

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.20180014

易彬, 曾小凡, 赵娜, 等. 基于标准化降水蒸散指数的长江流域旱涝情势演变[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 89-94. YI B, ZENG X F, ZHAO Na, LEI K, et al. Study on the evolution of droughts and floods in the Yangtze River basin based on the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 89-94. (in Chinese)

基于标准化降水蒸散指数的长江流域旱涝情势演变

易彬, 曾小凡, 赵娜, 雷坎

(华中科技大学 水电与数字化工程学院, 武汉 430074)

摘要: 基于长江流域 133 个气象站 1970–2012 年实测逐月降水量和月平均气温资料, 计算不同时间尺度上的标准化降水蒸散指数序列, 研究近几十年来长江流域旱涝情势的时空演变特征。结果表明, 1970–2012 年长江流域整体干旱形势不严重, 但是干旱化的趋势比较明显。与长江上游地区相比, 长江中下游区域的干旱趋势表现得更加突出, 特别是长时间尺度上的干旱趋势非常明显。针对典型极端气象事件分析发现, 标准化降水蒸散指数能够反映出不同时间尺度上长江流域发生的旱涝事件, 表明该指数对于准确评估长江流域的旱涝程度和分布范围具有很好的指示性意义。

关键词: 旱涝情势; 标准化降水蒸散指数; 长江流域; 多时间尺度

中图分类号: P426; P429 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2018)01-0089-06

Study on the evolution of droughts and floods in the Yangtze River basin based on the standardized precipitation evapotranspiration index

YI Bin, ZENG Xiaofan, ZHAO Na, LEI Kan

(School of Hydropower & Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to investigate the change tendencies of the droughts and floods in the Yangtze River basin, we used the standardized precipitation evapotranspiration index on multiple time scales, based on the monthly precipitation and average temperature data from the 133 meteorological stations in the whole basin during 1970–2012. The results showed that the overall drought conditions in the Yangtze River basin were not serious, while the drought tendency was prominent. Compared to the upstream region, the middle and lower reaches of the Yangtze River basin had a more prominent drought tendency, especially on longer time scales. In addition, the analysis of typical extreme meteorological events showed that the standardized precipitation evapotranspiration index could well reflect the floods and droughts in the Yangtze River basin on different time scales. This suggests that the index can be used to precisely evaluate the extents and distributions of the hydrological regimes in this basin.

Key words: droughts and floods; standardized precipitation evapotranspiration index; Yangtze River basin; multiple time scales

在全球气候变暖的背景下, 区域极端气候事件频发, 其中, 旱涝灾害影响范围最大, 危害程度最深^[1], 各国学者从各个角度进行了深入研究^[2-6]。在我国, 由于降雨时空分布不均, 旱涝灾害更加频繁。旱涝灾害等极端气象事件对人类经济生活影响极大, 造成巨大的直接或间接经济损失, 为此有必要对

流域旱涝事件的时空演变进行分析, 为流域水资源管理和相关部门准确评估旱涝灾害提供参考信息。

为准确评估流域旱涝情况, 2010 年 Vicente Serrano S M 等在标准降水化指数 (Standardized Precipitation Index, 后简称 SPI) 基础之上提出标准化降水蒸散指数 (Standardized Precipitation Evapor

收稿日期: 2017-02-25 修回日期: 2017-04-17 网络出版时间: 2018-01-17
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180115.0926.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金 (51239004; 91547208; 51309105; 51409109)

Funds: National Natural Science Foundation of China (51239004; 91547208; 51309105; 51409109)

作者简介: 易彬 (1996), 男, 湖南岳阳人, 主要从事水文水资源研究。E-mail: yi_bin96@163.com

通讯作者: 曾小凡 (1980), 女, 湖北人, 副教授, 主要从事气候和水文响应研究。Email: zengxiaofan@hust.edu.cn

transpiration Index, 后简称 SPEI)^[7], 该指数为基于降水量和潜在蒸散发的干湿指数。SPEI 在计算中用月降水量与月潜在蒸发量之差替代 SPI 指数计算^[8]中的月降水量, 因其综合考虑降水、蒸散发作用, 且能够在多时间尺度上评估干旱情况, 所以其适用性更好, 得到了比较广泛的应用^[9-12]。庄少伟等^[11]通过研究 SPEI 指数在中国地区的适应性也指出, 在我国年均降水量大于 200 mm 区域各种尺度 SPEI 分析均可适用, 其中 12 个月时间尺度的 SPEI 分析在各区适用性最好。

已有大量学者从不同角度研究长江流域旱涝形势, 刘志雄, 肖莺^[13]用 Z 指数进行长江上游地区旱涝形势评估, 结果表明, 无论是年还是四季旱涝等基本上是正常占一半左右, 偏旱偏涝分别为 15%, 重涝重旱 5% 左右, 与理论频率基本一致; 于金文等^[14]对长江流域地区旱涝的转化及时空变化特征进行了分析; 许继军等^[15]从旱涝形势的评估方法上展开研究; 此外, 还有从干旱成因上进行分析^[16-17]。

长江流域地跨中国东部、中部、西部三大经济区, 是世界第三大流域。中国科学院南京地理与湖泊研究所研究表明, 长江流域在 1979-2012 年间共发生 29 次水文干旱事件, 平均持续时间 7.5 个月, 平均缺水 146 mm。长江流域是我国水量最丰富的流域, 然而近年来旱涝灾害频繁发生, 如 2006 年夏季干旱、2010 年 8 月高温、2012 年 7 月暴雨洪涝、2013 年夏季高温热浪等。为此, 本文基于实测气象数据分析四个时间尺度(3、6、9、12 月)上的 SPEI 指数, 研究长江流域 1970-2012 年旱涝情势的时空演变规律, 为准确评估长江流域旱涝程度、范围等提供参考依据。

1 研究数据与方法

1.1 研究数据

本文选取长江流域 133 个气象站点 1970-2012 年的逐月降水和平均气温资料, 资料来源于国家气象信息中心。其中, 以宜昌水文站为界, 其上游的 70 个气象站反映长江流域上游气象条件, 其下游的 63 个站反映长江流域中下游地区的气象条件。站点分布如图 1 所示。

1.2 研究方法

本文采用基于月尺度降水和气温计算的 SPEI 指数, 并采用 M-K 趋势分析法对长江流域 1970-2012 年干旱情况进行研究。

SPEI 计算方法已较为完备, 具体计算步骤参见文献 Vicente Serrano et al^[7]。SPEI 指数干旱等级

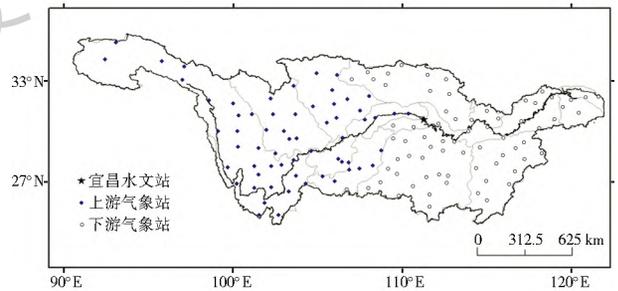


图 1 长江流域站点分布

Fig. 1 Distribution of observation stations in the Yangtze River basin

分级依据参见熊光洁等^[12]的研究。SPEI 指数计算原理是利用降水量与蒸散发量的差值偏离平均状态的程度表征某地区的干旱, 该指数集合了 PDSI 和 SPI 指数计算的优势, 能较好的反应某地区的旱涝灾害情况。本研究中主要计算四个时间尺度(3 月、6 月、9 月、12 月)的 SPEI 指数值, 季节尺度上的 SPEI 对农林业的干湿条件有较大指导意义, 6 月-9 月尺度上的 SPEI 值可以反映较长时间尺度上的降水情势, 12 月尺度 SPEI 值则能体现年变化趋势, 有助于预测该区域旱涝形势发展。

在分析 SPEI 指数的时序演变特征时, 采用 Mann-Kendall 检验法(简称 M-K 法)^[18]。该方法最初由 Mann 和 Kendall 提出, 后期运用过程中不断改进, 引入预置白 Mann-Kendall 检验及去趋势预置白 Mann-Kendall 检验。章诞武^[19]等研究指出, 改进 M-K 法对降水趋势分析的影响不大, 且在长江流域三种方法的差异性最小, 因此, 本文仍采用普通 M-K 分析法。

2 长江流域旱涝演变分析

基于长江流域及周边地区 133 个气象观测站在四个时间尺度上的 SPEI 指数计算, 分析长江流域上游和中下游地区旱涝情势的时间演变和空间变化特征。

2.1 SPEI 指数的时序演变特征

2.1.1 流域旱涝基本情势

对所选 133 个站点不同时间尺度上的 SPEI 指数统计分析发现(表 1), 四个时间尺度上, 极端干旱、严重干旱、中等干旱、轻微干旱、不干旱的站点占总数的比例均基本一致, 分别约为 1.2%, 5.0%, 10.8%, 33.4%, 49.6%, 说明整体上长江流域在 1970-2012 年间的干旱情势不是特别严峻。

2.1.2 流域旱涝演变趋势分析

利用 M-K 方法对 133 个站点在四个时间尺度上的 SPEI 指数进行趋势分析发现(表 2), 长江流域绝大多数站点在不同时间尺度下的 SPEI 指数序列的 M-K 检验都为负值, 表明流域干旱化呈现加重的趋势。

表1 长江流域各时间尺度不同干旱等级所占比例

Tab.1 The proportions of different drought grades on different time scales in the Yangtze River basin (%)

干旱等级	SPEI_3	SPEI_6	SPEI_9	SPEI_12
极端干旱	1.2	1.3	1.2	1.2
严重	4.9	4.9	5.0	5.1
中等	10.8	10.8	10.7	10.7
轻微	33.2	33.5	33.5	33.3
不干旱	49.8	49.6	49.5	49.7

表2 长江流域不同时间尺度下 SPEI 指数序列的 M-K 值分析

Tab.2 M-K value analysis of SPEI index series on different time scales in the Yangtze River basin

地区	SPEI_3		SPEI_6		SPEI_9		SPEI_12	
	U>0	U<0	U>0	U<0	U>0	U<0	U>0	U<0
上游	8	62	10	60	8	62	9	61
	2*	42*	4*	48*	4*	48*	4*	50*
	1**	37**	2**	41**	3**	45**	3**	47**
中下游	1	62	0	63	0	63	0	63
	0	31*	0	46*	0	50*	0	54*
	0	21**	0	35**	0	44**	0	49**

注:表中数字表示M-K检验为正(U>0)或负(U<0)的站点数。其中,*代表通过置信度95%检验的站点个数,**代表通过置信度99%检验的站点个数。

从表2可知,在长江流域上游地区,对3个月时间尺度的SPEI而言,70个站点中有42个站点的M-K检验都通过置信度95%的检验,其中37个站通过了置信度99%的检验,仅有8个站点的M-K检验值为正值,说明长江上游地区干旱程度有明显上升趋势。具体而言,长江上游地区干旱趋势减小明显(U为正值,表明干旱化减小)的四个站分别是伍道梁、新龙、理塘和康定,除此之外,其余大部分站点基本呈现干旱增加趋势,即通过置信度95%检验,其中位于青海省的曲麻莱、玉树和清水河站点以及位于长江中上游地区的大部分站点干旱趋势都极

其显著,通过置信度99%检验。其他时间尺度上的SPEI指数呈现类似的变化趋势,特别是12个月时间尺度的SPEI指数的M-K检验值表明,长时间尺度上长江流域上游地区的干旱情势呈现加剧的态势。

对长江流域中下游地区而言,除了3个月尺度的南城站,没有干旱趋势减少的站点,且南城站的SPEI值也未通过置信度检验。可以看到,中下游地区气象站点在不同时间尺度下SPEI指数序列的M-K值基本上全为负数,随着时间尺度增大,通过置信度95%检验的站点数有较大幅度的增加,3月尺度到6月尺度通过置信度95%检验的站点个数分别为31、46个,表明中下游地区的干旱强度在6个月及更长的时间尺度上呈增加趋势。

从长江上游和中下游对比来看,3个月和6个月时间尺度上,中下游地区气象站点通过置信度95%检验(负值,表明于旱化增加)的个数明显小于上游地区,其余时间尺度上,上游和中下游地区差异不大。此外还要注意到,长江上游地区有少数站点呈现湿润化趋势,但中下游地区几乎全部呈干旱明显增加状态。

2.2 SPEI 指数的空间变化特征

首先计算133个站点各个时间尺度的SPEI指数在1970-2012年间的平均值,结果表明,不同时间尺度上的SPEI指数均值基本在0~0.01之间,个别站点小于0,说明各时间尺度上SPEI指数的多年平均值相差不大,即自然状态下,长江流域整体上干旱形势并不严峻。

进一步基于不同时间尺度上SPEI指数在1970-2012年间的M-K检验值,利用反距离插值法进行SPEI指数的空间变化分析,见图2。由图2(a)可知,3个月时间尺度SPEI指数序列的M-K值在金沙江下游、嘉陵江、乌江、汉江、上游干流区间等区域

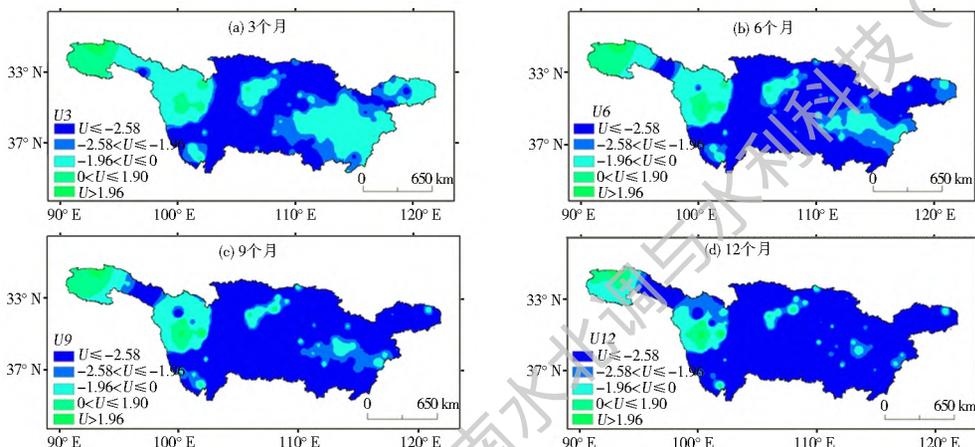


图2 长江流域不同时间尺度 SPEI 指数变化趋势的 M-K 值分布

Fig.2 Distribution of M-K value of SPEI index on different time scales in the Yangtze River Basin

呈现较大负值,这些区域除四川、重庆部分地区,干旱趋势十分显著,通过置信度 99% 检验,同时,长江上游地区的金沙江下游、中下游地区除去汉江流域,均没有呈明显的干旱化增加趋势或者干旱趋势不显著。从图 2(b)– 2(d) 可以看到,6 个月时间尺度上,干旱趋势明显增加的区域较 3 月时间尺度有所增加,9 月及 12 月时间尺度上,长江流域干旱化趋势表现得更为显著,除了长江源头、金沙江上游部分区域,全流域干旱情势表现出非常明显的增加态势。而王志伟^[20]等利用 Z 指数方法研究我国十大水文区 1951– 2005 年的干旱变化特征表明,对于长江流域而言,55 年来的干旱范围在逐步扩大,与本研究结果相一致。

总体来说,四个时间尺度上,长江流域上游地区的金沙江上游干旱趋势不明显,其他地区则随着考虑时间尺度的增加,呈现明显干旱化趋势的范围也逐渐扩大,表明长江流域在长时间尺度上有干旱程度增加的趋势。

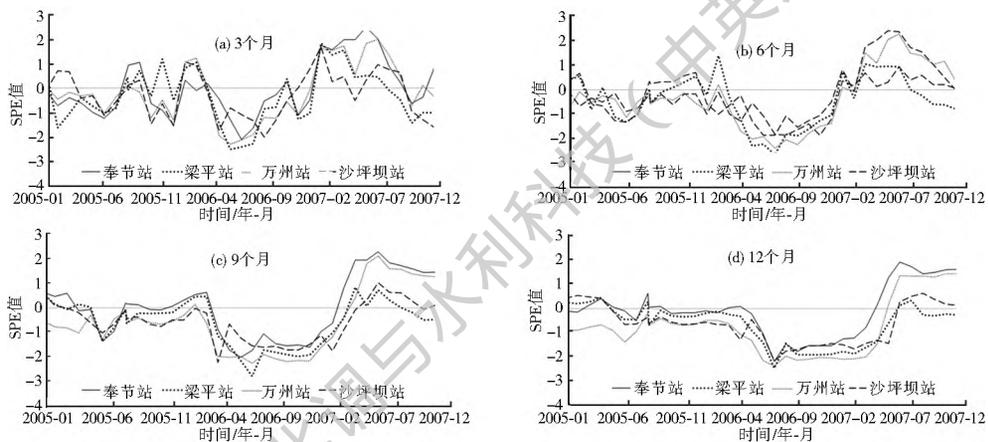


图3 奉节、梁平、万州、沙坪坝站不同时间尺度 2005– 2007 年 SPEI 指数序列

Fig. 3 SPEI index series from 2005 to 2007 on different time scales at Fengjie, Liangping, Wanzhou, and Shapingba stations

据图 3 可知,四个时间尺度上,2006 年 4 月– 12 月份的 SPEI 指数基本上全部为负数,与其他时间段相比,2006 年 6 月– 8 月份 SPEI 指数的值明显更小,特别是半年时间尺度上,梁平站 2006 年 8 月份的 SPEI 指数达到 -2.61 ,准确反映出重庆市在 2006 年 8 月份遭遇的严重旱情。此外,较小时间尺度上的 SPEI 指数值波动较为剧烈,能够反映各个季度内的干旱变化情况,与 2006 年重庆市 6 月– 8 月份干旱情况吻合,而 9 个月、12 个月时间尺度的 SPEI 指数值则更为稳定,表明重庆市在 2006 年全年降水呈减少趋势,干旱情况比较严重。

段莹^[22]比较分析了三种干旱指标 (PDSI、SPEI、CI) 在长江中下游地区的适应性,通过其分析表明,三种干旱指数都能够用来描述江淮流域及长江中下游地区的干旱过程,但是各存在优缺点,

3 典型案例分析

本研究进一步根据典型旱涝事件的记录,选择重庆市 2006 年夏季干旱,2007 年 6 月暴雨洪涝和青海省三江源地区 2006 年气候变化三个典型案例,分析不同时间尺度的 SPEI 指数在长江流域的适用性特征。

3.1 重庆市 2006 年夏季干旱

据中国气象灾害年鉴^[21]记录,2006 年重庆遭遇百年一遇高温旱灾,严重威胁到社会经济和人民生活。到 2006 年 8 月底,干旱造成重庆市水利工程蓄水不足 9.5 亿 m^3 ,仅占储蓄水量的 33% 左右,全市 2/3 溪河断流,275 座水库水位处于死水位。为分析 SPEI 指数对此次干旱事件的反映程度,选取位于重庆市的四个气象站点分别为奉节站、梁平站、万州站、沙坪坝站,并提取这些站点在不同时间尺度下的 2005 年 1 月至 2007 年 12 月间 SPEI 序列(见图 3)。

SPEI 指数对旱情较重的区域表现良好,但是 3 个月时间尺度的 SPEI 指数显示的干旱开始时间有所滞后且偏早,与本文选择的 2006 年重庆干旱事件分析有所冲突,本文通过分析 2006 年四个时间尺度 SPEI 指数值与 2006 年重庆发生干旱的相应月份发现,3 个月时间尺度 SPEI 指数值能较好反应 2006 年重庆干旱情况。

3.2 重庆市 2007 年 6 月暴雨洪涝

据中国气象灾害年鉴^[23]记录,2007 年 5 月下旬,重庆奉节发生 50~ 100 mm 暴雨,局部达到 150 mm;2007 年 7 月中旬沙坪坝发生 50~ 150 mm 暴雨,局部达 350 mm。从图 3(a)– 图 3(d) 可知,2007 年 6 月份前后,重庆市奉节站、沙坪坝站在四个时间尺度上的 SPEI 指数值呈现较大正值。奉节站 2007 年 6、7 月份在 3 个月时间尺度的 SPEI 指数值分别

为 2.47、1.99, 是 2007 年 1 月-12 月最大值; 2007 年沙坪坝站 7、8 月份在 3 个月时间尺度的 SPEI 值分别为 0.94、0.75, 也为 2007 年极大值, 与实际情况十分吻合。

3.3 青海省三江源地区 2006 年气候变化

据中国气象灾害年鉴^[24]记录, 青海省 2006 年

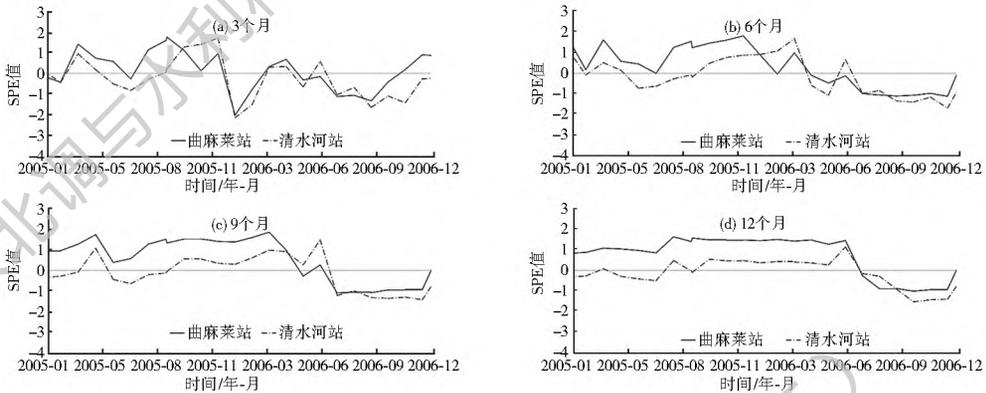


图 4 曲麻莱、清水河站不同时间尺度 2005-2006 年 SPEI 指数序列

Fig. 4 SPEI index series from 2005 to 2006 on different time scales at Qumalai and Qingshui River stations

据图 4 可知, SPEI 指数由于考虑了气温的影响因而能较好反应 2006 年 1 月、2 月份三江源地区温度异常现象, 三个月时间尺度上, 两个气象站点 1 月份 SPEI 指数分别为 -2.02、-2.14, 均为该年最小值; 此外, 观察 6、9、12 个月时间尺度的 SPEI 序列发现, 2006 年 SPEI 指数稳定呈现为负值, 表明该年是较为干旱的一年, 这与 2006 年是 1961 年以来温度最高的一年以及降水量偏少相一致。

根据以上三场典型案例的分析表明, SPEI 指数既能适用于长上游地区, 在中下游地区对旱涝形势也有较好的反应, 总体上, SPEI 指数在长江流域的适用性较好, 能够准确反映出不同时间尺度上的旱涝演变和分布特征。

4 结论

本文根据长江流域及周边 133 个气象观测站 1970-2012 年的实测降水、气温资料, 计算了长江流域在 3、6、9、12 个月四个时间尺度的 SPEI 指数, 据此分析长江流域旱涝情势的时空变化特征, 并选择典型年份的极端气象事件与 SPEI 指数进行对比分析, 主要结论如下。

(1) 通过分析长江流域不同时间尺度上的 SPEI 值发现, 整体上长江流域干旱情况不是特别严重, 四个时间尺度上的各干旱等级(极端干旱、严重干旱、中等干旱、轻微干旱、不干旱)分布比例大体相同。但是, 流域内干旱化趋势比较显著, 表明长江流域在不同时间尺度上的干旱情势呈增加趋势。

气温为 1961 年以来最高的一年, 较常年偏高 1.4℃, 平均降水量较历年偏少 4%, 1、2 月份青海省尤其是三江源地区温度异常偏高。为分析 SPEI 指数对该年气候的评估, 提取三江源地区曲麻莱、清水河两个气象站点 2005-2006 年间不同时间尺度 SPEI 序列(图 4)。

(2) 用 M-K 法分析 SPEI 指数序列的变化趋势并进行空间插值发现, 长江流域 90% 以上的区域处于干旱趋势加剧状态, 一半以上的站点通过置信度 99% 的检验且 M-K 值为负。此外, 随着时间尺度的增加, 通过置信度检验(M-K 值为负值)的站点个数有所增加, 从空间上来看, 长江流域呈现明显干旱化的区域也逐渐扩大, 在 12 个月时间尺度上除了长江源区几乎全流域均呈现非常显著的干旱趋势, 这也表明长江流域旱涝情势的变化可能对流域内特别是中游地区农林业的发展有较大影响。

(3) 通过对两场典型极端气象事件的对比分析表明, 不同时间尺度上 SPEI 指数可以准确反映出流域不同地区的旱涝情况, 在长江流域具有很好的适用性, 能够用于评估流域旱涝情势的时空特征。

参考文献(References):

- [1] 梁留科. 旱涝灾害的一些基本问题初探[J]. 灾害学, 1996(1): 48-53. (LIANG L K. Study on some basic problems of drought and waterlogging[J]. Journal of Catastrophology, 1996(1): 48-53. (in Chinese))
- [2] KARL T R. Some spatial characteristics of drought duration in the United States[J]. Journal of Applied Meteorology, 1983, 22(8): 1356-1366.
- [3] MOSLEY M P, PEARSON C P, MOSLEY M P, et al. Floods and droughts: the New Zealand experience[J]. 1997.
- [4] JIANG T, ZHANG Q, ZHU D, et al. Yangtze floods and droughts (China) and teleconnections with ENSO activities (1470-2003)[J]. Quaternary International, 2006, 144(1): 29-37.

- [5] 陈家其,施能.全球变暖下我国旱涝灾害可能情景的初步研究[J].地理科学,1995,15(3):201-207.(CHEN J Q, SHI N. The preliminary study on possible scenarios of flood and drought in China in the case of global warming[J]. Scientia Geographica Sinica, 1995, 15(3): 201-207. (in Chinese))
- [6] 陈玉琼.旱涝灾害指标的研究[J].灾害学,1989(4):10-13.(CHEN Y Q. A study of hazard indexes of drought and flood[J]. Journal of Catastrophology, 1989(4): 10-13. (in Chinese))
- [7] VICENTE SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ MORENO J I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index - SPEI[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [8] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[J]. 1993.
- [9] 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.
- [10] ABDULLAH H M. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) based drought assessment in Bangladesh [C]// International Conference on Environmental Aspects of Bangladesh. 2014.
- [11] 庄少伟,左洪超,任鹏程,等.标准化降水蒸发指数在中国区域的应用[J].气候与环境研究,2013,18(5):617-625.(ZHUANG S W, ZUO H C, REN P C, et al. Application of standardized precipitation evapotranspiration index in China[J]. Climatic and Environmental Research, 2013, 18(5): 617-625. (in Chinese)) DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12007.
- [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 G J, ZHANG B K, LI C Y, et al. Characteristics of drought variations in southwest China in 1961-2012 based on SPEI[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 2013, 9(3): 192-198. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2013.03.006.
- [13] 刘志雄,肖莺.长江上游旱涝指标及其变化特征分析[J].长江流域资源与环境,2012,21(3):310.(LIU Z X, XIAO Y. Indices and characteristic of drought and flood in the upper basin of the Changjiang river[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(3): 310. (in Chinese))
- [14] 于文金,周鸿渐,占达颖,等.长江流域旱涝灾害特征研究[J].灾害学,2013,28(3):42-47.(YU W J, ZHOU H J, ZHANG D Y, et al. Characteristic research on drought and flood disasters in the Yangtze River Basin[J]. Journal of Catastrophology, 2013, 28(3): 42-47. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2013.03.009.
- [15] 许继军,杨大文,雷志栋,等.长江上游干旱评估方法初步研究[J].人民长江,2008,39(11):1-5.(XU J J, YANG D W, LEI Z D, et al. Pilot study of the drought assessment method in the Yangtze river basin[J]. Yangtze River, 2008, 39(11): 1-5. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4179.2008.11.001.
- [16] 张琼,吴国雄.长江流域大范围旱涝与南亚高压的关系[J].气象学报,2001,59(5):569-577.(ZHANG Q, WU G X. The large area flood and drought over Yangtze river valley and its relation to the South Asia high[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2001, 59(5): 569-577. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0577-6619.2001.05.007.
- [17] 魏凤英,张先恭.影响长江流域异常旱涝的因子分析[J].应用气象学报,1992(3):321-327.(WEI F Y, ZHANG X G. An analysis on control factors of drought/flood in the Changjiang valley[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 1992(3): 321-327. (in Chinese))
- [18] KENDALL M G. Rank correlation methods[J]. Biometrika, 1948, 11 en 12(1/2): 86-91.
- [19] 章诞武,丛振涛,倪广恒.基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J].水科学进展,2013,24(4):490-496.(ZHANG D W, CONG Z T, NI G H. Comparison of three Mann Kendall methods based on the China's meteorological data[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(4): 490-496. (in Chinese))
- [20] 王志伟,翟盘茂,武永利.近55年来中国10大水文区域干旱化分析[J].高原气象,2007,26(4):874-880.(WANG Z W, ZHAI P M, WU Y L. Analysis on drought variation over 10 hydrological regions in China during 1951-2005[J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(4): 874-880. (in Chinese))
- [21] 中国气象局.中国气象灾害年鉴2007[M].北京:气象出版社,2007:19-20.(China Meteorological Administration. China yearbook of meteorological disasters 2007[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 19-20. (in Chinese))
- [22] 段莹.三种干旱指标在江淮及长江中下游地区的适应性研究[D].南京信息工程大学,2013.(DUAN Y. Study on the adaptability of three drought indices in the Yangtze and Huai River and middle and lower reaches of Yangtze River[D]. Nanjing University of Information Science & Technology, 2013. (in Chinese))
- [23] 中国气象局.中国气象灾害年鉴2008[M].北京:气象出版社,2008:18-20.(China Meteorological Administration. China yearbook of meteorological disasters 2008[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2008: 18-20. (in Chinese))
- [24] 中国气象局.中国气象灾害年鉴2007[M].北京:气象出版社,2007:182-183.(China Meteorological Administration. China yearbook of meteorological disasters 2007[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 182-183. (in Chinese))