

1951—2016 年长江荆南三口地区旱涝演变与急转特征分析

张 瑞, 吕殿青, 李景保

(湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙 410081)

摘要: 根据荆南三口地区 22 个气象站点 1951—2016 年月降水资料, 采用标准化降水指数(SPI)及夏季长周期旱涝急转指数(LDFAI), 辅以 EOF 分析、小波分析、M-K 检验等相关分析方法, 分析荆南三口地区 66 年旱涝的变化特征。结果表明: (1) 旱涝年际变化较大, 20 世纪 50 年代前涝后旱、60—70 年代整体干旱、80 年代旱涝交替、90 年代洪涝、21 世纪前涝后旱, 且四季均可发生旱涝事件。 (2) 空间尺度可分为 3 个区域类型, 东南部(湿润区)、中部(降水均匀区)、西北部(偏干区), 且季节空间分布上存在较大差异, 西北部的五峰、宜昌、荆州等地四季干旱较多, 中部的安乡、南县、华容等地四季洪涝较多。 (3) 年与四季多以 5 年、10 年周期为主, 并具有 30~35 年的长周期。 (4) 旱涝急转指数在 1981 年和 2015 年发生显著变化, 而旱涝强度在 1972 年和 2014 年发生显著突变。 (5) 宜昌、石门、澧县等夏季多为旱转涝; 五峰、宁乡、安乡、华容、常德等地夏季多为涝转旱。

关键词: 标准化降水指数; 夏季长周期旱涝急转指数; 旱涝变化特征; 长江荆南三口地区

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0132-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.021

An Analysis on Evolution of Drought-flood and Its Abrupt Alternation in Three Outlets Along Jingjiang Reaches of Yangtze River from 1951 to 2016

ZHANG Rui, LÜ Dianqing, LI Jingbao

(College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081)

Abstract: Based on the monthly precipitation data of 22 meteorological stations in three outlets region along Jingjiang reaches of Yangtze River from 1951 to 2016, the characteristics of drought-flood variation during 66 years were analyzed by using the standardized precipitation index (SPI), long cycle drought-flood abrupt alternation index (LDFAI), EOF (empirical orthogonal function) analysis, Morlet wavelet analysis and M-K (Mann-Kendall) test. Results showed that: (1) There were large inter-annual variations. Specifically, drought after flood in 1950s, entire drought in 1960s and 1970s, alternation of drought and flood in 1980s, entire flood in 1990s, drought after flood in 2000s, and even-distributed drought-flood in any seasons. (2) Spatially, there were three types of drought-flood in the area, i. e. the flood-prone southeastern zone, the central zone with normal precipitation, and the drought-prone northwest zone, which had distinct seasonal distribution patterns of drought-flood. (3) Frequencies of some 5 and 10 years could be conceived, and stable frequencies of 30~35 years were significant. (4) The LDFAI index was changed in 1981 and 2015, while the intensity changed in 1972 and 2014. (5) In summer, the precipitation in Yichang, Shimen and Lixian changed from drought to flood, while the trends were opposite in and that i Wufeng, Ningxiang, Anxiang, Huarong and Changde.

Keywords: standardized precipitation index; long cycle drought-flood abrupt alternation index; the characteristics of drought-flood variation; three outlets along Jingjiang of Yangtze River

近 60 年来,我国约以 $0.023\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 的气温逐步上升,是全球温升幅度的 2 倍^[1]。在全球气候暖干化的背景下,水循环格局正发生着深刻的变化,百年或几十年一遇的极端干旱或异常降水事件持续增多,进一步加剧了旱涝灾害的频率和强度^[2-4]。据统计,1949—2013 年,我国因气象灾害累积死亡人口超过

155 万人,造成直接经济损失累积约 12 亿(2013 年价格)^[5],严重制约了经济社会的可持续发展。因此,旱涝灾害成为当前气象灾害科学研究领域中的热点问题之一^[6-9]。

荆南三口地区位于长江中游南岸,属于亚热带季风气候,主要以大气降水为主,年降水量 1 300 mm,

降水具有年内和年际间分配不均匀的特点,且地处低山丘岗,形成西北高东南低的趋势,大气降水较多形成的地表水使得该地成为长江中游典型的气象旱涝灾害频发区;另一方面,人类活动(水利工程等)的影响,三口水系中的松滋河、虎渡河、藕池河已成为典型的季节性河流即丰水期(5—8月)水量丰沛,洪涝频率增大,枯水期(11月至次年4月)三口断流,季节性水资源短缺,旱灾频率增大,尤其是三峡水库蓄水后三口断流时间延长,增大了旱灾频率,频发的旱灾已对该地区造了严重的经济损失^[10]。

近年,许多学者基于不同的气候数据资料,采用不同方法对长江流域的旱涝灾害进行研究,并取得了一定进展。闪丽洁等^[11]根据长江中下游流域 75 个雨量站近 50 年的日降水资料,利用 LDFAI 及 SDFAI 全面分析了此地区旱涝急转的趋势变化和时空分布特征。王婷等^[12]利用 CI 指数分析近 52 年洞庭湖流域气象干旱的时空分布特征。程智等^[13]利用 SPI 和灾情资料挑选 1960—2011 年典型的旱涝急转事件,研究长江中下游的旱涝急转气候特征。易彬等^[14]基于长江流域 133 个气象站 1970—2012 年气象资料,利用 SPEI 分析旱涝的时空演变特征。从以上文献分析来看,以往的研究主要集中在长江流域的大尺度上,而从更小的流域尺度分析局地旱涝演变与急转特征的研究不多,且比较片面单一地研究旱涝演变特征或急转特征,两者结合分析的较少。同时,长江荆南三口地区以往的研究主要集中在水文、水系、水资源等方面^[15-17]。显然,开展荆南三口地区旱涝演变及旱涝急转特征研究,对全面了解该地区的旱涝发生、发展规律,以及制定防洪抗旱减灾规划、协调新的江湖关系具有重要意义。

鉴于此,本文通过对比标准化降水指数(SPI)与标准化径流指数(SRI)对旱涝年的吻合度,得出 SPI 指标更好,采用荆南三口地区及周边地区(1951—2016 年)逐月降水观测资料,选用 SPI 作为旱涝定量评价指标,并结合 EOF、小波分析、M-K 趋势检验等方法全面分析荆南三口地区旱涝时空演变及旱涝急转特征,为预测旱涝灾害变化趋势提供理论依据。

1 数据与方法

1.1 资料选取

本文研究数据采用荆南三口地区附近的荆州、宜昌、南县、常德、沅江、安乡、华容、澧县、桃源、宁乡等 22 个国家数据基本气象站 1951—2016 年 66 年逐月降水资料, 站点分布见图 1。数据均来自中国气象数据网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)。此外, 选取位于荆南三口虎渡口的弥陀寺站、松滋口的沙道观站和新江口站、藕池口的康家岗站和管家铺站 5 个水文站点的月径流量, 数据来源于湖南省水利厅、湖南水文

水资源勘测局和湖南省水利厅网站(<http://www.hnsw.com.cn/Default.aspx>)水情日报表。利用 ArcGIS 9.3 的克里格法(Kriging)对部分年份的缺失值进行插值处理,使年降水量和径流量序列长度保持一致。从统计意义上看,这样长的序列能够获得可信的趋势效果。本文季节以气象学标准进行划分:3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为冬季,12 月至翌年 2 月为冬季。

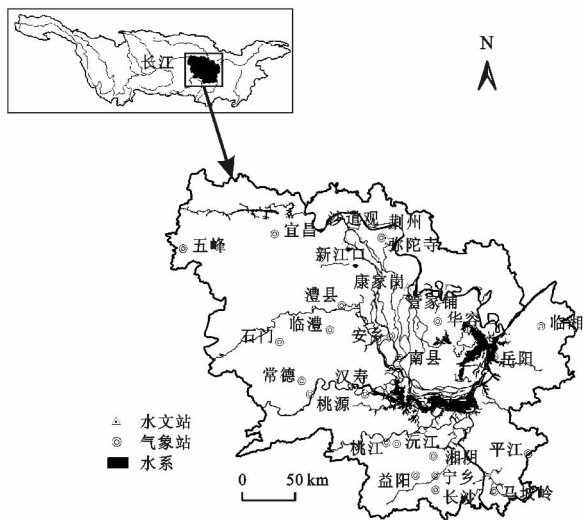


图 1 荆南三口地区站点分布

1.2 研究方法

1.2.1 标准化降水指数(SPI) SPI指数是由 McKee等^[18]于1993年提出的,由于降水在空间上是一种偏态分布,实际应用中一般采用Γ分布概率来描述降水量的变化,经正态标准化求解。SPI指数具有多时间尺度的优势。不同时间尺度的SPI具有不同的物理意义,如1个月(SPI1)反映短时间内的降水量,即土壤水分的动态变化;3个月(SPI3)反映季节性降水量;6个月(SPI6)反映中长时间降水量变化趋势;12个月(SPI12)反映长时间降水量变化格局。具体计算步骤参考文献[18]。本文从不同的时间尺度SPI(SPI1、SPI3、SPI6、SPI12)分析荆南三口地区的旱涝变化特征及变化过程。

1.2.2 标准化径流指数(SRI) 标准化径流指数与标准化降水指数类似,即将指数中输入由降水替换为径流,用于量化水文干旱^[19],SRI 反映气候对径流滞后影响水文过程。根据国家标准《气象干旱等级》,将 SPI 和 SRI 值作为定量指标划分为 9 个旱涝类型^[20](表 1)。

1.2.3 经验正交函数分析法 经验正交函数分析法也称特征向量分析或主成分分析,特征向量对应的空间样本即空间特征向量或空间模态(EOF),反映在一定程度上要素场的空间分布特点。主成分对应的时间变化即时间系数(PC),反映相对应空间模态随时间的权重变化,则 EOF 时空分解, $X = EOF_{m \times n} \times PC_{m \times n}$ 。式中: m 为站点数, n 为年数;具体计算步骤参见文献

[21]。同时结合 ArcGIS 软件中的反距离权重插值法(IDW)实现旱涝的空间分布特征。

表 1 旱涝等级划分标准

指标	特旱	重旱	中旱	轻旱	正常	轻涝	中涝	重涝	特涝
SPI	≤ -2.0	$-2.0 \sim -1.5$	$-1.5 \sim -1.0$	$-1.0 \sim -0.5$	$-0.5 \sim 0.5$	$0.5 \sim 1.0$	$1.0 \sim 1.5$	$1.5 \sim 2.0$	≥ 2.0
SRI	≤ -2.0	$-2.0 \sim -1.5$	$-1.5 \sim -1.0$	$-1.0 \sim -0.5$	$-0.5 \sim 0.5$	$0.5 \sim 1.0$	$1.0 \sim 1.5$	$1.5 \sim 2.0$	≥ 2.0

1.2.4 Morlet 小波分析 小波分析在气象中的应用有很多,常见的有 Morlet 小波、Marr 小波函数,而 Morlet 小波在时间与频率的局部化之间有着很好的平衡,即本文采用 Morlet 小波分析,对年和季节 SPI 值进行周期变化分析,计算步骤参考文献[22]。

1.2.5 Mann-Kendall 检验法 Mann-Kendall 检验法即 M-K 法,是一种简便有效的非参数统计法,广泛应用于气候、气象等趋势检验方面,具体计算过程见参考文献[21],在一个坐标系中 2 条曲线若在临界直线之间有交点,则交点所对应的时间为突变点^[21]。

1.2.6 长周期旱涝急转指数(LDFAI) LDFAI 即夏季长周期旱涝急转指数,指在某一时间段内,旱涝交替出现的情形,此种现象在长江中下游区域时常发

生,具有典型的区域性,具体计算公式为^[23]:
$$LDFAI=(R_{78}-R_{56})\times(|R_{56}|+|R_{78}|)\times 1.8^{-|R_{56}+R_{78}|}$$

式中: R 为标准化降水量; R_{56} 和 R_{78} 分别表示 5—6 月和 7—8 月的标准化降水量; $(R_{78}-R_{56})$ 表示旱涝急转强度项; $(|R_{56}|+|R_{78}|)$ 表示旱涝强度项; $1.8^{-|R_{56}+R_{78}|}$ 为权重系数,其作用是增加长周期旱涝急转事件所占权重,降低全旱或全涝事件权重^[24-25]。

为了验证 SPI 和 SRI 指数哪个更能表现荆南三口地区的旱涝时间,本文将选取历史资料及长时间的有无降水年份进行佐证(表 2)。由表 2 可知,SPI 能够有效地识别出旱涝年,与当地实际旱涝年情况较一致,而 SRI 识别的效果没有 SPI 显著,故本文选用 SPI 作为定量指标进行旱涝特征分析。

表 2 近 66 年荆南三口地区重大干旱及洪涝事件对 SPI 和 SRI 的有效验证

洪涝年	SPI	SRI	洪涝年	SPI	SRI	干旱年	SPI	SRI	干旱年	SPI	SRI
1954	△	○	1990	△		1963	△		2011		
1964		○	1991	△		1972	△		2012	△	
1969	△	○	1993	△		1973	△				
1970	△		1994	△		1978	△				
1973	△		1995	△		1979	△				
1975	△		1996	△		1980		○			
1977			1998	△	○	1981	△	○			
1980	△		2002	△		1986	△				
1983	△		2016	△		2006	△	○			
1988	△					2007	△	○			

注:△表示 SPI 能够识别,○表示 SRI 能够识别;干旱和洪涝详情参见《中国气象灾害大典(湖南卷)》^[26]。

2 结果与分析

2.1 旱涝的时间变化特征

2.1.1 基于不同时间尺度 SPI 变化特征 SPI1 是逐月降水变化的响应,反映短时间内的旱涝变化特征,其值在 0 线上下频繁波动,旱涝频率变化快,主要是因为短时间内降水持续性弱,且随机性强变化幅度大(图 2a)。主要旱涝发生在 1954 年(4—7 月重涝)、1979 年(1—3 月轻旱)、1998 年(6—7 月重涝)、2002 年(3—5 月重涝)、2011 年(1—5 月特旱)。由此表明,荆南三口地区干旱主要发生在秋冬季,洪涝主要发生在春秋季,这与荆南三口地区年降水量分配规律基本吻合。

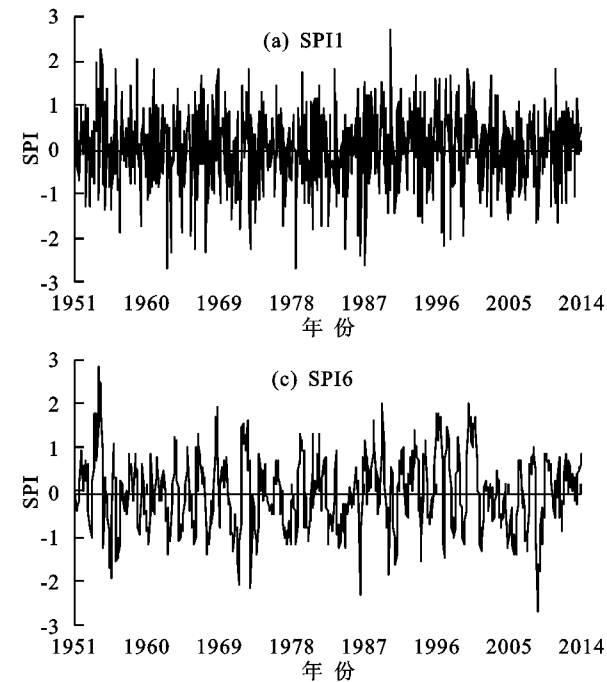
从 SPI3 时间序列(图 2b)可以看出,其反映短期(季尺度)旱涝变化特征。近 66 年来,重旱以上频次(27 次)比重涝以上频次(25 次)偏多,主要季节性重旱发生在 1972 年(6—9 月)、1979 年(10—12 月)、1984 年(1—3 月)及 2011 年(3—5 月),重涝主要发生在 1954 年(6—9 月)、1998 年(1—2,7—8 月)、2002 年的(4—6 月)。SPI3 的干旱主要发生在秋冬

季节,洪涝主要发生在春夏季节,这与 SPI1 的结论是一致的。但 1978 年特旱及 2016 年(6—7 月)的区域性洪水并未真正体现出,其主要原因在于 SPI3 体现短期,而 1978 年和 2016 年是长时间持续降水少或多所致,且受人类活动影响。

为了更好揭示荆南三口地区的旱涝特征,分析 SPI6 的时间序列(图 2c)。整体上洪涝仍比干旱次数多,其中重旱、重涝的频次分别为 35,15 次,较 SPI3 分析结果重旱次数稍有增多,重涝次数稍有减少,但旱涝持续时间有明显延长趋势。典型洪涝年份如:1954 年(5—12 月)、1969 年(8—12 月)、1998 年(2—11 月)及 2002 年(4—12 月);典型干旱年份如:1956 年(1—3 月)、1972 年(6—10 月)、2011 年(3—9 月)。由此表明,随着时间尺度的延长,旱涝在 4 个季节中都有可能发生,主要是由于前期降水量对旱涝的持续时间有叠加影响,导致旱涝持续时间滞后,但总体上与 SPI1、SPI3 的结果相类似。

SPI12 的变化趋势(图 3d)能更好地反映典型旱涝年份和持续时间段,其代表的是长时间段的水分盈

缺情况。该地区连续时间较长的典型洪涝主要发生在 1954 年(5—12 月)、1955 年(1—5 月)、1969 年(8—12 月)至 1970 年(1—6 月)、1973 年(7—12 月)至 1974 年(1—3 月)、1998 年(6—12 月)、2002 年(7—12 月)至 2003 年(1—7 月);而干旱在图中也能



较好地识别,干旱主要发生在 1969 年(1—5 月)、1972 年(1—12 月)、1979 年(1—6 月)、1986 年(1—5 月)、2008 年(1—9 月)、2011 年(7—12 月)、2012 年(1—4 月)。由此表明 SPI12 能够很好地反映地下水受大气降水的影响^[27]。

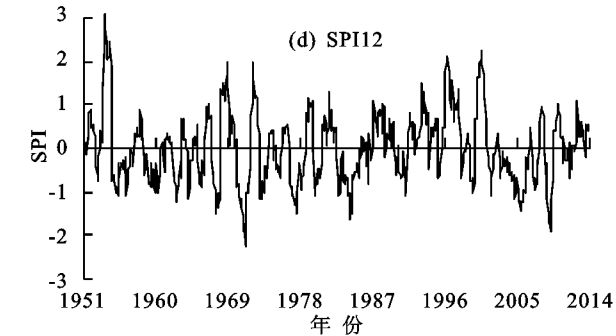
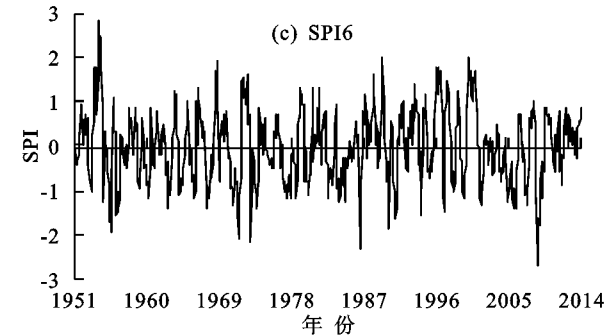
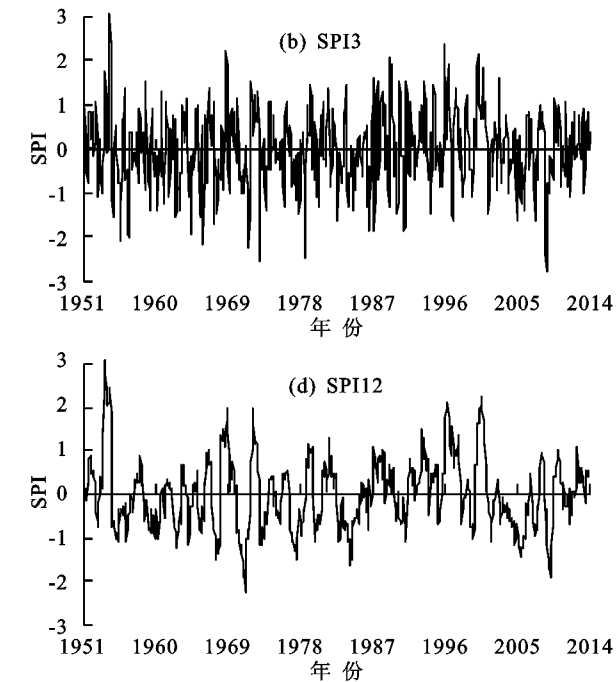


图 2 荆南三口地区 1951—2016 年不同时间尺度旱涝变化趋势

通过以上不同时间尺度 SPI 值综合分析可知, SPI1 能够短期降水量变化引起的旱涝频繁交替, SPI3、SPI6、SPI12 随着时间的延长,更能够突出典型旱涝年份及持续时间,如 1954 年、1969 年、1973 年、1998 年、2002 年的重涝及 1972 年、1978 年、1986 年、2011 年的重旱年份。总体上,近 66 年荆南三口地区旱涝事件出现的频率较高,不同时间尺度的旱涝发生平均频率为 52%,其中 5.8%的极旱或极涝,21%的重旱或重涝。

2.1.2 年代际与季节 SPI 值变化特征 近 66 年的年 SPI 值整体波动较大(图 3),最大值 1.76 出现在 1954 年,是典型的洪涝年,最小值是 1972 年的特旱, SPI 值低

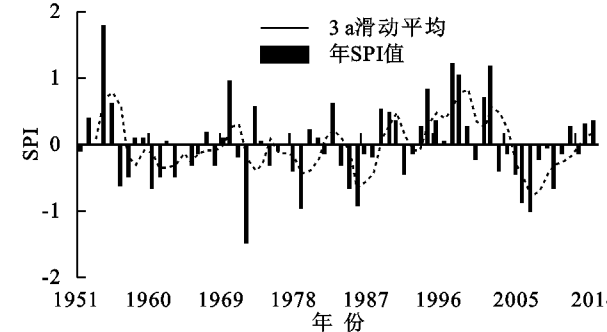
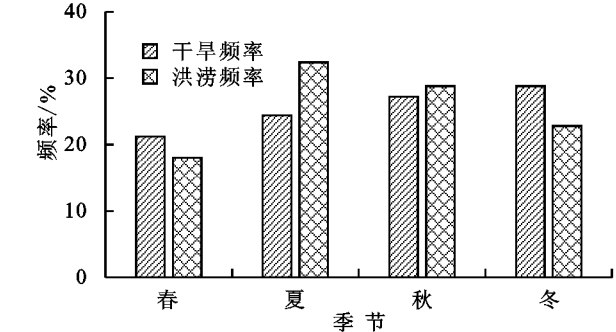


图 3 近 66 年荆南三口地区年 SPI 变化及不同季节 SPI 旱涝频次统计

从图 4 较为清晰地看出,春季 1992 年和 2002 年均为中涝, SPI 值均超过 1, 2011 年为特旱, SPI 值低至 -2 以下。夏季降水多出现旱涝频发次数也多,甚

至 -1.49。从 3 年滑动平均曲线可以看出荆南三口地区旱涝在年代变化上的特点:为 20 世纪 50 年代前涝后旱,且出现重涝 1 次;60 年代整个时期处于干旱阶段;70 年代与 60 年代类似,以旱为主,中旱重旱出现 2 次;80 年代旱涝交替频繁,中期以旱为主;90 年代整体处于洪涝阶段,且后期洪涝等级增速较大;21 世纪前 15 年,前期以涝为主,后期偏旱,且旱涝频次较多;近 2 年有由旱转涝的趋势。由年 SPI 变化及不同季节 SPI 旱涝频率统计(图 3)可以发现,旱涝在四季中均可发生,但总体上夏秋季略高于冬春季,四季旱涝频率均高于 15%,也证实了此地区的旱涝频发性。同时旱涝频率也存在着明显的季节性差异。



至出现特涝和中旱事件,如 1954 年和 1998 年都是典型洪涝年, SPI 值分别为 2.42、1.64,线性相关趋势不明显。秋季整体上旱涝频发次数相当,主要以轻旱轻

涝为主,无中涝、重涝、特涝、重旱、特旱事件。冬季降水少以干旱偏多,但在 1953 年、1972 年、1990 年中涝及 1997 年、2002 年出现重涝事件,在 1955 年、1972

年、1991 年、1998 年发生中旱事件。总体上看旱涝事件在一年四季中均可发生,只是在程度与发生频次上有所差异。

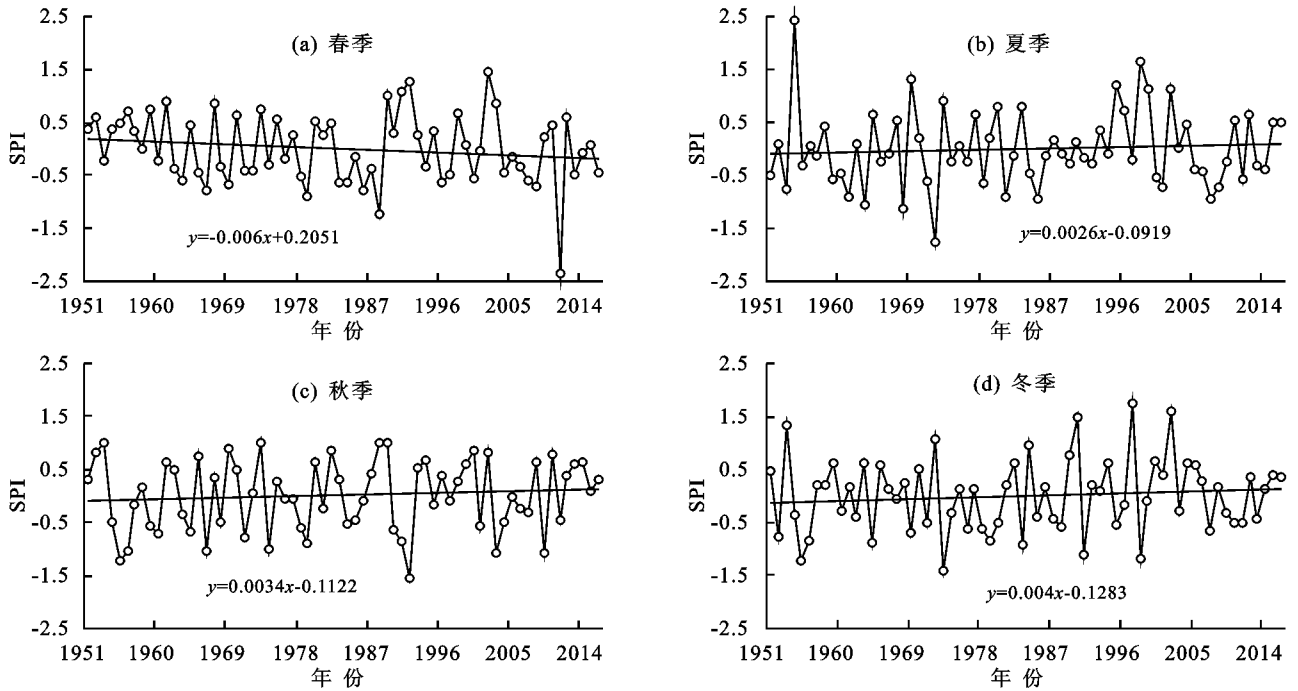


图 4 荆南三口不同季节 SPI 变化

2.2 旱涝空间变化特征

2.2.1 旱涝年均空间变化特征 荆南三口地区年降水量在空间上的分配不均导致了旱涝分布的空间差异性。为定量分析此地区近 66 年的旱涝空间分布特征,对区内及周边地区 22 个站点的 SPI12 值进行 EOF 分析(图 5),结果显示前 3 个特征向量的

总贡献率为 81.4%。其中,第 1 特征向量的贡献率为 64.0%,这意味着第 1 特征向量是荆南三口地区旱涝分布的主要空间形态,且分布呈一致的正值,高值区主要分布在东南部,而西北部为低值区,与此地区的降水量的空间分布具有一致性,是该地区降水分布的第 1 型^[28]。

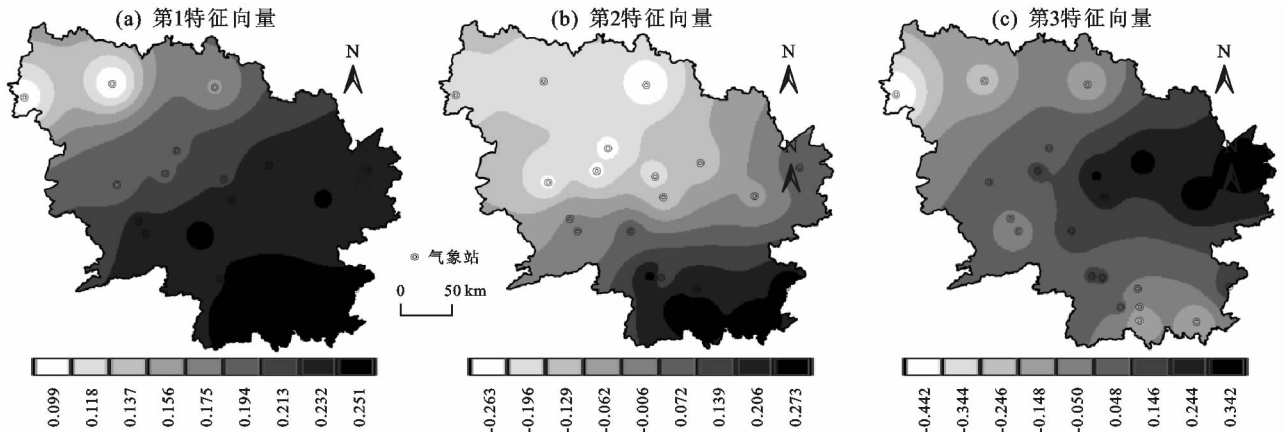


图 5 1951—2016 年荆南三口地区年均 EOF 前 3 个特征向量空间分布

第 2 特征向量(图 5b)的贡献率为 12.7%,正值分布在东南部长沙一带,负值分布在西北部一带,表明东南和西北旱涝趋势具有反向性,是此地区降水分布的第 2 型。第 3 特征向量贡献率为 4.6%,正值分布在中东部一带,负值分布在西北部一带,表明东部和西部旱涝趋势具有反向性,是此地区降水分布的第 3 型。由此可把该地区旱涝空间分布归纳为 3 种空间分布型:东南部(湿润区)、中部(降水均匀型)、西北部(偏干区)。

2.2.2 旱涝季节空间变化特征 为了更为精确地研究旱涝的空间分布特征,对此地区的 22 个站点的 SPI3 值进行 EOF 分析,以期得到荆南三口地区季节空间变化特征(图 6)。经计算得出每个季节的第 1 特征向量的贡献率分别为 67.5%,69.3%,68.5%,76.9,以此表示每个季节的旱涝空间分布特征;且其向量特征值均为正值,可以看出在空间分布上各季节降水量具有较好的一致性。

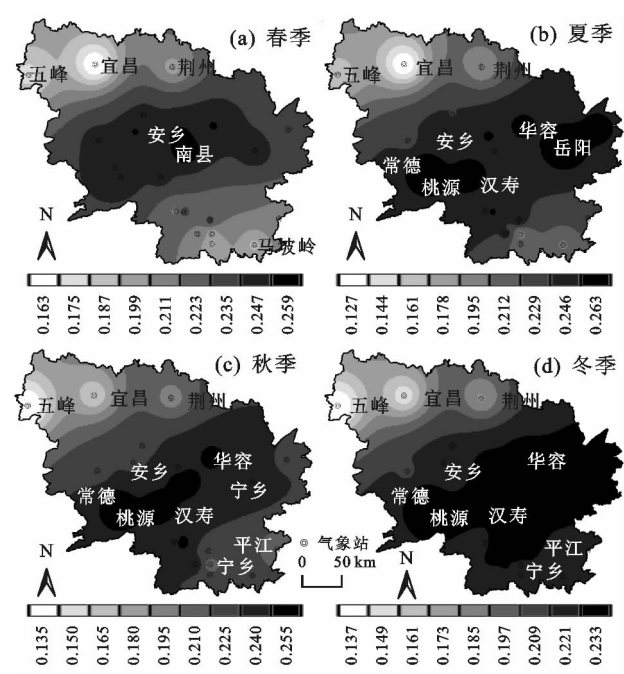


图 6 近 66 年旱涝季节变化第 1 特征向量空间分布

春季第 1 特征向量的高值在安乡、南县(0.245),低值中心在西北部的宜昌、荆州(0.150),表明春涝主要发生在安乡、南县,而春旱则主要位于宜昌、荆州、马坡岭;夏季洪涝分布在西部的常德、桃源、汉寿及东部的岳阳、华容(0.245),干旱位于西北部的宜昌、五峰、荆州(0.115);秋季洪涝分布在中西部的常德、桃源、南县、汉寿、华容(0.235),干旱位于西部的五峰、宜昌、荆州及南部宁乡、平江(0.190);冬季洪涝分布在常德、桃源、汉寿、南县、华容、岳阳(0.225),干旱位于西北部的五峰、宜昌、荆州(0.125)。综合表明,西北部的五峰、宜昌、荆州等地在四季中均可发生干旱,而中部的安乡、南县、华容在四季中的洪涝较多,尤其是华容。

2.3 旱涝周期变化特征

2.3.1 旱涝年周期变化特征 通过分析图 7 表明,荆南三口地区年与不同季节的旱涝都存在较为显著的 5, 10 年的低频主振荡周期,但 10 年周期在春季和夏季中变化不明显。在年 SPI 时间尺度上有 4~10 年短周期及 30~35 年长周期贯穿于整个时期,其中 1951—1987 年出现 22 年的中长周期,且 2014 年以后的 25 年洪涝周期仍未闭合,表明未来洪涝周期还将持续。

2.3.2 旱涝季节周期变化特征 季节 SPI 时间尺度上,春季 SPI(图 7b),在 20 世纪 60 年代存在 5 年周期;在 15~20 年尺度上,1978 年后出现 3 次旱涝交替循环,旱涝中心分别为 1979 年、1984 年、1987 年、1992 年、1997 年、2003 年、2011 年;在 30 年尺度上,主要出现在 20 世纪 80 年代前。夏季 SPI(图 7c),5 年周期在 21 世纪前长期存在,后期突出不明显;1951—1974 年出现 20 年左右的中长周期;而长周期 30~35 年也几乎存在整个时段。比较年、夏季 SPI 周期可知,两者具有较高的相似性,这与此地区降水量主要集中在夏季有关。秋季 SPI(图

7d),在 10 年尺度上,1978—2000 年出现 4 次旱涝交替期,在 15 年尺度上,主要出现在 70 年代以前;80 年代以后则出现典型的 22 年中长周期;而较高的 30~35 年周期则在此季节中表现不突出。冬季 SPI(图 7e),60 年代有 10 年的周期,而 5~10 年尺度集中出现在 80 年代和 90 年代,20~30 年的长周期在整个时段交替出现 3 次。

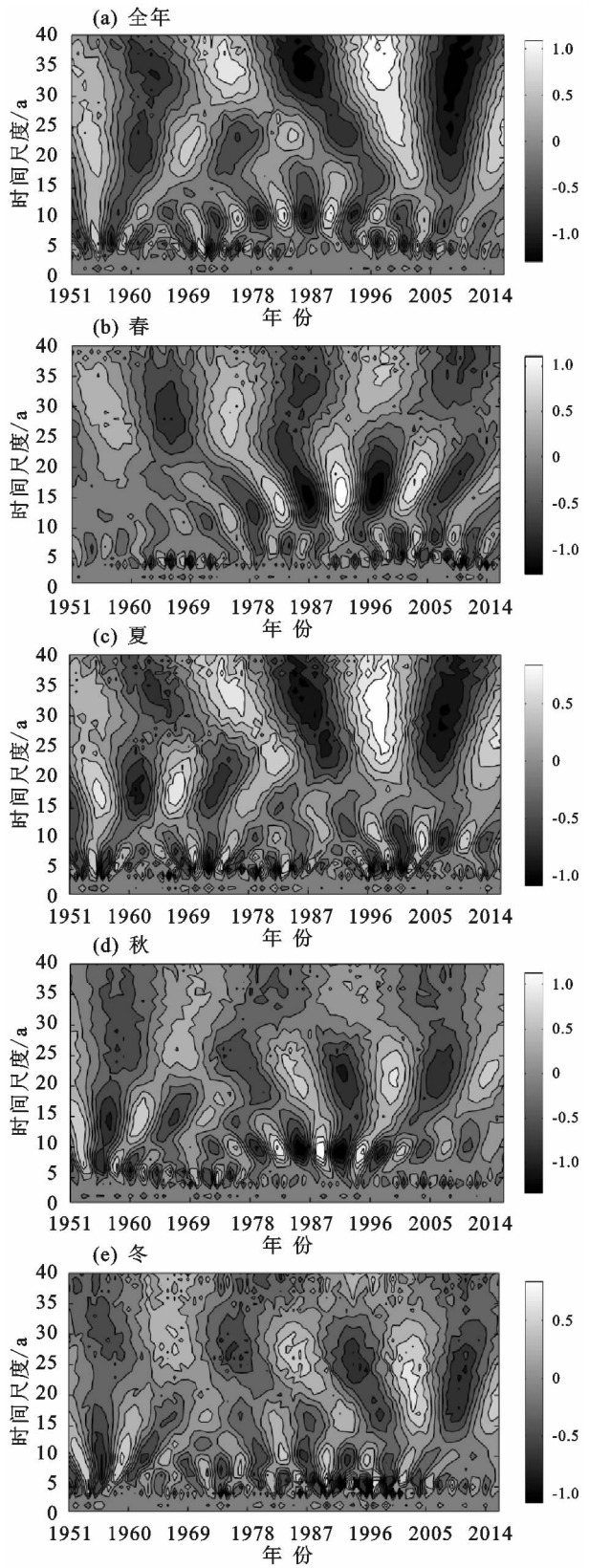


图 7 1951—2016 年荆南三口地区旱涝变化 Morlet 小波周期

因此,综合分析年与不同季节 SPI 的波动时间尺度看,主要以 5~10 年短周期、30~35 年长周期为主。同时,无论是从年还是不同季节的周期变化来看,2016 年都处在洪涝周期中,这意味着荆南三口地区在未来一段时间内降水量仍然有增加的趋势(2017 年为洪涝年)。

3 旱涝急转变化特征

3.1 旱涝急转指数变化趋势与突变年份

为分析旱涝急转变化特征,对荆南三口地区 22 个站点 LDFAI 指数及强度的时间序列趋势作算术平均,从而得到此地区的区域平均序列(图 8)。其中 LDFAI 指数时间序列最大正值为 2008 年的 2.18,最小负值为 1964 年的 -2.44,线性系数为 0.008;LDFAI 强度时间序列最大值为 1964 年的 2.44,最小值为 2005 年的 0.07,线性系数仅为 0.003。两者的趋势变化均不明显,但序列变率都存在较大差异,LDFAI 指数变率偏大有 3 个时

期,分别为 1951—1970 年、1989—1996 年及 2008—2016 年,2 个变率偏小时期,分别为 1971—1988 年、1997—2007 年;LDFAI 强度变率大小呈交替状分布,偏大有 1964—1971 年、1984—1996 年、1997—2006 年、2007—2016 年,变率偏小时期,分别为 1951—1963 年、1972—1982 年、1997—2006 年。

对近 66 年的 LDFAI 指数及强度进行 M-K 突变分析(图 9),结果表明,LDFAI 指数区域平均序列的 M-K 统计曲线在 1981 年和 2015 年时,UF 线和 UB 线相交且交点在 ± 1.96 之间,由此可以判断 1981 年及 2015 年旱涝急转指数发生了显著突变,这就从侧面反映出旱涝转换指数增强,频率增多的趋势。同时还发现,LDFAI 强度序列 M-K 突变曲线有 2 个交点,UF 线和 UB 线在 1972 年、2014 年相交与显著性水平之间,同理可判断出荆南三口地区夏季旱涝急转指数强度在 1972 年和 2014 年发生显著突变,旱涝转换指数增强,频率增多。

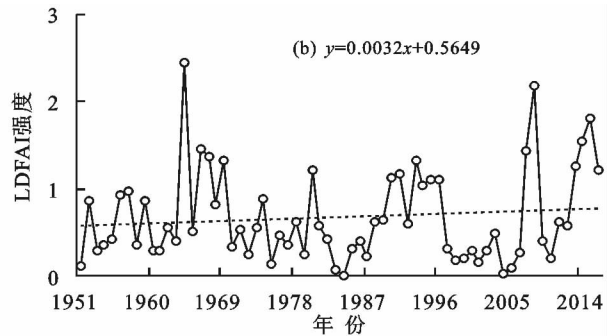
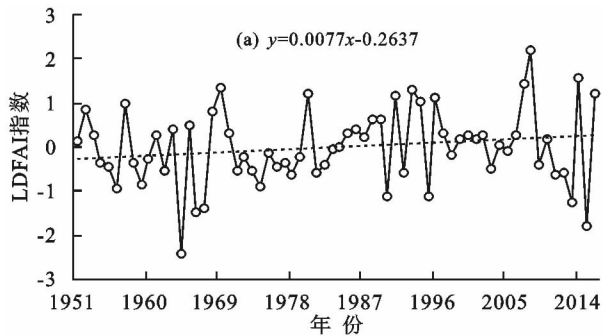


图 8 荆南三口地区平均 LDFAI 指数及强度的变化

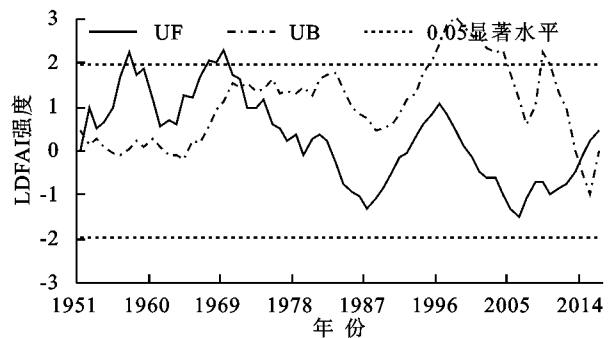
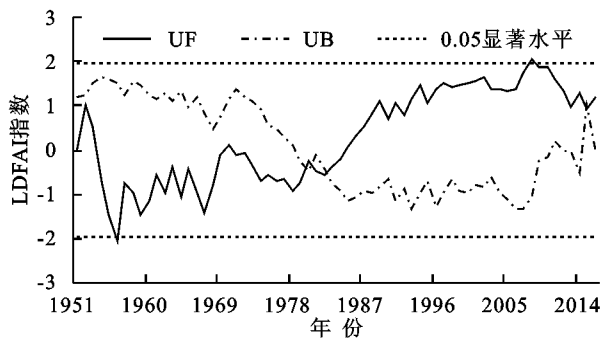


图 9 LDFAI 指数及强度的 M-K 突变检验

3.2 旱涝急转指数时间变化趋势

3.2.1 旱涝急转年变化趋势 LDFAI 指数平均值在各年代都较小,而 LDFAI 强度值在 1960S、1990S、2010S 均较大(图 10)。说明这 3 个年代发生旱涝急转的概率偏大。1950S—1980S 的 LDFAI 值均小于 0,说明此时段有强的涝转旱事件发生;1990S—2000S 均大于 0,此阶段有由涝转旱向旱转涝的趋势,到 2010S 后再次小于 0,后期是否此阶段有涝转旱的趋势?有待进一步研究。LDFAI 强度在 1980S 和 2010S 分别出现最小值和最大值,前者旱涝急转频率最低,后者急转频率最高。2010S 旱涝急转总体上 LDFAI 指数前期低、后期高,表明旱涝转换呈阶段性

特点,在未来一段时期内此地区旱涝急转现象发生频率较高,说明 LDFAI 强度在一定程度上反映旱涝急转发生的频率。

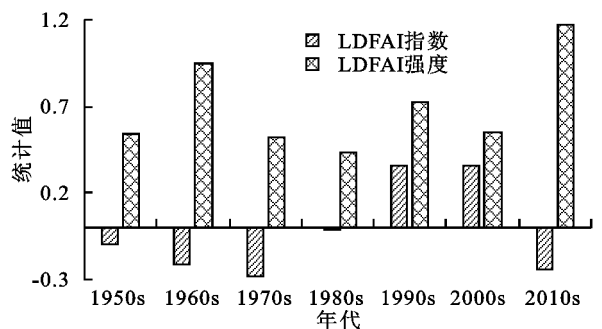


图 10 LDFAI 指数变化

3.2.2 旱涝急转的空间变化特征 近66年荆南三口地区夏季 LDFAI 指数平均值相差较小(图 11a), 值为 $-0.26 \sim 0.14$ 。其中宜昌、石门、澧县多为正值, 则夏季较多的表现为旱转涝; 负值位于五峰、宁乡、安乡、华容、常德, 相应的夏季表现为涝转旱。在小区内造成这一现象

的原因是否与地形有关有待探索。通过对 22 个气象站点夏季 LDFAI 时间序列进行 EOF 分析, 得出第 1 特征向量贡献率为 41.7%, 可以看出夏季 LDFAI 指数由西南向东北逐渐递减, 表明西南地区旱涝急转较为强烈, 原因可能与此地区地形复杂, 夏季多受西南季风控制有关。

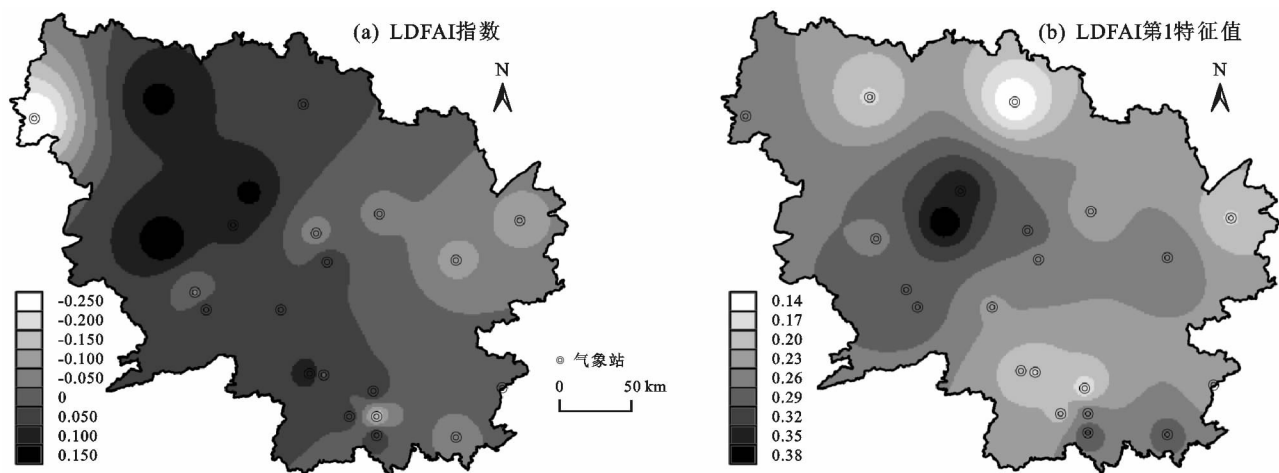


图 11 近 66 年夏季 LDFAI 的分布及第 1 特征向量分布

4 结论

(1)荆南三口地区 1951—2016 年整体上旱涝交替频繁, 比较不同时间尺度的旱涝变化特征, 旱涝事件综合发生平均频率为 52%, 其中 5.8% 的极旱或极涝, 21% 的重旱或重涝。从年 SPI 值分析, 整体波动较大, 但很好地揭示了 1954 年特涝、1972 年特旱等典型事件。从季节 SPI 分析, 旱涝事件 4 个季节均可发生, 但总体上夏秋季高于冬春季。

(2)此地区年均旱涝空间变化存在 3 种空间分布型—东南部(洪涝区)、中部(降水均匀型)、西北部(干旱区); 季节旱涝空间变化也存在着较大差异, 西北部的五峰、宜昌等地在 4 个季节中均可发生干旱, 而中部的安乡、南县等在 4 个季节中的洪涝较多。

(3)年与季节 SPI 值都存在较为显著的 5~10 年低频主振荡及 30~35 年长周期, 经分析比较夏季与年的周期相似性较高。总体上, 无论是年还是季节周期, 2016 年都处在洪涝周期上, 这意味着未来一段时间荆南三口地区降水量仍有增加趋势。

(4)旱涝急转指数和强度的区域平均序列均发生明显趋势变化, 通过 M-K 趋势检验, 旱涝急转指数在 1981, 2015 年发生显著变化, 而旱涝强度在 1972, 2014 年发生显著突变。同时旱涝急转的年变化趋势分析表现为前低后高, 呈阶段性特点。且空间分布上有较大的差异, 宜昌、石门、澧县等夏季多为旱转涝; 五峰、宁乡、安乡、华容、常德等地夏季多为涝转旱。

旱涝事件是自然和人为因素的共同影响, 本文仅从自然因素(降水量)全面分析旱涝特征, 并没有考虑人类活动等其他因素的影响, 此外对于造成此地区旱涝频发的原因及早涝事件增加所带来的后续影响, 有

待进一步去了解和探索。

参考文献:

- [1] 刘毅. 极端气象灾害威胁国家安全[N]. 人民日报, 2014-12-13(010).
- [2] Coumou D, Robinson A. Historic and future increase in the global land area affected by monthly heat extremes [J]. Environmental Research Letters, 2013, 8: 1-6.
- [3] Groisman P Y, Karl T R, Easterling D R, et al. Changes in the probability of heavy precipitation: Important indicators of climatic change [J]. 1999, 42(1): 243-283.
- [4] Yves T, Wafae B, Fatima D. Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco [J]. Global and Planetary Change, 2012(82/83): 104-114.
- [5] 吴吉东, 傅宇, 张洁, 等. 1949—2013 年中国气象灾害灾情变化趋势分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(9): 1520-1530.
- [6] 王米雪, 延军平, 李双双. 1960—2013 年中国东南沿海地区旱涝时空变化特征及其趋势分析[J]. 资源科学, 2014, 36(11): 2307-2315.
- [7] 何艳虎, 陈晓宏, 林凯荣, 等. 东江流域近 50 年旱涝时空演变特征[J]. 地理科学, 2014, 34(11): 1391-1398.
- [8] 杨志勇, 袁喆, 严登华, 等. 黄淮河流域旱涝时空分布及组合特性[J]. 水科学进展, 2013, 24(5): 617-625.
- [9] 杨金虎, 张强, 王劲松, 等. 近 60 年来西南地区旱涝变化及极端和持续性特征认识[J]. 地理科学, 2015, 35(10): 1333-1340.
- [10] 李景保, 钟一苇, 周永强, 等. 三峡水库运行对洞庭湖北部地区水资源开发利用的影响[J]. 自然资源学报, 2013, 28(9): 1583-1593.
- [11] 闪丽洁, 张利平, 陈心池, 等. 长江中下游流域旱涝急转时空演变特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(12): 2100-2107.

- [14] Zhu Y, Ma L Q, Gao B, et al. Transport and interactions of kaolinite and mercury in saturated sand media [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, S213/214(7): 93-99.
- [15] Bianchi M, Zheng C, Wilson C, et al. Spatial connectivity in a highly heterogeneous aquifer: From cores to preferential flow paths [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(5): 415-421.
- [16] Liu C, Shang J, Shan H, et al. Effect of subgrid heterogeneity on scaling geochemical and biogeochemical reactions: A case of U(VI) desorption [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(3): 1745-1752.
- [17] Zhang C, Liu C, Shi Z. Micromodel investigation of transport effect on the kinetics of reductive dissolution of hematite [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(9): 4131-4139.
- [18] Porubcan A A, Xu S. Colloid straining within saturated heterogeneous porous media [J]. *Water Research*, 2011, 45(4): 1796-1806.
- [19] 杨雯,郝丹丹,徐东吴,等.生物炭颗粒在饱和多孔介质中的迁移与滞留[J].*土壤通报*,2017,48(2):304-312.
- [20] 冯桐桐,杨雯,刘克思,等.离子强度和腐植酸对高岭土协同磺胺二甲基嘧啶迁移的影响[J].*农业环境科学学报*,2017,36(9):1804-1810.
- [21] Van Genuchten M T, Simunek J, Leij F J, et al. STAN-
- MOD: Model use, calibration, and validation [J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(4): 1355-1366.
- [22] 方婧,汪敏浩,沈冰,等.大孔隙对纳米 CeO₂ 在多孔介质中迁移行为的影响[J].*环境科学学报*,2016,36(8): 2924-2931.
- [23] Bradford S A, Torkzaban S, Walker S L, et al. Coupling of physical and chemical mechanisms of colloid straining in saturated porous media [J]. *Water Research*, 2007, 41(13): 3012-3024.
- [24] Dong S, Shi X, Gao B, et al. Retention and release of graphene oxide in structured heterogeneous porous media under saturated and unsaturated conditions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(19): 10397-10405.
- [25] Wu L, Gao B, Tian Y, et al. Analytical and experimental analysis of solute transport in heterogeneous porous media [J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A-toxic/hazardous Substances & Environmental Engineering*, 2014, 49(3): 338-343.
- [26] Dong S, Shi X, Gao B, et al. Retention and release of graphene oxide in structured heterogeneous porous media under saturated and unsaturated conditions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(19): 10397-10405.

(上接第 139 页)

- [12] 王婷,章新平,黎祖贤,等.近 52 年来洞庭湖流域气象干旱的时空分布特征[J].*长江流域资源与环境*,2016, 25(3):514-522.
- [13] 程智,丁小俊,徐敏,等.长江中下游地区典型旱涝急转气候特征研究[J].*长江流域资源与环境*,2012,21(增刊 2):115-120.
- [14] 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):1-6.
- [15] 李景保,李雅婷,蒋文杰.三峡水库运行对长江荆南三口生态系统健康的影响[J].*湖南师范大学学报(自然科学版)*,2016,39(6):15-19,54.
- [16] 于丹丹,杨波,李景保,等.近 61 年来长江荆南三口水系结构演变特征及其驱动因素分析[J].*水资源与水工程学报*,2017,28(4):13-20.
- [17] 代稳,吕殿青,王金凤,等.基于变权灰色关联法的长江荆南三口地区水资源短缺程度分析[J].*长江科学院院报*,2017,34(6):17-23.
- [18] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration of time scales [C]// Eighth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society. Anaheim California, 1993.
- [19] Shukla S, Wood A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(2): 1-7.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中国国家标准化管理委员会. 气象干旱等级 (GB/T 20481—2006) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [21] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 2007: 17-18.
- [22] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79: 6-78.
- [23] 何慧,廖雪萍,陆虹,等.华南地区 1961—2014 年夏季长周期旱涝急转特征[J].*地理学报*,2016,71(1):130-141.
- [24] Wu Z, Li J, He J, et al. The occurrence of droughts and floods during the normal summer monsoons in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(15), L05813. doi:10.1029/2005GL024487.
- [25] Wu Z, Li J, He J, et al. Large-scale atmospheric singularities and the summer long-cycle droughts-floods abrupt alternation in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(16): 2027-2034.
- [26] 温克刚,谢璞. 中国气象灾害大典 (湖南卷) [M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [27] 翟禄新,冯起. 基于 SPI 的西北气候干旱变化 [J]. *自然资源学报*, 2011, 26(5): 847-857.
- [28] 魏义长,王纪军,张芳,等. 经验正交函数与地统计相结合分析降水时空变异 [J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(4): 105-109.