DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.01.06

基于模糊C均值聚类法的河南省近57年干旱特征分析

卫林勇[1,2], 江善虎[2], 任立良[1,2], 张林齐[2], 刘若兰[2]
(1.河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2.河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 根据河南省1960-2017年19个气象站的逐日降雨数据计算标准化降水指数(*SPI*),结合模糊*C*均值聚类法、小波分析,从月、年际和周期维度上研究近57年来河南省干旱的时空变化特征。结果表明:所有气象站点可以分成3个区域,分别为豫东南、豫北、豫西地区;全区在1966、1986、1997年发生持续干旱,豫东南持续干旱时间最长为10个月且在夏季易旱,豫北持续干旱时间最长为9个月且易发生特旱,豫西持续干旱时间段最多但尺度最长为7个月;干旱频率主要分布在豫北,豫西次之,豫东南最小,但干旱频率都在30%以上,且20世纪90年代后干旱频率在各区之间分布比较均匀;豫东南、豫北、豫西分别呈现23~25、20~22、15~17 a易干旱的主周期。

关键词: 标准化降水指数; 模糊C均值聚类法; 小波分析; 持续干旱
中图分类号:P426.616 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2019)01-0033-07

Analysis of drought characteristics in Henan Province in the latest 57 years based on fuzzy C-means clustering

WEI Linyong[1,2], JIANG Shanhu[2], REN Liliang[1,2], ZHANG Linqi[2], LIU Ruolan[2]
(1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*;
2. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: Based on the daily precipitation data of 19 meteorological stations in Henan Province of the latest 57 years from 1960 to 2017, the standardized precipitation index (*SPI*) was calculated. The spatial and temporal characteristics of drought in Henan Province were studied in terms of monthly, interannual and periodic dimensions by the fuzzy C-means clustering and wavelet analysis. The results showed that all meteorological stations could be divided into three regions: southeastern Henan, northern Henan and western Henan. There was a continuous drought in 1966, 1986 and 1997 for the whole Henan Province. The longest continuous drought period in southeastern Henan was 10 months and drought prone in summer. The longest continuous drought period in northern Henan was 9 months and it was prone to severe drought. The continuous drought periods in western Henan was the most, but the longest scale was 7 months. Drought frequency was mainly distributed in northern Henan, followed by western Henan, and the least in southeastern Henan, but it was more than 30% and more uniform among regions after the 1990s. The main cycle of 23~25, 20~22 and 15~17 years were drought prone in southeast Henan, northern Henan and western Henan, respectively.

Key words: standardized precipitation index; fuzzy C-means clustering; wavelet analysis; continuous drought

收稿日期:2018-09-10; **修回日期**:2018-11-16
基金项目:"十三五"国家重点研发计划项目(2016YFA0601504);国家自然科学基金(41501017);江苏省自然科学基金(BK20150815)
作者简介:卫林勇(1994-),男,贵州铜仁人,硕士研究生,研究方向为流域水文过程模拟。
通讯作者:任立良(1963-),男,江苏扬中人,博士,教授、博士生导师,研究方向为水文水资源及水文过程模拟。

1 研究背景

干旱是全球分布最广、最严重的气象灾害之一，严重影响着社会经济发展、人类生活、动植物生存[1]。我国季风气候特征显著、地理环境复杂多样，干旱灾害频繁发生。特别是 20 世纪 50 年代以来，由于气候变化与人类活动的影响，我国干旱灾害呈现频次增高、范围扩大和损失加重的态势[2]。因此，定量分析干旱的时空演变特征，能够为全球气候急剧变化下的干旱灾害防治管理提供科学依据。

目前，国内外学者根据地面气象站和卫星遥感收集的多源水文气象资料对干旱进行量化研究，在干旱指标的构建、修正、融合以及区域适用性等方面取得一系列研究成果。如 1965 年 Palmer 提出的帕尔默干旱指数(*PDSI*)已成为美国的半官方干旱指标[3]。1993 年 McKee 建立的标准化降水指数(*SPI*)被广泛应用于全球不同地区的干旱特征分析[4-7]。李琼芳等[8]基于降水、蒸散、土壤水分和径流的主成分分析得出一个新的多元干旱指数(*MDI*)，与 *SPI*、*PDSI* 比较验证其具有较好适应性。此外，常用的干旱指标还有相对湿润指数(*M*)[9]、*Z* 指数[10]、*CI* 指数[11]等。以上众多干旱指数中，*SPI* 指数采用分布概率消除降水的时空差异，从而对干旱的变化反映较为敏感，具有计算简单和多时间尺度的优势，能够对不同空间的旱涝进行比较分析，并且拥有较好的稳定性[12]。受气候因素和下垫面条件的影响，干旱的发生发展过程存在明显的地域性，然而以往的研究大多以研究区域进行整体分析，鲜有根据气候条件的差异性分区域研究干旱的演变特征[13-14]。因此，本文采用 *SPI* 指数，结合模糊 *C* 均值聚类法对河南省 19 个气象站进行分区，从月、年际和周期维度上分析河南省干旱的时空动态格局，研究结果对河南省干旱演变规律揭示及干旱灾害防治管理具有重要参考作用。

2 研究区域和数据

2.1 研究区概况

河南是中国重要的农业、经济大省，也是我国人口数量位居首位的省份。河南省地处中国中东部，全省介于北纬 31°23′～36°22′、东经 110°21′～116°39′之间，见图 1。河南属于暖温带至亚热带、湿润至半湿润季风气候。具有四季分明、雨热同期、复杂多样的特点[15]。降水量在时空尺度分布不均匀，南部及西部山区降水较多，东南部大别山区可达 1 100 mm 以上，降雨在 6－8 月份最多。全省植被覆盖率只有 17.32%，土壤坡地截流、吸水量、含水量能力低，从而导致大量的雨水流失；而且年均日照 1 848.0～2488.7h，全年无霜期 189～240 d[16]，地表水易于蒸发；近 50 多年来受全球气候变暖的影响，降水明显减少，研究区的干旱现象时常出现。

2.2 数据来源

由中国气象数据网(http://data.cma.cn)下载气象数据集－中国地面气候资料日值数据集(V3.0)，从中选取出河南省地区 19 个气象站1960－2017 年逐日降水资料数据，河南省气象站的分布如图 1 所示。对于部分站点缺测的降水数据，采用反距离加权法进行插补处理。

3 研究方法

3.1 *SPI* 指数的计算

由逐日降水资料统计月累计降水数据，用于计算 3、12 月尺度的 *SPI* 指数。*SPI* 是通过计算某时段内降水量的 Γ 分布累积概率，再将累积概率标准化而得到[17]。经过一系列的转化，其近似解如下：

$$SPI = \begin{cases} -\left(t - \dfrac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_e t^3}\right), \\ t = \sqrt{\ln \dfrac{1}{H(x)}},\ 0 < H(x) \leqslant 0.5 \\ \left(t - \dfrac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_e t^3}\right), \\ t = \sqrt{\ln\left\{\dfrac{1}{1 - H(x)}\right\}},\ 0.5 < H(x) \leqslant 1 \end{cases} \tag{1}$$

式中：$c_0 = 2.5151517$；$c_1 = 0.802853$；$c_2 = 0.010328$；$d_1 = 1.432788$；$d_2 = 0.189269$；$d_3 = 0.001308$，$H(x)$ 为某一时段的降水量 x 的累积概率。按照国家气候中心规定的《气象干旱等级 GB/T 20481－2006》标准划分旱涝等级[18]，见表 1。

表 1 标准化降水指数的旱涝等级划分

等级	类型	SPI 值
1	湿润	$0.5 < SPI$
2	无旱	$-0.5 < SPI \leqslant 0.5$
3	轻旱	$-1.0 < SPI \leqslant -0.5$
4	中旱	$-1.5 < SPI \leqslant -1.0$
5	重旱	$-2.0 < SPI \leqslant -1.5$
6	特旱	$SPI \leqslant -2.0$

3.2　模糊 C 均值聚类法

在某个区域已有的地理分区、行政分区、水资源分区、农业分区等上能够更好地研究相应的科研问题。对于气象干旱问题也是如此,需要依据研究区的气象特征统计分类,从而研究不同区域上的干旱演变特征。

用传统的系统聚类法或者 K 均值聚类法等方法把分类的对象严格地划分为某个类中存在一定的不合理性,气象干旱的分类对象之间的界限也有一定的模糊性。因此,本文使用模糊 C 均值聚类法进行分析,其计算步骤如下:

第 1 步:根据样本 x_k 划分类的个数 c,幂指数 $m > 1$ 和初始隶属度矩阵 $U^{(0)} = (u_{ik}{}^{(0)})$,取[0,1]上的均匀分布随机数来确定 $U^{(0)}$。令 $l = 1$ 表示第 1 步迭代。

第 2 步:计算第 l 步的聚类中心 $V^{(l)}$:

$$v_i{}^{(l)} = \frac{\sum_{k=1}^{n} (u_{ik}{}^{(l-1)})^m x_k}{\sum_{k=1}^{n} (u_{ik}{}^{(l-1)})^m},\ i = 1,2,\cdots,c \qquad (2)$$

第 3 步:修正隶属度矩阵 $U^{(l)}$,计算目标函数值 $J^{(l)}$。

$$u_{ik}{}^{(l)} = 1/\sum_{j=1}^{c} (d_{ik}{}^{(l)}/d_{jk}{}^{(l)})^{\frac{2}{m-1}} \qquad (3)$$

$$i = 1,2,\cdots,c;\ k = 1,2,\cdots,n$$

$$J^{(l)}(U^{(l)}, V^{(l)}) = \sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c} (u_{ik}{}^{(l)})^m (d_{ik}{}^{(l)})^2 \qquad (4)$$

式中:$d_{ik}{}^{(l)} = \| x_k - v_i{}^{(l)} \|$。

第 4 步:对给定的隶属度终止容限 $\varepsilon_u > 0$,或目标函数终止容限 $\varepsilon_J > 0$,或对于最大迭代步长 $L_{\max}$,当 $\max\{| u_{ik}{}^{l} - u_{ik}{}^{(l-1)} |\} < \varepsilon_u$,或当 $l > 1$,$| J^{(l)} - J^{(l-1)} | < \varepsilon_j$ 有 $l \geqslant L_{\max}$ 或 $l \geqslant L_{\max}$ 时,迭代停止,否则 $l = l + 1$,然后转第二步。

经过上述的循环迭代之后,当目标函数达到最小值时,根据最终的隶属度矩阵 U 中元素的取值确定所有样本的归属,当 $u_{jk} = \max\limits_{l \leqslant i \leqslant c}(u_{ik})$ 时,可将样本 x_k 归为第 j 类。

4　结果与分析

4.1　气象站分类与分区

根据研究区各个气象站的 57 年标准化降水指数 SPI_{12},通过模糊 C 均值聚类分析将所有气象站分类,如表 2。这些类的数目和类的结构事先不作任何假定。在同一类里的气象站在某种意义上倾向于彼此相似,不同类的则倾向于不相似。

表 2　河南省气象站分类

类别	站点
一类	驻马店、南阳、西华、桐柏、信阳、永城、固始
二类	郑州、安阳、新乡、许昌、三门峡、孟津、开封、宝丰、商丘
三类	卢氏、栾川、西峡

将分类结果利用克里金法插值在空间上进行分区,如图 2 所示。其中,一区为河南的东南部,即豫东南,其地势平坦,覆盖信阳市、驻马店市以及南阳、漯河、周口、商丘市的部分地区,总面积约占全省的 2/5,该区近 57 年来的气温在全省最高、降雨量多、植被覆盖率高[19]。二区为河南的北部地区,即豫北,其地势起伏较大,东北低西南高,该区域经济发展程度好、矿产丰富、人口数量多且市县级行政区域分布紧密,然而植被覆盖率低,降水量相对偏少,与豫东南的分界线位于年降雨量等值线 713 ~ 776 mm 之间[19]。三区为河南地面高程最高的西部地区,即豫西,其地势为山区林地,但本文所用的气象站在该区域只有卢氏、栾川、西峡 3 个气象站,所占面积比最少,与豫北的分界线附近分布着陆浑水库、赵湾水库、昭平台水库等大型水库。程运平[20]利用评价指数法对河南省农业干旱风险分区,干旱高风险区、中低风险区、中险区分布于豫北,中低险区和低险区大部分分布于豫东南和豫西。因此,研究区气象站分区图具有较好的合理性。

4.2　各区干旱的月尺度演变特征

根据 3 类气象站计算各区干旱 SPI_3 指数来评价研究区复杂的干旱在时间上的趋势变化和空间上的差异。图 3 是 1961 – 2017 年河南省气象站各区在时间尺度的 SPI_3 值,其能够在季节上或短时间内表征水分盈亏情况。由图 3 可以看出,豫东南、豫北、豫西在趋势变化、SPI_3 最小值出现时间段上表现出不一致。

从图 3(a)可以看出,在 1966 年 6 – 11 月、1976 年 7 月至 1977 年 2 月、1978 年 3 – 11 月、1979 年 3 – 6 月、1981 年 5 – 9 月、1984 年 1 – 5 月、1986 年 1 – 5 月、1997 年 6 – 10 月、1998 年 11 月至 1999 年 3 月、2001 年 4 – 11 月、2010 年 12 月至 2011 年 9 月、2012 年 2 – 8 月和 2013 年 4 – 8 月是持续干旱时间(5 个月以上)较长的时段;在 1966 年 8 – 10 月发生持续特旱,另外在 1973、1974、1986、1991、2000、2001、2007 和 2010 年都有特旱发生;在 2007 年之

后,干旱程度有所降低,幅度为 0.46,偏向于湿润。由以上统计的数据可知,豫东南的干旱在四季均有出现,在夏季出现的持续干旱时间段(包含部分时间段在夏季)最多,秋天次之。同理,从图 3(b)可以得出,豫北的长时间持续干旱主要发生在 20 世纪 60 –90 年代,常出现夏秋连旱,冬季易发生特旱和持续特旱。从图 3(c)可以得出,豫西的干旱主要发生在夏季,在 2000 – 2017 年间干旱次数相对较多,且易发生特旱。

除了在 1966、1986 和 1997 年之外,全区的持续干旱时段发生在不同的年份。其中,豫东南出现持续干旱时间最长为 10 个月,发生特旱的年数为 8 年,其在全区中最少,干旱程度相对较低。豫北持续干旱时间最长为 9 个月,持续发生特旱 8 次,干旱程度最为严重。豫西持续干旱段最多,但时间尺度最长为 7 个月,未发生持续特旱,干旱程度位于豫东南和豫北之间。该结论与李树岩等[21]对河南省近 40 a 干旱特征在空间上分析的结论相一致。依据《中国气象灾害大典 · 河南卷》,1966 年全省年降水量比常年偏少 30% ~50%,周口、信阳、商丘等多地出现夏秋连旱现象;1973 年南阳盆地、豫中和豫南为大旱;1986 年河南出现史上罕见的干旱,月降水量是自 1949 年来的最低值,豫西、豫北的旱情尤为严重,局部地区出现三季连旱,夏旱最为严重;1997 年 6 月 29 至 11 月 13 日,全省多为高温少雨,豫北、豫西作物受旱较为严重,出现河流断流、机井枯竭等现象,其中三门峡灾情最为严重,受旱面积占总播种面积的 75%。这些记录与图 3 结合不难发现,基于模糊 C 均值聚类法的气象站分区通过 SPI_3 指数可以有效地表述历史干旱事件。

4.3 各区干旱的年代、际变化特征

选择 SPI_{12} 指数分析干旱的年际变化,统计逐年际干旱年数占年际尺度的百分比,即干旱频率,对全区在年际上的变化特征以及各区之间的干旱转移进行分析。不同年代 SPI_{12} 频率空间分布如图 4 所示。从图 4 可以看出,1961 – 1969 年干旱易发生在豫北,干旱频率最低达 66.67%,最高频率出现在豫北的西部;70 年代,易旱区转移向豫东南和豫西,豫北的干旱频率明显偏小,但在豫北的东南部有增加趋势;80 年代易旱区向豫北东部偏移,豫西出现该尺度上最低频率 30%;90 年代全区都出现较高的干旱频率,达 80%;2000 – 2009 年,干旱有向豫北的西北部偏移,豫西的干旱频率未有变化;2010 – 2017 年相对其他年代缺少 2 a,但与上一个年代相比,豫东南、豫北的干旱频率都有增加趋势,豫东南向西南偏移,豫北向中部转移,而豫西变化不大。总体上来说,1961 – 2017 年干旱频率主要分布在豫北,豫西次之,豫东南最少。

4.4 各区干旱的周期特征

小波分析是一种被广泛应用于信号分析的多时间尺度分析方法[22],利用它可以发现 SPI 指数变化中隐藏的周期规律,从而研究干旱变化的周期问题。先对 SPI_{12} 指数在时间序列通过小波阈值进行消噪滤波,去掉伪周期。然后,基于 morlet 小波函数对过滤后的 SPI_{12} 数据进行分析,计算出小波变换系数以及小波方差,结果见图 5,由此可以得到标准化降水指数 SPI_{12} 的周期直观图像,越靠近中心的闭合深色等值线越倾向于干旱。

从图 5 可以看出,豫东南的 SPI_{12} 周期变化明显,其小波方差图呈“M”型,在 16 ~18、23 ~25 a 出现峰值,故豫东南的 SPI_{12} 周期为 23 ~25 a(主周期)和 16 ~18 a(次周期)。豫北的 SPI_{12} 周期变化波动密集但振幅不强烈,小波方差相对于其他两区较低且趋势线较为平缓,其在 10 ~12、20 ~22 a 上

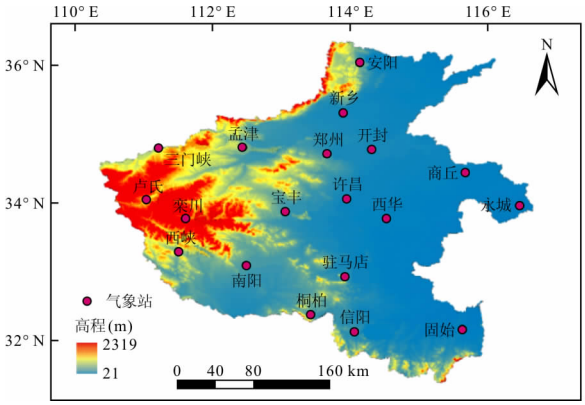


图 1 研究区的示意位置

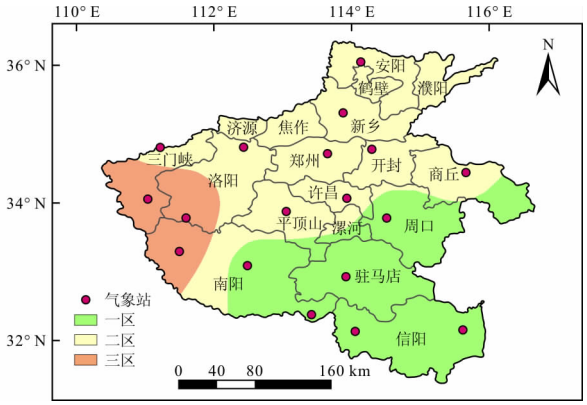


图 2 气象站在河南省行政区域上的分区

出现峰值,即 20 ~22 a 为豫北 SPI_{12} 的主周期,10 ~12 a 为次周期。豫西的 SPI_{12} 周期变化趋势随年份的增加较为明显,呈一增一减再快速增加的趋势,其振幅更加明显、强烈, SPI_{12} 值等值线到2017 年末尚未闭合,说明在未来几年里还会出现干旱的现象,由小波方差图得出 15 ~17 a 为其主周期、9 ~11 a 为次周期。

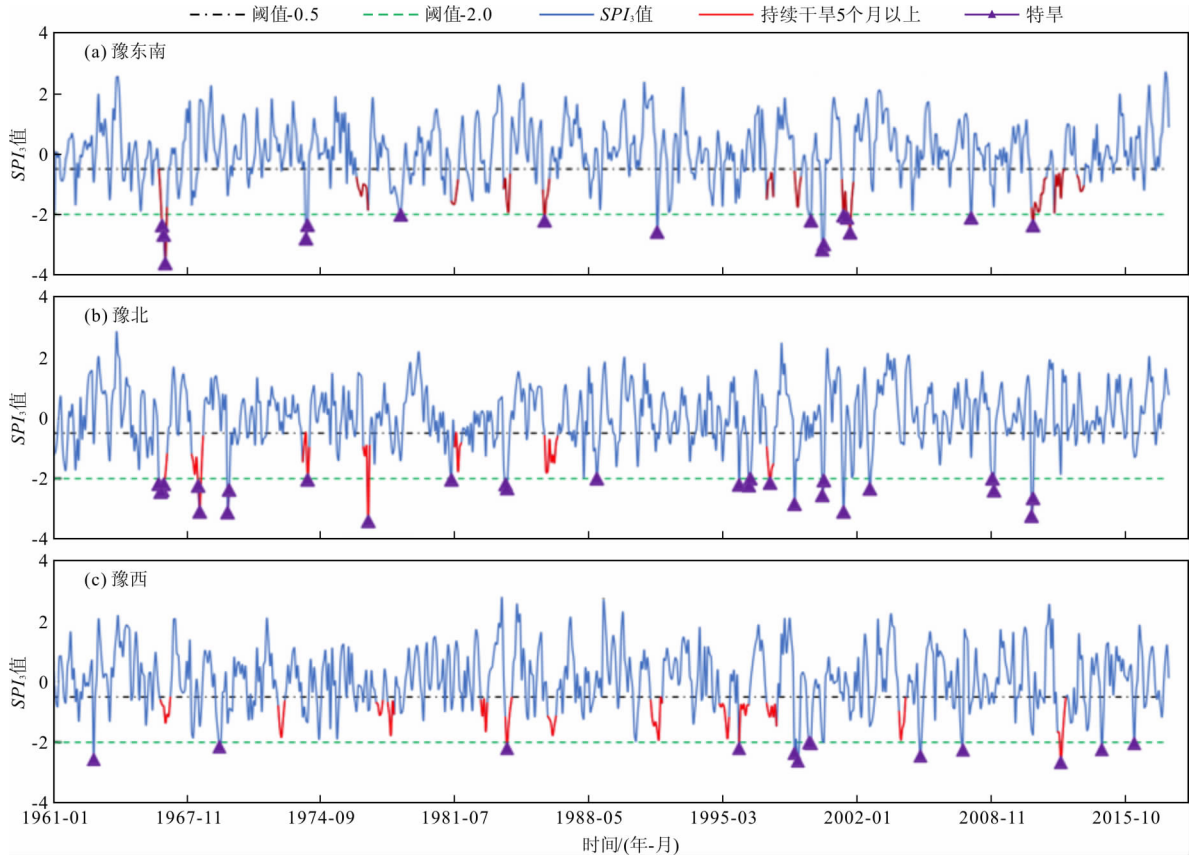


图 3　豫东南、豫北、豫西的干旱指数 SPI_3 演变特征

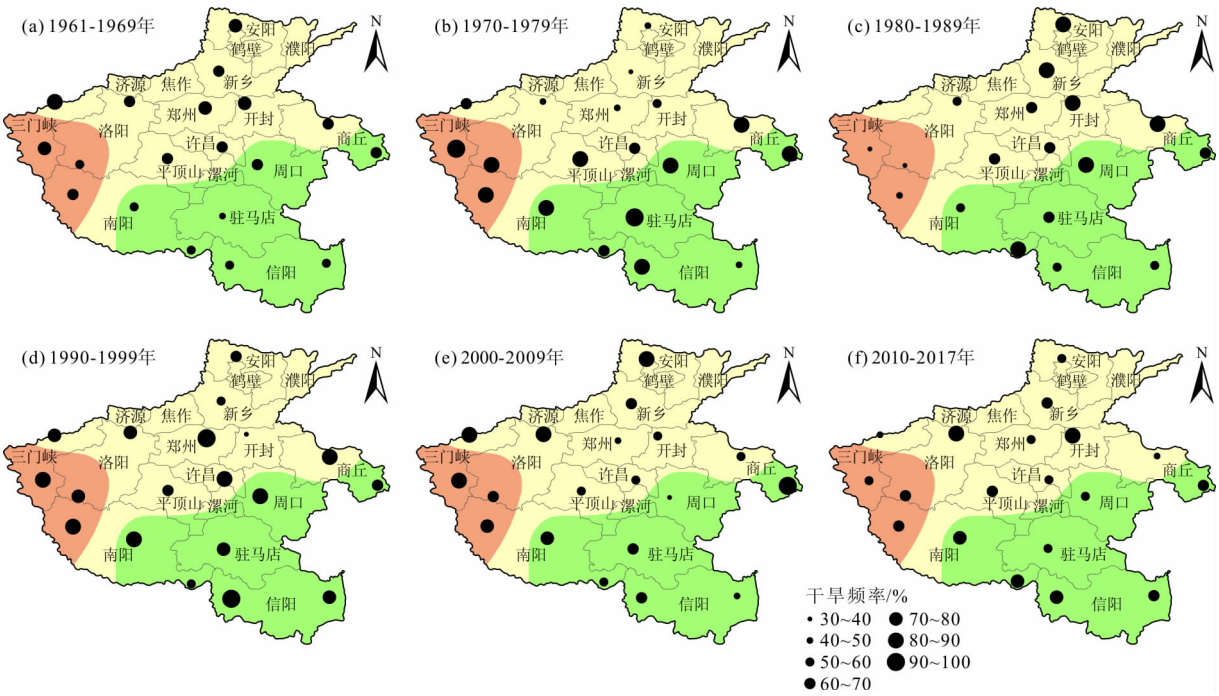
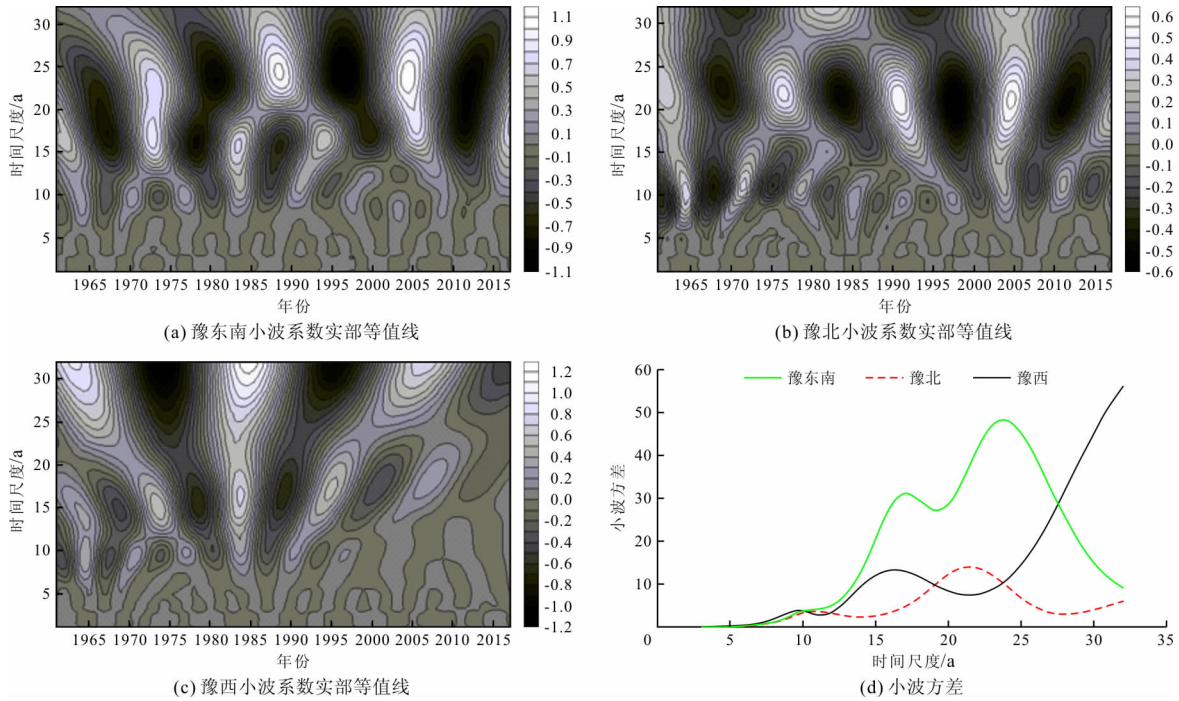


图 4　不同年代 SPI_{12} 频率空间分布



(a) 豫东南小波系数实部等值线　(b) 豫北小波系数实部等值线

(c) 豫西小波系数实部等值线　(d) 小波方差

图 5　豫东南、豫北、豫西的小波系数实部等值线图及小波方差图

5　结　论

(1) 由气象站的类别将所有气象站分成 3 个区域,一区为豫东南地区,包含信阳市、驻马店市以及南阳、漯河、周口、商丘市的部分区域;二区为豫北地区,涵盖市县数目多,行政区域分布密集;三区为豫西地区,覆盖区域面积最小,地势为山区林地。

(2) 在 1961 – 2017 年期间,豫东南的干旱在四季均有出现,在夏季出现频率最多,秋季次之,2010 年之后干旱程度快速降低;豫北在 20 世纪干旱影响时间长,多次发生连续 2 个月以上的特旱,特别在冬季;豫西在夏季易发生干旱,自 21 世纪起,发生特旱的年数为 5 a。

(3) 基于标准化降水指数 SPI_{12} 的干旱频率在全区上随着年际的变化特征表明,豫东南干旱频率先增加后降低交替出现;20 世纪 80 年代之后,豫北干旱频率明显增加,这与河南省社会经济发展有关;豫西干旱频率在 70 年代最高,80 年代最低。在空间上,干旱频率主要分布在豫北,豫西次之,豫东南最少。

(4) 经过小波分析,23 ~ 25、20 ~ 22、15 ~ 17 a 分别为豫东南、豫北、豫西易干旱的主周期,豫东南和豫北的干旱周期较为接近,但豫西的干旱周期与其余的差距较大,能够充分表现出干旱在河南省不同区域之间的差异性。

参考文献:

[1] 孙滨峰,赵 红,王效科. 基于标准化降水蒸发指数(SPEI)的东北干旱时空特征[J]. 生态环境学报,2015,24(1):22 – 28.

[2] 黄 茹,杨贵羽. 黄淮海流域干旱时间组合特征分析[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(2):1 – 6.

[3] 路 璐. 修正的帕尔默干旱指数在黄河流域的应用[D]. 大连:辽宁师范大学,2013.

[4] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Boston, MA: American Meteorological Society, 1993,17(22):179 – 183.

[5] 周 扬,李 宁,吉中会,等. 基于 SPI 指数的 1981 – 2010 年内蒙古地区干旱时空分布特征[J]. 自然资源学报,2013,28(10):1694 – 1706.

[6] 刘 鹏,杨 涛,师鹏飞,等. 塔里木河流域干旱态势时空变化规律分析[J]. 水电能源科学,2015,33(5):5 – 8 + 29.

[7] SONG Xiaoyan , SONG Songbai , SUN Wenyi , et al. Recent changes in extreme precipitation and drought over the Songhua River Basin, China, during 1960 – 2013[J]. Atmospheric Research, 2015,157:137 – 152.

[8] LI Qiongfang ,LI Pengcheng , LI Haoyang ,et at. Drought assessment using a multivariate drought index in the Luanhe River basin of Northern China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2015,29(6):1509 – 1520.

[9] 乔姗姗,潘红卫,雷宏军,等. 基于累积相对湿润指数的

遵义市农业干旱特征研究[J]. 灌溉排水学报,2017,36(8):109 - 114.
[10] 齐冬梅,李跃清,王 莺,等. 基于 Z 指数的四川干旱时空分布特征[J]. 干旱气象,2017,35(5):734 - 744.
[11] 鞠 彬,曾 明,徐国梁. 不同干旱指数在新疆哈巴河地区旱情评价中的应用研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(2):237 - 243.
[12] 张 磊. 基于 SPI 的近 51 年临沂市旱涝时空特征分析[C]//中国气象学会,创新驱动发展 · 提高气象灾害防御能力——S7 应对气候变化与农业气象防灾减灾,2013,9.
[13] 王 栋,梁忠民,王 军,等. 基于主成分聚类分析的云南省干旱自然分区[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(2):15 - 21 + 28.
[14] 李 明,王贵文,张莲芝. 基于 SPEI 的中国东北地区干旱分区及其气候特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(6):65 - 70.
[15] 陈继祖. 河南省区域干旱灾害风险评估[D]. 郑州:郑州大学,2010.
[16] 史本林,朱新玉,胡云川,等. 基于 SPEI 指数的近 53 年河南省干旱时空变化特征[J]. 地理研究,2015,34(8):1547 - 1558.
[17] 李思诺,翁白莎,严登明,等. SPI 和 SPEI 在阿克苏河流域的适用性分析[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(1):101 - 107 + 113.
[18] 张剑明,廖玉芳,彭嘉栋,等. 湖南气象干旱日数的时空变化特征[J]. 中国农业气象,2013,34(6):621 - 628.
[19] 史佳良,王秀茹,李淑芳,等. 近 50 年来河南省气温和降水时空变化特征分析[J]. 水土保持研究,2017,24(3):151 - 156.
[20] 程运平. 河南省农业干旱风险评价及区划[D]. 郑州:华北水利水电大学,2016.
[21] 李树岩,刘荣花,师丽魁,等. 基于 CI 指数的河南省近 40a 干旱特征分析[J]. 干旱气象,2009,27(2):97 - 102.
[22] 杜 懿,麻荣永. 1961 - 2016 年南宁市年降雨量变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(6):50 - 55.

(上接第 32 页)

[12] JAEHOON L , JAYNES D B , HORTON R . Evaluation of a simple method for estimating solute transport parameters: laboratory studies. [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64(2):492 - 498.
[13] 隋 涛. 济南市城区雨水利用潜力分析[D]. 济南:山东建筑大学,2008.
[14] 陈卫宾,徐建新,张 亮. 区域雨水资源开发利用潜力综合评价[J]. 灌溉排水学报,2004,23(5):66 - 68.
[15] 蔡锁章. 数学建模原理与方法[M]. 北京:海洋出版社,2000:234 - 240.
[16] 朱文彬,吕爱锋,曲 波. 我国城市雨水资源化利用的效益评价[J]. 给水排水,2017,53(S1):123 - 127.
[17] 郑斐冉. 基于低影响开发的城市雨水利用研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2017.
[18] 向碧为,黄国如,冯杰. 基于 AHP 法的东江流域水基系统健康模糊综合评价[J],水电能源科学,2011,29(10):1 - 4.
[19] 胡东启,陈 星,张其成,等. 低影响开发在海绵城市建设中的应用[J]. 水电能源科学,2017,35(4):18 - 21.
[20] 车 伍,李俊奇,刘 红,等. 现代城市雨水利用技术体系[J]. 北京水务,2003(3):16 - 18.