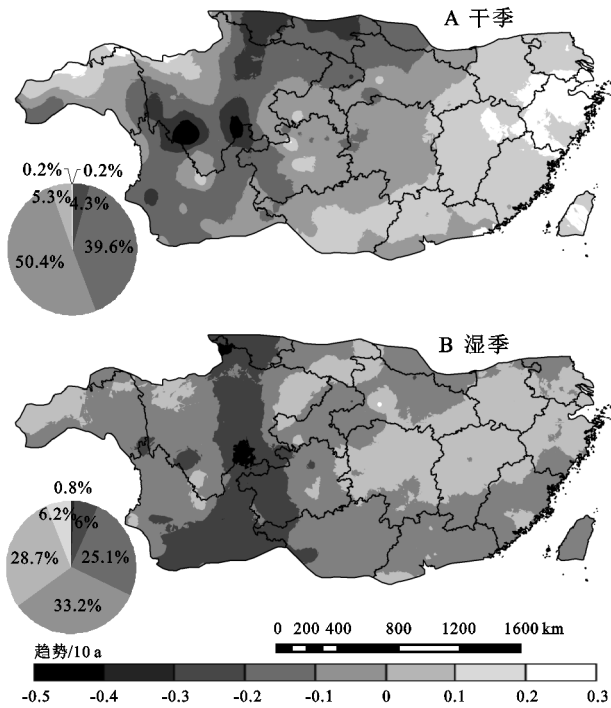


图 5 1959—2019 年干湿季干旱趋势空间分布和 SPEI6 时间变化趋势

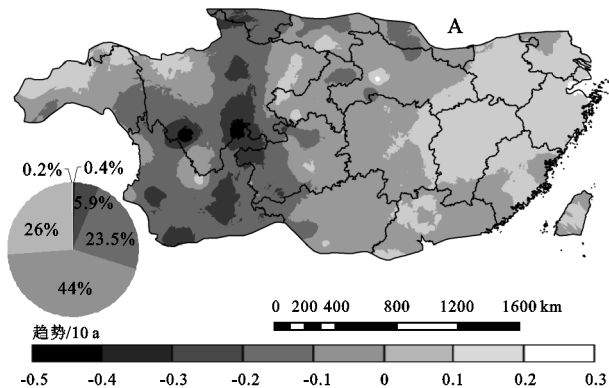
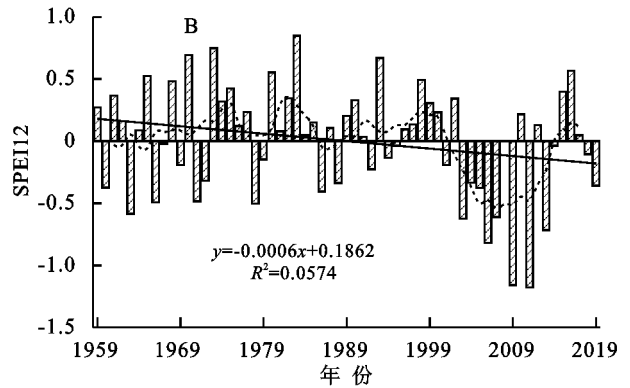
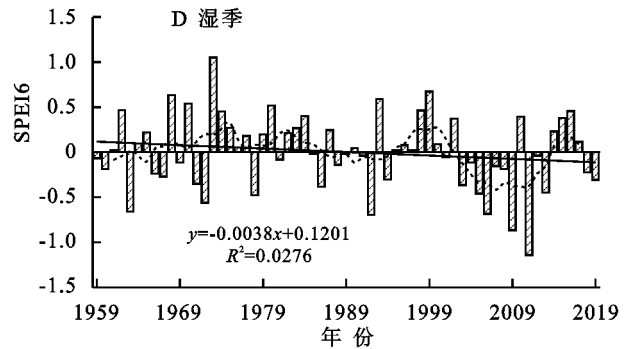
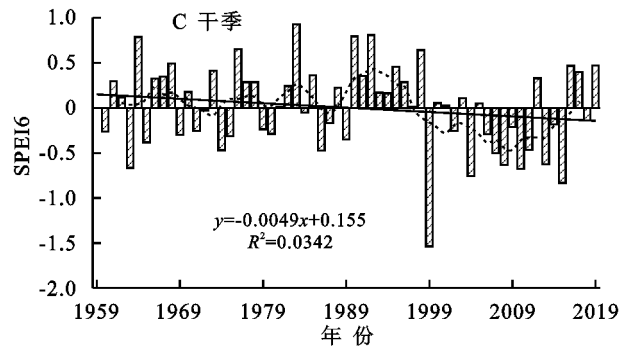


图 6 1959—2019 年年际干旱趋势空间分布和 SPEI12 时间变化趋势

季节变化上, $SPEI3_{spring}$, $SPEI3_{summer}$, $SPEI3_{autumn}$, $SPEI3_{winter}$ 严重及以上干旱强度分别占亚热带区域的 10.3%, 8.5%, 6.2%, 13.9%。其中, $SPEI3_{spring}$ 严重及以上干旱强度区域主要分布在甘肃以及湖南东南部的少部分地区, $SPEI3_{summer}$ 主要分布在浙江东部以及广东西南部的少部分地区, $SPEI3_{autumn}$ 主要分布在福建西南部的少部分地区, $SPEI3_{winter}$ 主要分布在重庆、四川、贵州和云南 4 省的交界处, 以及广西南部的少部分地区, 且季节变化中, 仅有 $SPEI3_{summer}$ 的 0.001 7% 区域处于极端干旱强度。

干湿季变化上, $SPEI6_{dry}$, $SPEI6_{wet}$ 严重及以上干旱强度分别占亚热带区域的 9.6%, 7.8%。其中, $SPEI6_{dry}$ 严重及以上干旱强度区域主要分布在江西北部、贵州西北部以及青海与西藏交界的少部分地区, $SPEI6_{wet}$ 零星分布在福建、云南、四川 3 省, 且干湿季变化中, 仅有 $SPEI6_{dry}$ 的 0.002 2% 区域处于极端干旱强度。年际变化上, $SPEI12$ 严重干旱强度占



亚热带区域的 9.1%, 主要分布在福建和广东交界的少部分地区。

3.4 多时空尺度干旱频率格局分析

就亚热带区域干旱发生频率而言(图 9), 1959—2019 年期间, 不同时间尺度的干旱发生频率范围为 18%~44.3%, 大部分区域的干旱发生频率主要集中在 25%~35%, 中等及以上干旱发生频率范围为 4.9%~27.9%, 大部分区域的中等及以上干旱发生频率主要集中在 10%~20%。

季节变化上, $SPEI3_{spring}$, $SPEI3_{summer}$, $SPEI3_{autumn}$, $SPEI3_{winter}$ 平均发生干旱频率分别为 32.5%, 32.4%, 33.1%, 31.2%。其中, $SPEI3_{spring}$ 超过 20% 的高频中等及以上干旱频率区域主要分布在西藏、四川等地, $SPEI3_{summer}$ 和 $SPEI3_{autumn}$ 零星分布在广西、广东、福建、湖南等地, $SPEI3_{winter}$ 主要分布在四川、重庆等地, 最高频率可达到 27.9%。

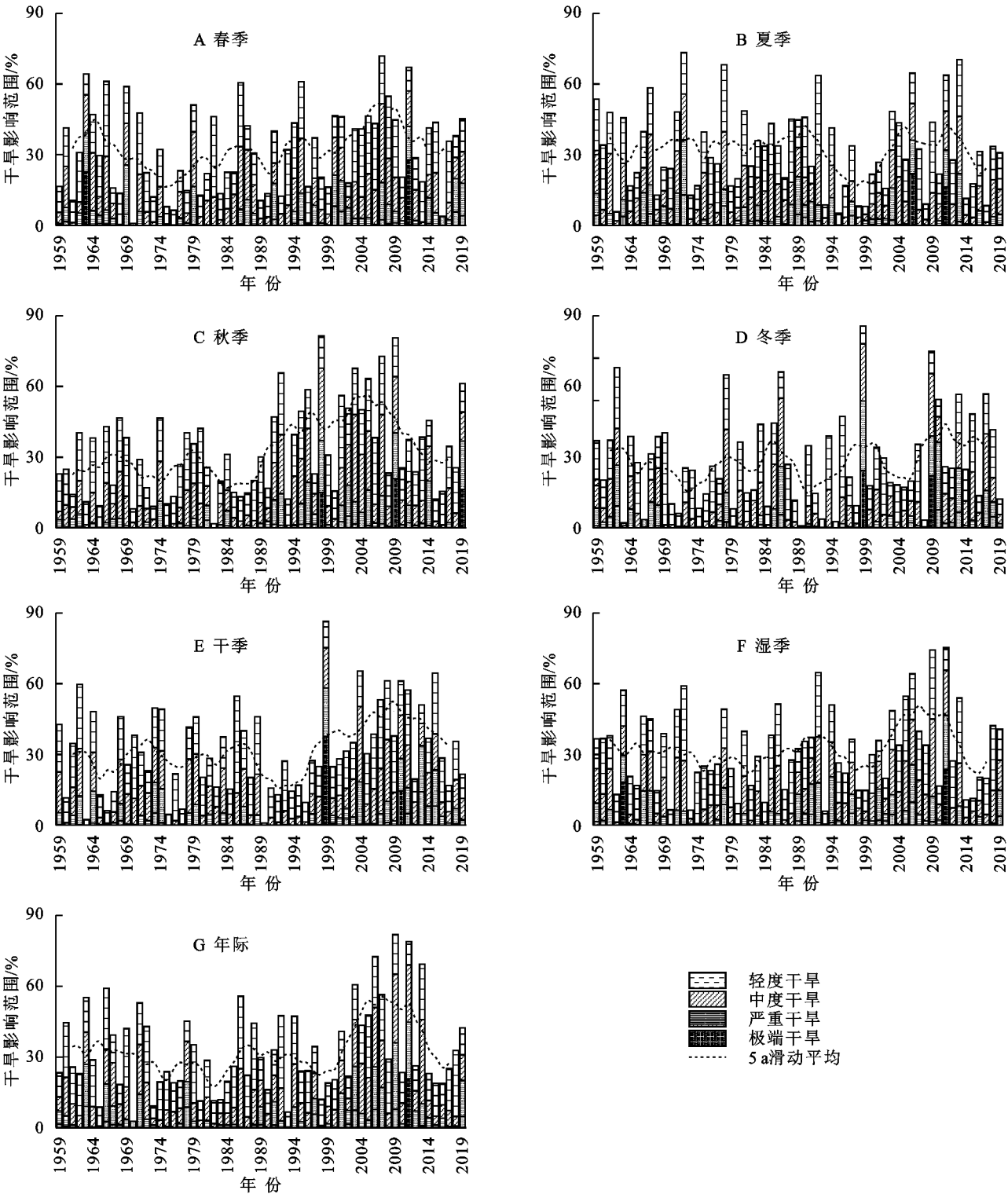


图 7 1959—2019 年各时间尺度干旱程度影响范围

干湿季变化上,SPEI6_{dry},SPEI6_{wet} 平均发生干旱频率分别为 31.6%,32.5%。其中,SPEI6_{dry} 超过 20%的高频中等及以上干旱频率区域零星分布在贵州、四川、江西等地,SPEI6_{wet} 主要分布在湖南、江西、福建等地,最高频率可达到 26.2%。

年际变化上,SPEI12 平均发生干旱频率为 32.8%,SPEI12 超过 20%的高频中等及以上干旱频率区域

主要分布在云南、贵州、重庆、浙江等地,最高频率可达到 27.9%。

4 讨论

4.1 输入数据及蒸散计算对 SPEI 的影响

SPEI 计算原理是利用降水量与蒸散量差值偏离平均状态的程度来表征某地区的干旱。本文采用

Thornthwaite 蒸散方法计算 PET,其主要优点是仅以温度和站点(或格点)所在的纬度作为输入量,不论在全球或中国区域,相比于其他资料,温度资料比较容易获取且观测时间较长^[18],因而得到广泛利用。但是,Thornthwaite 公式也存在一定的问题。在全球变暖的背景下,基于纬度和温度使用 Thornthwaite 公式估算的短波辐射与潜在蒸散量的关系也会发生变化,这将导致未来潜在蒸散量的计算出现错误^[19]。相对来说,Penman-Monteith 公式虽然能得

到相对准确的潜在蒸散量,但是计算涉及到太阳辐射、温度、风速和相对湿度等指标的高时空精度数据在全球大部分地区无法获取,这同样限制了 SPEI 的精确描述。本文首次利用 1 km 空间分辨率逐月气象数据计算中国亚热带区域 SPEI,通过与典型干旱事件核准(表 2)可知,本文与前人的统计结果类似,具有一定的适用性,且相较于目前全球 SPEI 产品[如 The Global SPEI database v2.6 (https://spei.csic.es/spei_database)等]结果^[20]而言,具有更高的精度。

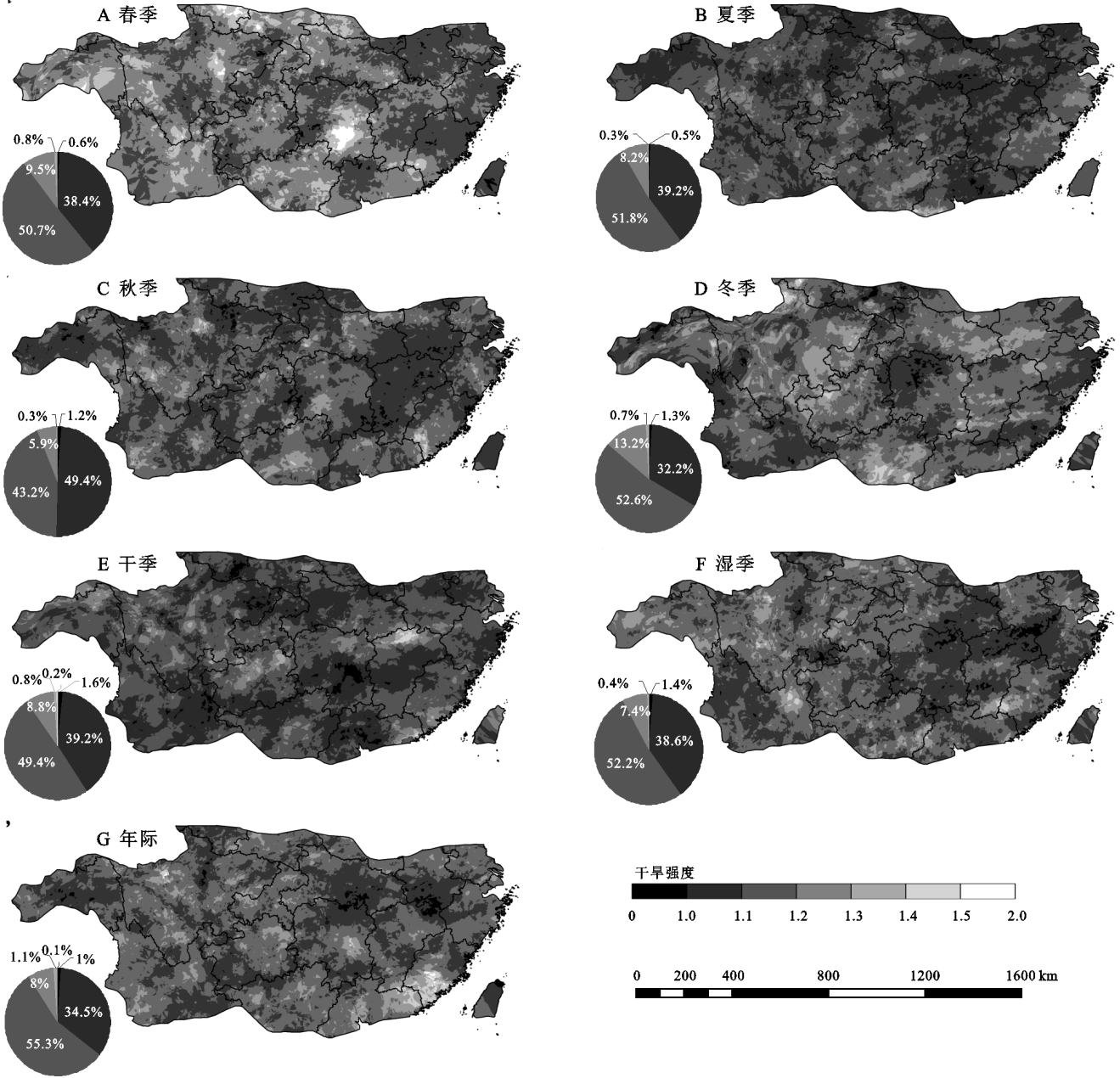
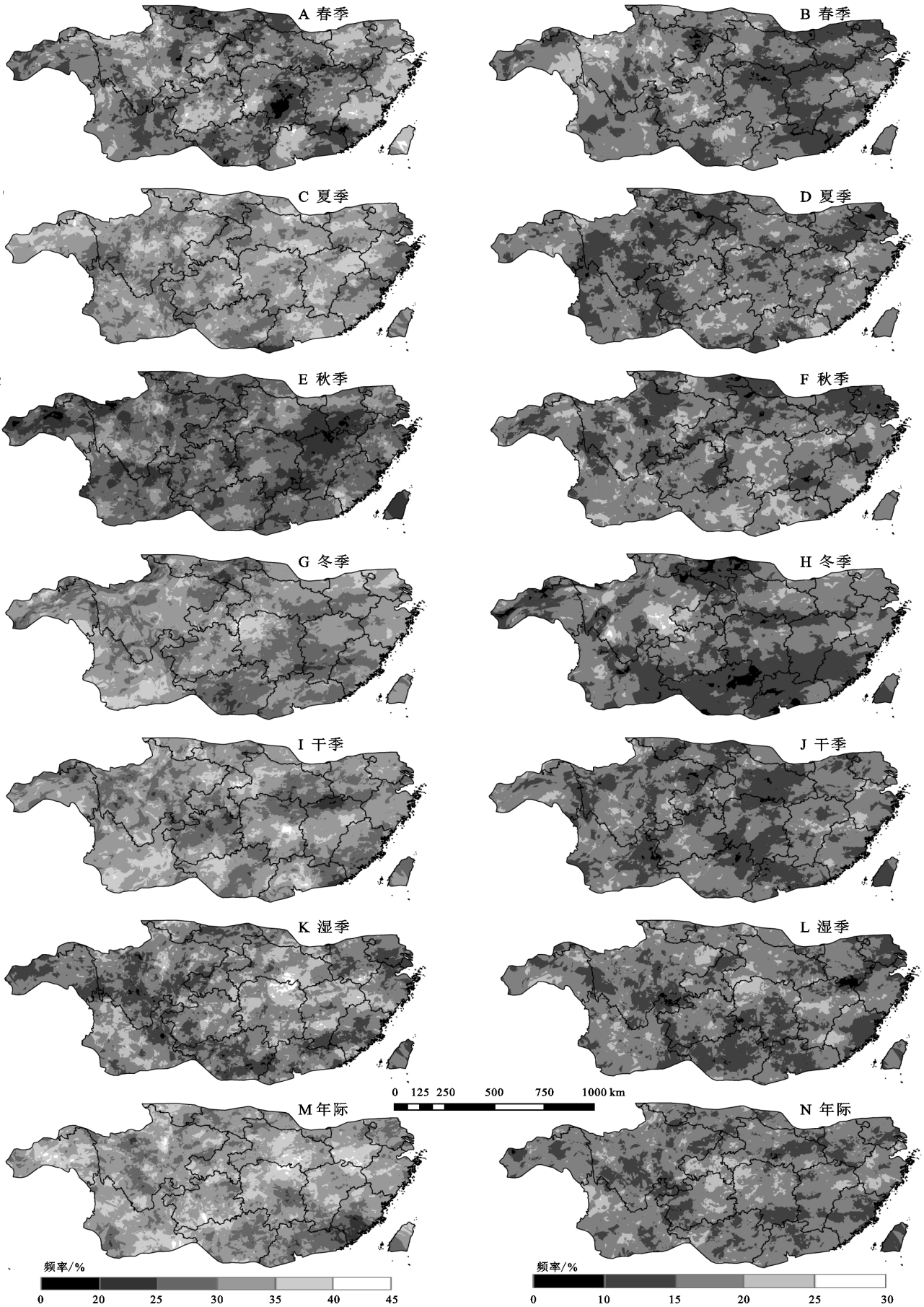


图 8 1959—2019 年各时间尺度干旱强度空间分布

4.2 亚热带干旱时空特征分析

以往干旱的研究多集中于干旱/半干旱区,鲜有针对受气候变化影响剧烈的亚热带地区开展干旱时空特征变化的研究。本研究基于多时空尺度 SPEI

的分析发现,中国亚热带地区呈现干旱化趋势,空间上表现出自西向东的“湿—干—湿”变化趋势,干旱影响范围不断波动上升,这与 Wang^[30]和 Song^[31]等的研究结果类似。



注:左侧 7 个图为干旱发生频率;右侧 7 个图为中等及以上干旱发生频率。

图 9 1959—2019 年各时间尺度干旱发生频率

表 2 典型干旱事件核准

时间	范围	旱灾程度	本文 SPEI	文献
1961 年	湖南、贵州、四川西部	中—重旱	贵州:−1.88;湖南:−1.23	[18]
			康定县:−0.82	[21]
1978 年	浙江北部、上海	中—重旱	浙江北部:−1.73;上海:−1.86	[22]
1982 年	宁波、金华、温州、九江、南昌	中—重旱	宁波:−1.18;金华:−1.23;	[21]
			温州:−1.54;九江:−0.95	[23]
1986 年	南昌、上饶、吉安、赣州	中—重旱	南昌:−1.00	[21]
			南昌:−1.93;上饶:−1.74;	[23]
1991 年	广东南部、广西	中—重旱	吉安:−1.71;赣州:−1.12	[21]
			云浮市:−1.77;肇庆市:−1.34	[24]
1994 年	苏州、上海	中—重旱	广州:−0.96;广西:−1.06	[24]
2000 年	扬州、南京、合肥、安庆	中—重旱	苏州:−0.94;上海:−1.20	[21]
			扬州:−1.14;南京:−1.77	[21]
2005 年 10—12 月下旬	广东、广西南部、福建西南部	中—重旱	合肥:−0.56;安庆:−0.64	[21]
			广东 10—12 月:−1.57,−1.29,−1.53	[24]
2006 年 7—8 月	重庆、四川东部	重—特旱	桂林 10—12 月:−1.65,−1.49,−1.07	[24]
			龙岩市 10—12 月:−1.58,−0.54,−1.49	[24]
2007 年 9 月下旬—12 月中旬	湖南、江西、广东、广西、贵州	中—重旱	重庆 7—8 月:−1.25,−2.35	[25]
			四川东部 7—8 月:−1.10,−2.17	[26]
2011 年 6 月 1 日—9 月 7 日	云南、贵州、重庆、四川、广西	重—特旱	湖南 10—11 月:−1.62,−1.42	[27]
			江西 10—11 月:−1.54,−1.33	[27]
2014 年 5 月中下旬	云南大部、四川南部	中—重旱	广东 10—11 月:−1.10,−0.88	[27]
			广西 10—11 月:−1.75,−0.75	[27]
			贵州 10—11 月:−1.47,−1.65	[27]
			云南 6—8 月:−0.54,−1.42,−1.75	[27]
			贵州 6—8 月:−1.57,−2.19,−2.27	[27]
			重庆 6—8 月:−1.35,−1.58,−1.38	[28]
			四川 6—8 月:−0.56,−0.52,−1.10	[28]
			广西 6—8 月:−0.81,−1.53,−1.87	[28]
			云南:−1.51;四川南部:−0.66	[29]

同时,本研究发现 1995 年以后,亚热带地区干旱,特别是极端干旱的影响范围不断扩大,与马志婷^[32]针对全国干旱的研究结果一致。另外,本研究发现亚热带干旱强度主要为中等干旱,其中湖南、江西、广东、广西、福建均出现了严重甚至极端干旱,然而,这些地区干旱频率却较低,主要原因可能是随着全球变暖现象的持续,大尺度区域的极端气候灾害频发,局部区域的极端气候气象事件突发性逐渐增强^[33],中国南方的骤旱发生概率很大。此外,高频干旱频率区域主要发生在湖北、安徽、江西、湖南等地,这也印证了前人关于近 20 a 长江中下游地区干旱事件发生频率呈现增加的趋势已成为不争事实的论断^[34]。然而,现有柴荣繁^[35]、Wu^[36]等没有检测出亚热带东南的干旱

化现象,也有基于全球再分析气象数据集的研究发现北半球干旱频率呈减少趋势^[37],我们需要关注这些区域的气象变化,开展更深入研究。

4.3 亚热带干旱成因分析

导致干旱的原因是复杂且多方面的,既有气候自然变化的原因,也有人类活动的原因。通过降水、湿度、最高温和最低温 4 种气象因素与年尺度 SPEI 偏相关分析可知(图 10),降水无疑是中国亚热带地区干旱的最大影响因素,所有区域的偏相关系数都高达 0.9 以上;湿度与干旱的偏相关系数绝对值主要集中在 0.5 左右,影响程度较为一般;最高温对中国亚热带干旱的影响出现明显的东西分界,东部地区主要呈现正相关性,但相关性较小,西部地区主要呈现负相

关性,影响力较大的地区主要集中在西藏、四川等地,最大值可达0.87;中国亚热带的绝大部分区域都与最低温呈现负相关性,尤其是西南地区,相关性最大可达0.91。Zhang等^[38]研究发现,近55年来,华南地区年降水量呈波动趋势,没有明显的线性变化趋势,但21世纪初,年平均降水量明显减少,振荡幅度增大,近年来平均气温呈显著上升趋势,增长速度甚至高于全球平均水平。降水量减少,气温上升可能是亚热带21世纪以来干旱程度不断加深的主要原因,更深层次的气候变化原因还涉及到大西洋年代际振

荡(Atlantic Multidecadal Oscillation)、南方涛动(Southern Oscillation)等大气环流的变化。此外,人类活动已经并将继续改变陆地表面,地表因子的变化,如植被退化、积雪增加或土地利用变化,导致地表反照率增加和大气沉降增加,从而改变大气和陆地表面之间的能量、动量和水的交换,这在区域尺度上抑制降水且显著影响干旱。在分析了解亚热带地区气象干旱时空变化规律的基础上,进一步探讨旱灾成因对于干旱监测预警和防旱抗旱、减轻旱灾损失有着十分重要的理论和实践意义。

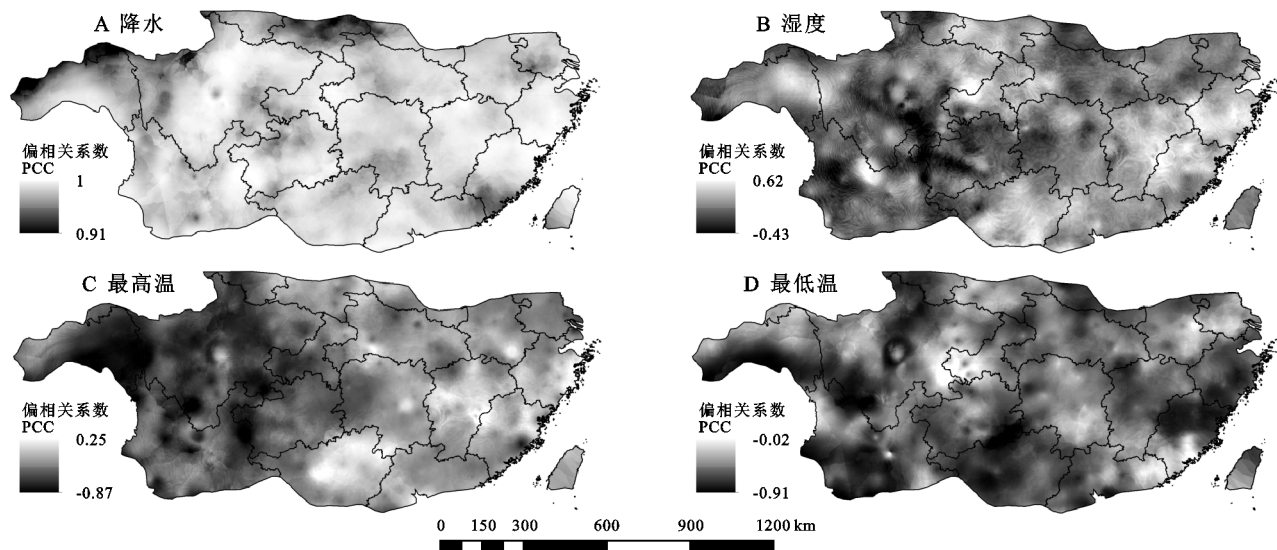


图10 1959—2019年各气象因素与SPEI的偏相关系数

5 结论

(1) 1959—2019年各时间尺度SPEI统计表明亚热带地区干旱化速率平均为0.052/10 a,其中干旱化最严重为秋季,干旱化速率达0.096/10 a。空间统计结果显示约有71.6%亚热带地区呈现干旱化趋势,干旱化趋势主要集中在0~−0.2/10 a,主要分布在西部地区的四川、贵州和云南等省份。

(2) 1959—2019年各时间尺度SPEI的干旱程度影响范围都处于不断波动上升的趋势,尤其是在1995年之后,干旱程度影响范围上升趋势尤为明显,最大达95.1%,且极端干旱事件频发,极端干旱影响范围不断扩大,最大达37.8%。

(3) 1959—2019年各时间尺度SPEI的干旱强度处于0.91~1.55,大部分区域的干旱强度主要集中在1.0~1.2,即处于中等干旱阶段,严重及以上干旱强度占亚热带区域的平均范围为9.36%,主要分布在福建、湖南、贵州和广西等省份。

(4) 1959—2019年各时间尺度SPEI的平均干旱发生频率为32.3%,中等及以上干旱发生频率范围

位于4.3%~27.9%,大部分区域的中等及以上干旱频率主要集中在10%~20%,高频的中等及以上干旱频率区域主要分布在四川、西藏、重庆等省份。

参考文献:

- [1] He B, Lü A, Wu J J, et al. Drought hazard assessment and spatial characteristics analysis in China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(2): 235-249.
- [2] 翁白莎, 严登华. 变化环境下中国干旱综合应对措施探讨[J]. 资源科学, 2010, 32(2): 309-316.
- [3] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴2016[M]. 北京: 气象出版社, 2017.
- [4] 李忆平, 李耀辉. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展[J]. 干旱气象, 2017, 35(5): 709-723.
- [5] 谢五三, 田红, 王胜, 等. 基于CI指数的淮河流域干旱时空特征研究[J]. 气象, 2013, 39(9): 1171-1175.
- [6] 师小雨, 黄强, 畅建霞, 等. 基于FUZZ-EWM法的综合干旱指数构建与应用[J]. 水利发展研究, 2018, 18(7): 46-56.
- [7] Jia Y Q, Zhang B, Ma B. Daily SPEI reveals long-term change in drought characteristics in Southwest China[J]. Chinese Geographical Science, 2018, 28(4): 680-693.

- [8] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]. The 8th Conference on Applied Climatology, Boston, 1993, 17(22):179-183.
- [9] Sobral B S, Oliveira-Júnior J F, Gois G, et al. Drought characterization for the state of Rio de Janeiro based on the annual SPI index: trends, statistical tests and its relation with ENSO[J]. Atmospheric Research, 2019, 220(15):141-154.
- [10] 王林,陈文.标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J].高原气象,2014,33(2):423-431.
- [11] 李伟光,陈汇林,朱乃海,等.标准化降水指标在海南岛干旱监测中的应用分析[J].中国生态农业学报,2009,17(1):178-182.
- [12] 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.
- [13] Polong F, Chen H S, Sun S L, et al. Temporal and spatial evolution of the standard precipitation evapotranspiration index (SPEI) in the Tana River Basin, Kenya[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 138(1):777-792.
- [14] Hernandez E A, Uddameri V. Standardized precipitation evaporation index (SPEI): based drought assessment in semi-arid south Texas [J]. Environmental Earth Sciences, 2014,71(6):2491-2501.
- [15] 李林,魏识广,练琚愉,等.亚热带不同纬度植物群落物种多样性分布规律[J].生态学报,2020,40(4):1249-1257.
- [16] Cao B, Gruber S, Zhang T. REDCAPP(v1.0): Parameterizing valley inversions in air temperature data downscaled from reanalyses [J]. Geoscientific Model Development, 2017,10(8):2905-2923.
- [17] 张岳军,郝智文,王雁,等.基于 SPEI 和 SPI 指数的太原多尺度干旱特征与气候指数的关系[J].生态环境学报,2014,23(9):1418-1424.
- [18] 王林.干旱指标的发展以及中国西南干旱的未来预估和成因分析[D].北京:中国科学院大学,2014.
- [19] Burke E J, Brown S J. Evaluating uncertainties in the projection of future drought[J]. Journal of Hydrometeorology, 2008,9(2):292-299.
- [20] 董婷,孟令奎,张文.1961—2012 年我国干旱演变特征[J].干旱区研究,2018,35(1):96-106.
- [21] 张德二,李小泉,梁有叶.《中国近五百年旱涝分布图集》的再续补(1993—2000 年)[J].应用气象学报,2003,14(3):379-384.
- [22] 中央气象局气象科学研究院.中国近五百年旱涝分布图集[M].北京:地图出版社,1981.
- [23] 张德二,刘传志.《中国近五百年旱涝分布图集》续补(1980—1992 年)[J].气象,1993,19(11):41-45.
- [24] 王林,陈文.近百年西南地区干旱的多时间尺度演变特征[J].气象科技进展,2010,2(4):21-26.
- [25] 中国气象局.中国气象灾害年鉴 2005[M].北京:气象出版社,2006.
- [26] 中国气象局.中国气象灾害年鉴 2006[M].北京:气象出版社,2007.
- [27] 中国气象局.中国气象灾害年鉴 2007[M].北京:气象出版社,2008.
- [28] 中国气象局.中国气象灾害年鉴 2011[M].北京:气象出版社,2012.
- [29] 中国气象局.中国气象灾害年鉴 2014[M].北京:气象出版社,2015.
- [30] Wang W, Zhu Y, Xu R G, et al. Drought severity change in China during 1961—2012 indicated by SPI and SPEI[J]. Natural Hazards, 2015,75(3):2437-2451.
- [31] Song X, Song Y, Chen Y. Secular trend of global drought since 1950[J]. Environmental Research Letters, 2020, 15(9):094073.
- [32] 马志婷.1960—2014 年中国干旱时空变化及其对植被的影响[D].太原:山西大学,2018.
- [33] 于洪蕾.极端气候条件下我国滨海城市防灾策略研究[D].天津:天津大学,2016.
- [34] 李俊,袁媛,王遵娅,等.2019 年长江中下游伏秋连旱演变特征[J].气象,2020,46(12):1641-1650.
- [35] 柴荣繁,陈海山,孙善磊.基于 SPEI 的中国干湿变化趋势归因分析[J].气象科学,2018,38(4):423-431.
- [36] Wu M J, Li Y, Hu W, et al. Spatiotemporal variability of standardized precipitation evapotranspiration index in mainland China over 1961—2016[J]. International Journal of Climatology, 2020,40(11):4781-4799.
- [37] Spinoni J, Naumann G, Carraro H, et al. World drought frequency, duration, and severity for 1951—2010[J]. International Journal of Climatology, 2014,34(8):2792-2804.
- [38] Zhang Q, Yao Y B, Wang Y, et al. Characteristics of drought in Southern China under climatic warming, the risk, and countermeasures for prevention and control [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019,136(3/4):1157-1173.