

DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2023.06.009

# 基于 SPEI 的长江流域气象干旱时空特征分析

谢南茜 熊立华 李家誉 王天岳

(武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 受全球气候变化影响,长江流域干旱发生不确定性增加,而揭示其干旱特征能为更好应对提供科学依据。本研究基于标准化降水蒸散发指数(SPEI),对流域1982~2018年干旱事件发生频次、强度和历时的时空特征及其变化规律进行分析表明,其间流域年尺度和季尺度干旱均呈增加趋势,其中冬季干旱化趋势尤为显著;年尺度、夏季和冬季的干旱强度和历时呈增加趋势,春季和秋季的干旱强度和历时呈下降趋势。空间上,流域中部累计干旱强度较大,累计历时较长。干旱历时和发生频次具有显著空间异质性,不同季节空间异质性存在较大差异。金沙江流域中部、汉江流域、长江干流的中游地区干旱整体呈增加趋势;长江源头和流域南部干旱整体呈缓和趋势。

**关键词:** 长江流域; 标准化降水蒸散发指数; 气象干旱; 干旱特征

中图分类号: P339

文献标志码: A

文章编号: 1671-3354(2023)06-0030-06

## On the Spatio-Temporal Characteristics of Meteorological Drought in Yangtze River Basin based on SEPI

XIE Nanxi, XIONG Lihua, LI Jiayu, WANG Tianyue

(State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Affected by the global climate change, the occurrence uncertainty of drought in Yangtze River basin is increased. Determination of the drought characteristics can provide scientific basis for the better response to the drought disaster. Based on the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI), the spatio-temporal characteristics and variation patterns of the frequency, intensity and duration of drought events in the Yangtze River basin from 1982 to 2018 are analyzed. The results show that the annual and seasonal scale droughts in the river basin in the study period are of an increasing trend, and the increase trend of winter droughts is particularly significant. The annual scale, summer and winter drought intensity and duration are of an increasing trend, while the spring and autumn drought intensity and duration are of a decreasing trend. Spatially, the accumulative drought intensity and duration are relatively higher and longer in the central part of the river basin. The drought duration and frequency are of a significant spatial heterogeneity which is quite different in different seasons. The central area of the Jinsha River basin, the Hanjiang River basin, and the middle reaches area of the Yangtze River mainstream are experiencing an overall increasing trend of drought events, while the source area of the Yangtze River and the southern part of the river basin are of an easing trend.

**Key words:** Yangtze River basin; standardized precipitation evapotranspiration index; meteorological drought; drought characteristics

干旱通常指在一定时期内由于降水不足等因素引发的区域水分短缺现象,是我国重大气象灾害之一。受全球变化影响,我国受干旱影响区域的范围不断扩大,干旱带来的危害持续增加<sup>[1]</sup>,且未来几十年旱情可能仍呈加重趋势<sup>[2]</sup>。长江流域不仅是我国重要的

农业生产基地和经济发展区,更是我国水资源配置的重要战略水源地。长江流域虽然水资源较为丰富,但降水年内分布不均,年际差异较大,频发的季节性干旱对流域内经济社会发展和全国供水安全保障带来了巨大挑战<sup>[3-5]</sup>。有研究表明,长江流域1979-2012年间

收稿日期: 2023-04-01

作者简介: 谢南茜,女,硕士研究生,主要从事水文与水资源研究。

基金项目: 国家自然科学基金联合项目(U2240201)。

共发生了 29 次水文干旱事件,平均持续时间为 7.5 个月,平均缺水量 146 mm<sup>[6]</sup>。2022 年,长江流域遭遇了自 1961 年以来最严重的夏季高温天气和干旱事件,对流域内农业灌溉、供水、生态环境、电力供给等产生了极大影响,甚至引发多场山火,严重危害了人民生命财产安全<sup>[7]</sup>。在“长江大保护”的背景下,如何保护好长江水资源和水生态是应该深入研究的问题<sup>[8-9]</sup>。因此,研究长江流域干旱特征并揭示其变化特征,对科学认识长江流域干旱,正确制定防旱抗旱措施具有重要支撑作用。

干旱指数是开展干旱监测预警和对干旱严重程度进行量化评估的重要方式,目前常用的干旱指数有标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)、标准化降水蒸散发指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)、帕默尔干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)等。由于不同干旱指数的建立背景和考虑的致旱因子存在差异,其区域适用性亦不同,合理选取干旱指标,是正确研究区域干旱特征的关键。不少学者的研究<sup>[10-12]</sup>表明,SPEI 指数在长江流域的干旱评估效果较好。

本文基于 SPEI 指数,结合干旱频次、干旱强度和干旱历时,分析了长江流域 1982~2018 年不同时间尺度干旱时空变化特征。本研究将进一步加深人们对长江流域干旱发生规律的认识,能为区域防旱抗旱决策提供科学依据。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域

长江发源于青藏高原,向东流经我国 11 个省级行政区,注入东海,是我国水资源最为丰富的河流之一。长江流域(90°33'E~122°25'E, 24°30'N~35°45'N)是

世界第三大流域,总面积 180 万 km<sup>2</sup>,约占中国陆地面积的五分之一,流域内人口超过 4.5 亿。长江流域大部分地区处于亚热带和温带气候区,年平均气温约为 14℃,年平均降水量约为 1 000 mm。长江流域地势西高东低,总落差约 5 400 m,呈多级阶梯性地形<sup>[13]</sup>,受复杂地形和季风气候的影响,长江流域降水时空分布不均。

根据我国水资源二级分区,长江流域被划分为 12 个子流域或区域,包括金沙江石鼓以上、金沙江石鼓以下、岷沱江、嘉陵江、汉江、乌江、洞庭湖水系、鄱阳湖水系、太湖水系、上游干流、中游干流和下游干流区间。

1.2 数据资料

本研究所用的 SPEI 指数来源于全球 SPEI 指数数据库(<https://spei.csic.es/database.html>)。该数据库包含了 1 到 48 月尺度的 SPEI 指数数据,空间分辨率为 0.5°。本文选取 1982 年 1 月至 2018 年 12 月的 SPEI-3 和 SPEI-12 指数,经过裁剪和掩膜处理得到长江流域 SPEI-3 和 SPEI-12 数据,基于上述数据,分析长江流域气象干旱特征。

2 主要方法

2.1 SPEI 指数及干旱特征

2.1.1 SPEI 指数计算

SPEI 指数由 Vicente-Serrano 等 2010 年提出,该指数综合考虑了降水和潜在蒸散发对干旱的影响。该指数假设水分亏缺(降水与潜在蒸散发的差值)服从 log-logistic 分布,并基于水分亏缺计算干旱指数<sup>[14]</sup>。

根据 SPEI 指数干旱等级划分标准,SPEI 值可划分为五个等级(见表 1),当 SPEI 值小于或等于 -0.5 时,视为发生了干旱;反之,则未发生干旱。

表 1 基于 SPEI 指数的干旱等级划分

干旱等级	无旱	轻旱	中旱	重旱	极旱
SPEI 数值范围	-0.5 < SPEI	-1.0 < SPEI ≤ -0.5	-1.5 < SPEI ≤ -1.0	-2.0 < SPEI ≤ -1.5	SPEI ≤ -2.0

本研究选用 SPEI-3 和 SPEI-12 数据分析长江流域季节和年尺度干旱时空演变特征。春、夏、秋、冬季干旱分别由 5 月、8 月、11 月、次年 2 月的 SPEI-3 表示,年尺度干旱由 12 月的 SPEI-12 表示。

2.1.2 干旱事件识别方法

本研究采用游程理论识别气象干旱事件。1967 年,Yevjevich 率先应用游程理论识别干旱事件的起止

时间,定义了干旱历时、干旱烈度和干旱强度等干旱特征,并初步分析了上述干旱特征的统计规律。运用游程理论对干旱事件进行识别时,首先给定一个干旱阈值  $R_0$  ( $R_0$  = SPEI 指数相对应的干旱等级),然后截取随时间变化的离散序列  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),当随机变量在一个或多个时间内连续大于截取水平时,出现正游程,表明未发生干旱事件;反之则出现负游程,表明

发生干旱事件。在某个持续时段内,将 SPEI 值小于干旱阈值  $R_0$  的时间作为一次干旱事件发生的开始,将之后 SPEI 值首次大于或等于干旱阈值  $R_0$  的时间作为此次干旱事件的结束。根据 SPEI 干旱等级划分标准,将  $R_0$  干旱阈值设定为  $-0.5$ 。

2.1.3 干旱评估指标

1) 干旱强度( $I$ )。在干旱发展过程中,其 SPEI 值之和的绝对值为干旱强度,其值越大表明干旱越剧烈。可用于衡量干旱的严重程度:

$$I = \sum |SPEI|_{SPEI \leq -0.5}$$

2) 干旱历时( $D$ )。干旱历时是指一次干旱事件自开始到结束所持续的时间,数值上等于干旱结束的时间减去干旱发生的时间,单位为月。

3) 干旱频率( $F$ )。干旱频率的定义为研究时段内干旱累计发生的次数,单位为次。

2.2 趋势分析方法

本研究采用 Sen 斜率<sup>[15]</sup>估计进行趋势分析。其计算公式为:

$$\beta = \text{Median} \left( \frac{X_j - X_i}{j - i} \right), \forall j > i$$

式中  $\beta$  为所有数据对斜率的中值,  $\beta > 0$  表明样本有上升的趋势,反之则为下降趋势。

2.3 Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall 检验为非参数检验,适用于所有的分布,本研究采用 Mann-Kendall 检验进行显著性分析。

统计量用  $S$  计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$

式中:  $n$  表示样本的数量;  $x_i$  和  $x_j$  分别表示时间序列中的第  $i$  和  $j(j > i)$  个数据值;同时  $\text{sgn}(x_j - x_i)$  是符号函数,由以下公式确定:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{if } x_j - x_i > 0 \\ 0, & \text{if } x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{if } x_j - x_i < 0 \end{cases}$$

方差的具体计算公式:

$$\sigma^2(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

标准正态检验统计量  $Z_s$  由以下公式计算:

$$Z_s = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\sigma^2(S)}}, & \text{if } S > 0 \\ 0, & \text{if } S = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\sigma^2(S)}}, & \text{if } S < 0 \end{cases}$$

本研究采用的显著性水平  $P = 0.05$ 。

3 结果分析

3.1 长江流域干旱时间变化特征

3.1.1 SPEI 时间变化趋势

由表 2 可知,1982~2018 年长江流域年尺度 SPEI 呈下降趋势,下降速率为  $-0.019/a$ ;季尺度 SPEI 也呈现下降趋势,SPEI 春、夏、秋、冬季下降速率分别为  $-0.005/a$ 、 $-0.008/a$ 、 $-0.015/a$  和  $-0.028/a$ 。表明长江流域干旱呈现出加剧趋势,其中,冬季的干旱呈显著增加趋势( $P < 0.05$ )。

表 2 1982~2018 年长江流域年尺度和季尺度 SPEI 变化趋势

不同尺度	年	春	夏	秋	冬
变化趋势	-0.019	-0.005	-0.008	-0.015	-0.028
$R^2$	0.099	0.011	0.016	0.090	0.102
$P$ 值	0.763	0.865	0.666	0.472	0.032*

注: \* 表示通过 0.05 水平的置信度检验。

3.1.2 干旱强度和干旱历时变化趋势

为揭示干旱的时间变化特征,本研究对长江流域 1982~2018 年年尺度和季节尺度的干旱强度和干旱历时进行了趋势分析,其中年尺度干旱强度和干旱历时见图 1。1982~2018 年长江流域年尺度干旱的干旱强度和干旱历时整体分别以  $0.011/a$  和  $0.008/a$  的速度增加,表明干旱存在逐年增加趋势。干旱强度最大的年份为 1986 年,达 8.98,其次为 1998 年(8.27)和 2011 年(7.69)。年干旱历时最大的年份也为 1986 年,达 7.32 月,表明长江流域 1986 年经历了较为严重的长历时干旱。

1982~2018 年长江流域春季干旱的干旱强度和干旱历时整体呈减小的趋势,减小速率分别为  $-0.005/10a$  和  $-0.0009/10a$ ;夏季干旱的干旱强度和干旱历时整体呈增加趋势,增加速率分别为  $0.001/a$  和  $0.004/a$ ;秋季干旱的干旱强度和干旱历时整体呈减少趋势,减小速率分别为  $-0.002/a$  和  $-0.001/a$ ;冬季干旱的干旱强度和干旱历时整体呈增加趋势,增加速率分别为  $0.012/a$  和  $0.007/a$ 。

不同季节干旱特征变化趋势表明,长江流域夏季干旱和冬季干旱存在加剧趋势,春季和秋季干旱存在缓和趋势。本研究的干旱分析表明,长江流域在 2001 和 2011 年、1992 年、1998 年、2008 年分别发生了较为严重的春季干旱、夏季干旱、秋季干旱和冬季干旱,与相关文献记载<sup>[16]</sup>吻合度较高,表明本研究所用的干旱识别方法能有效识别长江流域干旱。

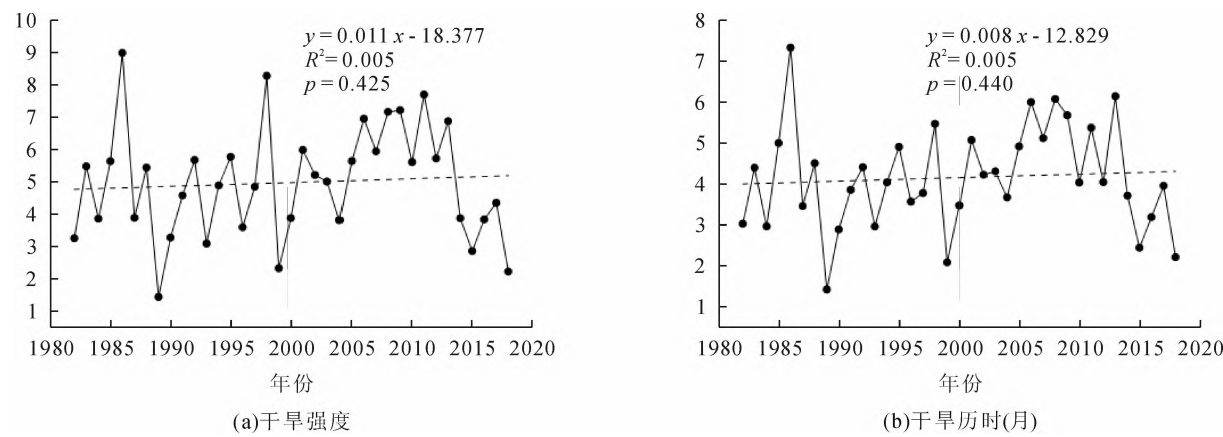


图1 1982 ~ 2018 年长江流域干旱强度和干旱历时(图中的值为面平均)

3.2 长江流域干旱的空间变化特征

3.2.1 季尺度干旱历时空间分布特征

为分析长江流域不同季节干旱历时的空间分布特

征,逐栅格计算了不同季节干旱历时的累计值,见图2。

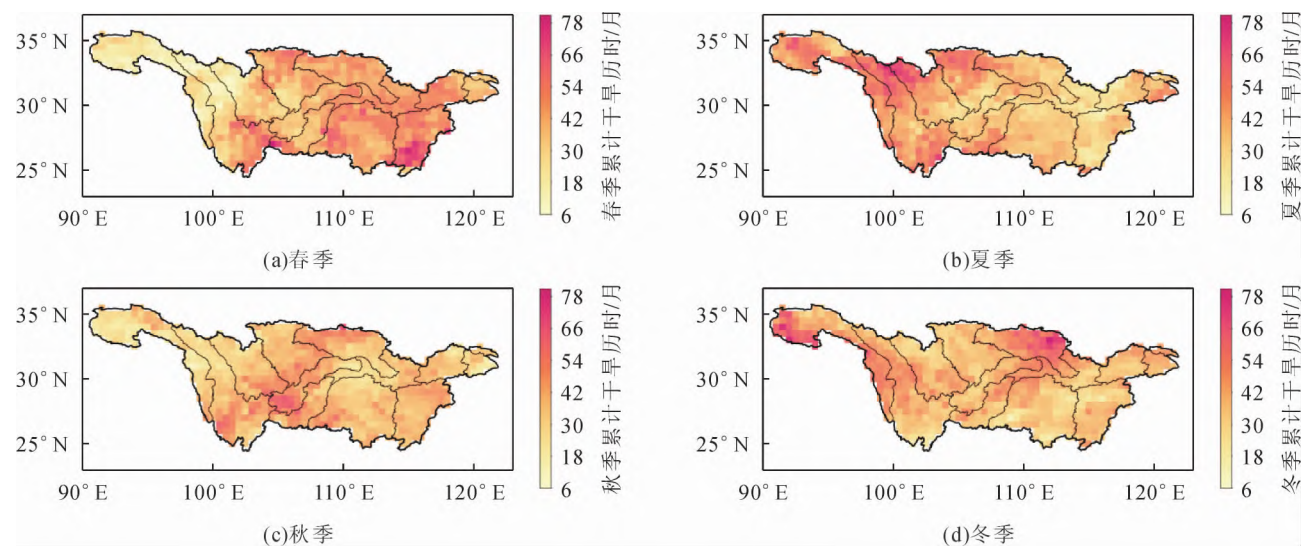


图2 1982 ~ 2018 年长江流域春季、夏季、秋季、冬季干旱事件累计历时空间分布

春季鄱阳湖流域和乌江流域西南部累计干旱历时较长,为78~54个月。长江流域上游西北部整体累计干旱历时值较短,为7~20个月。最小值出现在金沙江流域上游,为6个月。夏季长江流域上游累计干旱历时较长江中下游地区长,累计干旱历时较长区域主要集中在金沙江流域、岷沱江西北部和嘉陵江北部。鄱阳湖流域干旱历时值最短,为13个月。秋季汉江流域北部和长江上游干流区南部累计干旱历时较长,其中最大值出现在汉江流域北部,为67个月;最小值出现在金沙江流域中部,为11个月。冬季累计干旱历时较长的区域主要分布在金沙江流域中上游和汉江流

域,为76~57个月。洞庭湖流域累计干旱历时较短,为13个月。1982~2018年长江流域累计干旱历时季节性和空间分布差异较大。其中秋季累计干旱历时较春季和夏季短。

3.2.2 季尺度干旱频次空间分布特征

通过对长江流域1982~2018年春季、夏季、秋季和冬季干旱累计发生频次的空间分布(见图3)分析,发现长江流域春季、夏季、秋季和冬季累计干旱发生频次的平均值分别为13.94、12.06、13.08和15.28,表明长江流域冬季发生干旱的可能性最大。

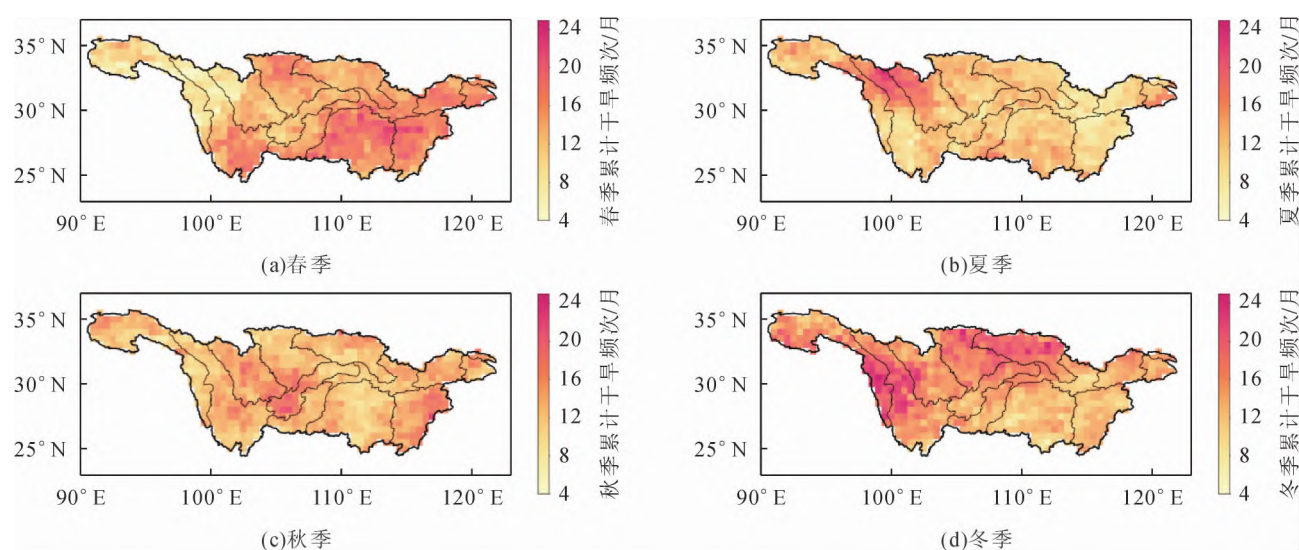


图3 1982~2018年长江流域春季、夏季、秋季、冬季干旱事件累计发生频次空间分布

1982~2018年长江流域春季干旱累计发生频次范围为4~22次,平均为13.94次。其中洞庭湖流域和鄱阳湖流域干旱发生最频繁,累计干旱发生频次均超过16次。金沙江流域北部和岷沱江西北部春季干旱发生频次较低。

1982~2018年长江流域夏季干旱累计发生频次为5~24次,平均为12.06次。干旱累计发生频次最高的区域主要分布在金沙江流域中部、沱江流域的西北部和太湖流域。

1982~2018年长江流域秋季干旱累计发生频次为7~22次,平均为13.08次。其中最容易发生干旱的区域位于鄱阳湖流域东南部、长江上游干流区南部和嘉陵江南部,累计干旱发生频次超过17次;干旱累计发生频次最小值出现在金沙江流域北部,为7次。

长江流域冬季干旱累计发生频次大体呈西北向东南递减趋势,整体处于6~25次之间,平均为15.28次。金沙江流域中部、嘉陵江流域和汉江流域易发生冬季干旱,冬季干旱累计干旱发生频次均超过20次;洞庭湖流域和鄱阳湖流域冬季累计干旱发生频次较低。

### 3.2.3 年尺度干旱历时和干旱强度空间分布特征

长江流域年累计干旱历时和年累计干旱强度空间分布如图4(a,b)所示。从图4中可以看出长江流域年累计干旱历时主要呈“中间长、两边短”的空间分布规律。其中,汉江流域、嘉陵江流域北部和长江上游南部区域年累计干旱历时较长;长江源头年累计干旱历时则较短。长江流域年累计干旱强度由南往北大致呈现“高-低-高”的空间分布规律,具有比较明显的空间异质性。其中,长江干流区域和长江下游的年累计

干旱强度较低,汉江流域、嘉陵江流域、长江源头、金沙江流域下游区域的年累计干旱强度相对较高。通过对比图4(a,b)可知金沙江流域中游地区累计干旱历时较短,但累计干旱强度较大,表明这个区域相对来说更容易发生重旱,这与相关文献分析得出的上游发生重旱的频率要大于中下游区域这一结论相一致<sup>[17]</sup>。

1982~2018年长江流域年尺度累计干旱历时森氏斜率、年累计干旱发生频次的森氏斜率空间分布图见图4(c,d)。金沙江中部、汉江、长江干流的中游地区累计干旱历时呈增加趋势,表明上述区域以干旱化趋势为主;长江流域南部,包括洞庭湖流域南部、金沙江流域南部和鄱阳湖流域南部地区累计干旱历时呈下降趋势,表明上述区域以湿润化趋势为主。值得注意的是,洞庭湖流域南部部分区域累计干旱历时呈显著( $P < 0.05$ )下降趋势,下降幅度达到 $-0.11/a$ ,表明该区域湿润化趋势明显。与累计干旱历时变化趋势空间分布相似,累计干旱强度在长江流域南部和长江源头呈减少趋势,在金沙江流域中部呈现上升趋势。

## 4 结 语

1) 从时间角度分析,1982~2018年长江流域的年尺度和季尺度干旱SPEI整体呈减小趋势,表明长江流域1982~2018年期间以干旱化为主。其中冬季的干旱化趋势尤为明显。同时,年尺度、夏季和冬季的干旱强度和干旱历时呈增加趋势,春季和秋季的干旱强度和干旱历时呈下降趋势。

2) 从空间角度分析,1982~2018年长江流域干旱特征具有明显的空间异质性。对于年尺度干旱而言,金沙江流域中部、汉江、长江干流的中游地区以干旱化



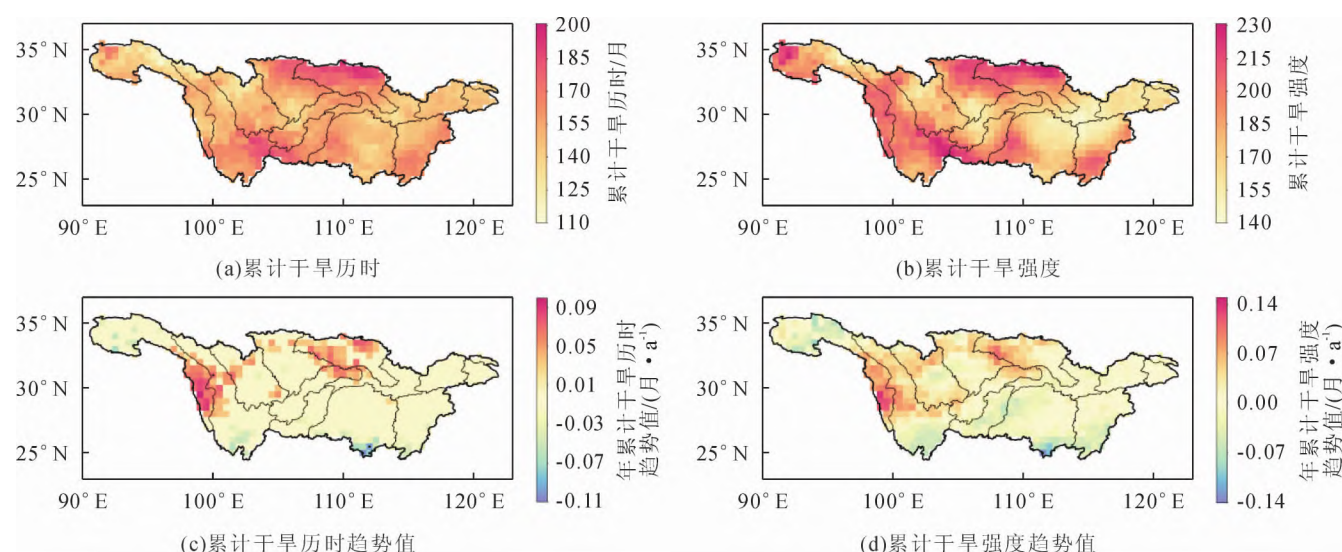


图4 基于 SPEI12 指数的 1982 ~ 2018 年长江流域累计干旱历时、累计干旱强度、年累计干旱历时变化趋势、年累计干旱强度变化趋势空间分布

趋势为主;长江流域南部,包括洞庭湖流域南部、金沙江流域南部和鄱阳湖流域南部地区以湿润化趋势为主。对于季尺度干旱而言,金沙江流域北部春季和秋季干旱历时较短。从季节干旱累计发生频次大小来看,春季和冬季长江流域干旱累计干旱频次较大,洞庭湖流域和鄱阳湖流域春季干旱累计频次最大。冬季干旱主要发生在汉江流域和金沙江流域中部地区。

3) 本研究暂未对于气象要素对长江流域干旱特征及其变化的贡献进行归因,气象要素变化对长江流域干旱趋势及其特征变化的影响有待进一步探讨。

#### 参考文献:

- [1] Yu M, Li Q, Hayes M J, et al. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the standardized precipitation evapotranspiration index: 1951 – 2010 [J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(3): 545 – 558
- [2] Wang L, Yuan X, Xie Z, et al. Increasing flash droughts over China during the recent global warming hiatus [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 1 – 8
- [3] 於琍. 干旱对生态系统脆弱性的影响研究——以长江中下游地区为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(7): 1021 – 1028
- [4] 王文, 许志丽, 蔡晓军, 等. 基于 PDSI 的长江中下游地区干旱分布特征 [J]. 高原气象, 2016, 35(3): 693 – 707
- [5] 秦鹏程, 刘敏. 气象干旱诊断评估方法及其在长江中下游地区的应用 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(11): 1969 – 1976
- [6] 李亿平, 张金玉, 岳平, 等. 2022 年夏季长江流域重大干旱特征及其成因研究 [J]. 干旱气象, 2022, 40(5): 733 – 747

- [7] 夏军, 陈进, 余敦先. 2022 年长江流域极端干旱事件及其影响与对策 [J]. 水利学报, 2022, 53(10): 1143 – 1153
- [8] 穆宏强. 长江流域水资源保护与管理 [J]. 水电与新能源, 2020, 34(9): 1 – 5
- [9] 张博庭. 新时期我国水电开发的新课题 [J]. 水电与新能源, 2022, 36(1): 1 – 5, 12
- [10] 曹博, 张勃, 马彬, 等. 基于 SPEI 指数的长江中下游流域干旱时空特征分析 [J]. 生态学报, 2018, 38(17): 6258 – 6267
- [11] 邓翠玲, 余敦先, 邓瑶, 等. 基于多模式情景的长江中下游未来气象干旱时空演变特征分析 [J]. 长江科学院院报, 2021, 38(6): 9 – 17
- [12] 李明, 赵茹昕, 王贵文, 等. 长江中下游流域降水分区及其气象干旱时间变化特征 [J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(12): 2719 – 2726
- [13] 李峥嵘. 长江流域气象与水文干旱时空变化特征及干旱风险研究 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2021
- [14] 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
- [15] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau [J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63: 1379 – 1389
- [16] 温克刚, 丁一汇. 中国气象灾害大典: 综合卷 [M]. 北京: 气象出版社, 2008
- [17] 水利部长江水利委员会. 长江流域水旱灾害 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002