

# 近56年巢湖流域降水特征及其对旱涝灾害的影响

王诗晨<sup>1,2</sup>, 程先富<sup>1,2</sup>, 杨伟伟<sup>1,2</sup>

(1. 安徽师范大学 国土资源与旅游学院, 安徽 芜湖 241003; 2. 安徽自然灾害过程与防控研究省级实验室, 安徽 芜湖 241003)

**摘要:**通过1957—2012年巢湖流域56 a间的9个气象站的降水数据,基于趋势分析、Mann-Kendall突变检验、小波分析和标准化降水指数分析等方法,对巢湖流域降水特征和降水趋势进行了研究。结果表明:56 a间巢湖流域年降水量呈显著增加的趋势,线性增加率为28.09 mm/10 a。春季和秋季的降水略有递增,夏季和冬季降水量呈递减的趋势。年降水量在1963年、1969年、1976年、1978年存在4个降水突变点,并且在1990—1993年降水量趋势显著增加。56 a间年降水量主要存在3~5, 6~10, 12~18, 22~28 a的周期变化规律。通过对巢湖流域年降水量标准化降水指数进行旱涝等级划分,并对其突变前后的变化分析可知巢湖流域在降水灾变后,洪涝灾害发生更加频繁,巢湖流域降水趋势逐渐向洪涝状态变化。

**关键词:**Mann-Kendall检验; 小波分析; SPI指数; 降水量; 巢湖流域; 旱涝灾害

**中图分类号:**P426.615

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2015)03-0289-06

## Characteristics of Rainfall in Chaohu Basin in the Last 56 Years and Their Influences on Droughts and Floods

WANG Shichen<sup>1,2</sup>, CHENG Xianfu<sup>1,2</sup>, YANG Weiwei<sup>1,2</sup>

(1. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241003, China;

2. Anhui Key Laboratory of Natural Disaster Process and Prevention, Wuhu, Anhui 241003, China)

**Abstract:** Through the precipitation data from 56 meteorological stations in Chaohu Basin in the last 56 years from 1957 to 2012 and based on the methods such as Mann-Kendall mutation test, wavelet transform and SPI index, the precipitation time series of Chaohu Basin was analyzed including precipitation trend analysis, mutation analysis, periodic analysis and droughts and floods index analysis. The results showed that annual precipitation in the 56 years in Chaohu Basin presented the significant increasing trend, and the linear increase rate was 28.09 mm/10 a. Precipitation in spring and autumn slightly increased, precipitation in summer and winter had the decreasing trend. The annual precipitation had 4 events of mutation in 1963, 1969, 1976 and 1978, respectively, and reached the significant level from 1990 to 1993. Annual precipitation presented 3~5, 6~10, 12~18 and 22~28 years periodic variations over the 56 years. According to the drought grade division of the Chaohu Basin precipitation of the standardized precipitation index, and the changes before and after the mutation analysis in the Chaohu Basin precipitation after disaster, waterlog occurs more frequently in Chaohu Basin, and the precipitation readily causes the floods.

**Keywords:** Mann-Kendall mutation test; wavelet analysis; SPI index; precipitation; Chaohu Basin; drought and flood disasters

随着全球气候变暖的日益加剧,气候变化已经成为人们普遍关注的热点问题,全球各个国家和地区对极端气候事件的发生越来越重视。降水作为水资源的来源,其趋势变化对流域水资源有着深远的影响,强降水事件的频率可能上升,并导致洪涝灾害风险的增加<sup>[1]</sup>。降水量的变化是影响干旱以及洪涝变化的最主要的因子<sup>[2]</sup>。近些年来,国内外许多学者对降水趋势

变化做了大量的研究,目前趋势分析的方法有很多,普遍用于研究降水和气温变化趋势的方法有线性倾向估计、累积距平、滑动平均、二次平滑、三次样条函数、Mann-Kendall秩次相关法、小波分析等方法。比如孙善宇<sup>[3]</sup>运用PCI降水集中度分析等方法分析了宁夏半个多世纪降水时空变化规律及其变化趋势;徐宗学等<sup>[4]</sup>用非参数检验方法分析了黄河流域降水空间分

布规律;康淑媛等<sup>[5]</sup>运用非参数检验方法(Mann-Kendall法)分析了张掖市降水量的时空分布规律;张剑明等<sup>[6]</sup>用线性回归方法分析了湖南省近46 a来降水时空分布特征及趋势;黄玉霞等<sup>[7]</sup>运用EOF、REOF、小波分析等方法对西北5省的年降水量的时空分布、演变规律及各区域的周期变化特征进行了研究分析;杜海波等<sup>[8]</sup>以多重分形趋势波动分析法定义极端事件的阈值,分析了丹东地区极端最高温度、极端最低温度和极端降水的变化特征;G. Narisma等<sup>[9]</sup>分析了20世纪全球降水的区域突变。

以上这些研究主要集中在降水量变化方面的分析,而实际上对人们生活影响最直接并且最严重的还是自然灾害的发生,其中影响最大的要属旱灾和洪涝灾害。目前,学者们对于旱涝灾害的研究主要通过使用旱涝指数来进行分析,当前常用的旱涝指数包括Palmer指数(PDSI)、CI指数、Z指数以及标准化降水(SPI)指数等。于文金等<sup>[10]</sup>采用Z指数作为旱涝指标,对长江流域地区旱涝的转化规律及其时空变化特征进行了探讨;姚蕊等<sup>[11]</sup>运用旋转经验正交函数(REOF)方法,分析了广西地区近48 a旱涝时空变化特征;王志良等<sup>[12]</sup>根据标准化降水指数分析了郑州市不同时间尺度的旱涝变化状况;而郑晓东等<sup>[13]</sup>则采用标准化降水指数分析了淮河流域近50 a的年度干旱指数,并利用干旱发生频率、干旱站次比和干旱强度3项干旱指标分析了淮河流域的干旱演变特征。以PDSI指数为代表的对物理过程研究的方法,计算复杂,资料需求量大,部分数据只能通过经验估计,降低了计算精度,而以SPI为代表的对降水量的统计分布规律的研究,计算简单,资料较易获取,并且具有普遍适用性。

在全球气候变暖的背景下,学者们对于巢湖流域的降水趋势变化研究较少,而巢湖流域作为皖江城市带的组成部分,对该地区经济发展具有重要意义。本文试图通过趋势分析、Mann-Kendall突变检验、小波分析和标准化降水指数分析等方法分别对巢湖流域内近56 a降水特征以及其对旱涝灾害的影响进行分析研究,以便为日后该流域旱涝灾害的研究奠定基础。

## 1 研究区概况

巢湖流域位于安徽省中部,东临长江,西临大别山区,是我国著名的五大淡水湖之一。地理坐标为31°25'18"—31°43'28"N,117°16'54"—117°51'46"E。流域内地形地貌较为复杂,连接着江淮丘陵地带以及沿江平原区,由低山、丘陵、岗地、平原4种地貌组成。巢湖流域属亚热带湿润季风气候区,气候四季分明,年均气温为16~16.5℃。巢湖流域是长江下游左岸

水系,东西长54.5 km,南北宽21 km,湖岸线均170 km。流域面积9 258 km<sup>2</sup>(按巢湖水位8.37 m计算)<sup>[14]</sup>。流域内共有35条河流,分别主要属于杭埠—丰乐河、南淝河、派河、柘皋河、白石天河等6条水系,流域横跨合肥、巢湖、六安等行政区域,本文研究巢湖流域降水特征及对旱涝灾害的影响所选取的研究对象为合肥市、肥东县、肥西县、巢湖市、庐江县、含山县、和县、无为县以及舒城县9个行政地区。巢湖流域内气候多变,降水不均,并且多发生暴雨,属于旱涝灾害的易发地区<sup>[15]</sup>。

## 2 数据来源和研究方法

### 2.1 数据来源

研究数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。选取1957—2012年56 a间巢湖流域内9个气象站的逐月降水量,计算出年降水量、春(3—5月)、夏(6—8月)、秋(9—11月)和冬(12月—次年2月)的各季降水量序列。

### 2.2 研究方法

(1) 趋势分析法。趋势分析法是基于一元线性回归方程计算各年份的直线回归系数的方法,是目前普遍使用的一种计算气候倾向率的方法。本文用此方法可以计算出巢湖流域降水要素的气候倾向率,定量分析降水的趋势变化。公式如下:

$$y=a+bx \quad (1)$$

式中: $y$ ——降水要素; $x$ ——降水的时间序列; $b \times 10$ 即为降水要素每10 a的气候倾向率<sup>[14]</sup>。

(2) Mann-Kendall突变检验法。Mann-Kendall法是一种非参数统计检验方法,变量可以不具有正态分布特征,因此适用于水文变量的趋势检验。M-K突变检验法定义统计量UF,UB,若UF值大于0,则表明序列呈上升趋势,小于0则表明呈下降趋势,当超过临界线时,表明上升、下降趋势显著。如果UF,UB两条曲线出现交点,且交点位于临界线之间,那么交点对应时刻即是突变开始时刻<sup>[14]</sup>。

(3) Morlet小波分析。小波变换分析是20世纪80年代初由法国科学家Morlet提出的一种信号的时间—尺度(时间—频率)分析方法,可以得到时间序列周期变化的局部特征及各周期随时间的变化情况,是在水文和气象领域研究的一个重要工具。本文用Morlet小波分析来揭示巢湖流域50 a来降水的周期性变化特征<sup>[17-20]</sup>。

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in R, a \neq 0 \quad (2)$$

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{R^+} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

式中:  $\phi_{a,b}(t)$ ——子小波;  $W_f(a,b)$ ——小波系数;  $a$ ——尺度因子,反映小波的周期长度;  $b$ ——平移因子,反映时间上的平移。式(2)为连续小波变换(Continue Wavelet Transform, 简称为 CWT)的公式。

(4) 标准化降水指数分析。标准化降水指数(Standardized Drecipitafion Index, SPI)是反映某时段内降水量出现概率多少的指标之一,是 McKee 等<sup>[21]</sup>在 1993 年提出来的,Shih-Chieh 等<sup>[22]</sup>提出将时间序列中不同月份的 SPI 值先分别计算,再合起来得到整个时间序列的 SPI 值。本文使用该指数研究突变点前后年降水的旱涝变化情况。SPI 指数计算公式如下:

$$SPI = \frac{t - (c_2 + c_1)t + c_0}{[(d_3t + d_2)t + d_1]t + 1.0} \quad (4)$$

式中:  $t = \sqrt{\ln \frac{1}{H(x)^2}}$ ;  $H(x)$ ——与伽马函数( $\Gamma$  函数)相关的降水分布概率,由  $G(x)$  求得;  $x$ ——降水量样本值;  $S$ ——概率密度正负系数。当  $G(x) > 0.5$ ,  $H(x) = 1.0 - G(x)$ ,  $S = 1$ ; 当  $G(x) \leq 0.5$ ,  $H(x) = G(x)$ ,  $S = -1$ 。  $G(x)$  由  $\Gamma$  分布概率密度积分公式求得,见式(4):

$$G(x) = \frac{1}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} \int_0^x x^{\gamma-1} e^{-x/\beta} dx \quad x > 0 \quad (5)$$

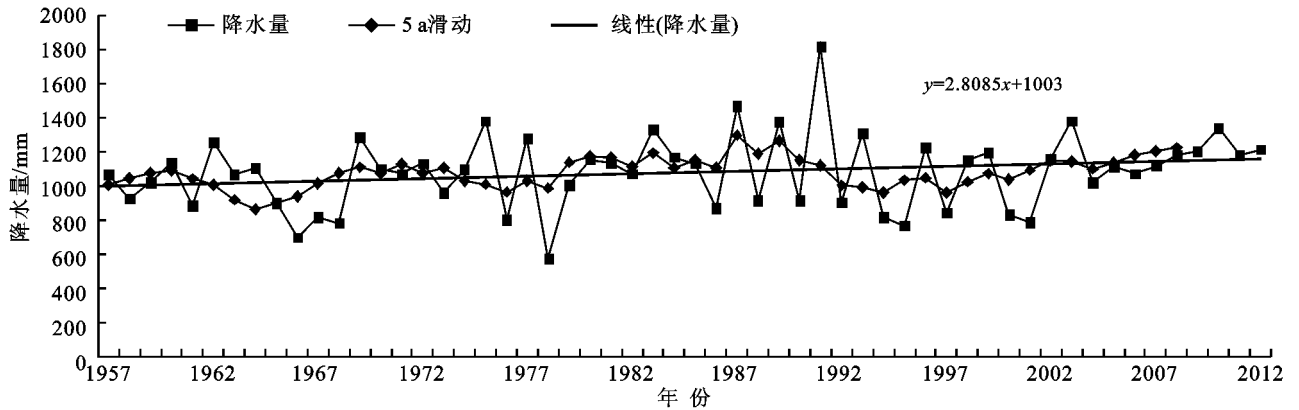


图 1 1957—2012 年巢湖流域年降水量趋势曲线变化

3.1.2 降水季节变化 由图 2 可以看出,巢湖流域春季的降水量略有递减,每 10 a 减少 6.09 mm,这与陈实等<sup>[23]</sup>的研究成果一致。由 5 a 滑动和趋势线可见,春季降水上下波动较小,只有在 1977—1978 年有较大波动。春季降水最多的年份出现在 1977 年,达到了 505.9 mm,同时第二年降水量明显减少,只有 172 mm,其他年份变化不大。

夏季降水量呈明显的增加趋势,增加速率是四季中最高的,达到了 24.39 mm/10 a,并且降水量也是每个季节中最多的,约占年均降雨量的 50%。相比于春季的降水起伏,夏季降水量的上下波动明显增大,在 1991 年更是达到 1 128.9 mm。由于夏季降水

$$\Gamma(y) = \int_0^{\infty} x^{y-1} e^{-x} dx \quad (6)$$

式中:  $\beta$ —— $\Gamma$  函数的尺度参数;  $\gamma$ —— $\Gamma$  函数的形状参数,  $c_0, c_1, c_2$  和  $d_1, d_2, d_3$  为  $\Gamma$  函数转换为累计频率简化近似求解公式的计算参数。通过查阅相关文献可知,公式相关的计算参数取值为  $c_0 = 2.515\ 517$ ,  $c_1 = 0.802\ 853$ ,  $c_2 = 0.010\ 328$ ,  $d_1 = 1.432\ 788$ ,  $d_2 = 0.189\ 269$ ,  $d_3 = 0.001\ 308$ <sup>[13]</sup>。

### 3 结果与分析

#### 3.1 降水趋势变化分析

3.1.1 降水年际变化 由图 1 可见,1957—2012 年,巢湖流域年降水呈增加的趋势,并且线性增加率为 28.09 mm/10 a。年降水量最大值产生于 1991 年,达到了 1 821 mm,全年降水最少的年份为 1978 年,只有 575.5 mm。80 年代相对于 60,70 年代,巢湖流域降水明显增多,但也有少些年份出现干旱现象。从流域年降水量 5 a 滑动平均曲线可见,流域内年降水在 1966 年之前处于减少的趋势,1966 年以后在平均降水量上下波动,从 1979—1991 年巢湖流域表现为多雨期。总体看来,巢湖流域内多年降水量相对较稳定,各年降水量之间差别相对不大。

量起伏较大,易发生多雨或突降暴雨年份较多,进而容易发生暴泥石流等自然灾害现象。

巢湖流域的秋季降水量呈减少的趋势,减少的趋势也是四季中最小的,递减倾向率是 7.42 mm/10 a。降水量相比于夏季,也相对较少。在 1976—1987 年波动较为明显,1987—2001 年 5 a 滑动一直在趋势线以下,说明降水量一直不多。秋季是农作物生长需要大量水份的季节,少雨年份塘坝水库蓄水量供不应求,容易发生干旱。冬季降水量略有增加,每 10 a 增加 10.86 mm。降水量与秋季一样,相对较少,在 1986 年之前,降水量波动较小,在这以后,波动起伏明显加大。降水量的最大值也产生于 2001 年,为 269.3 mm。

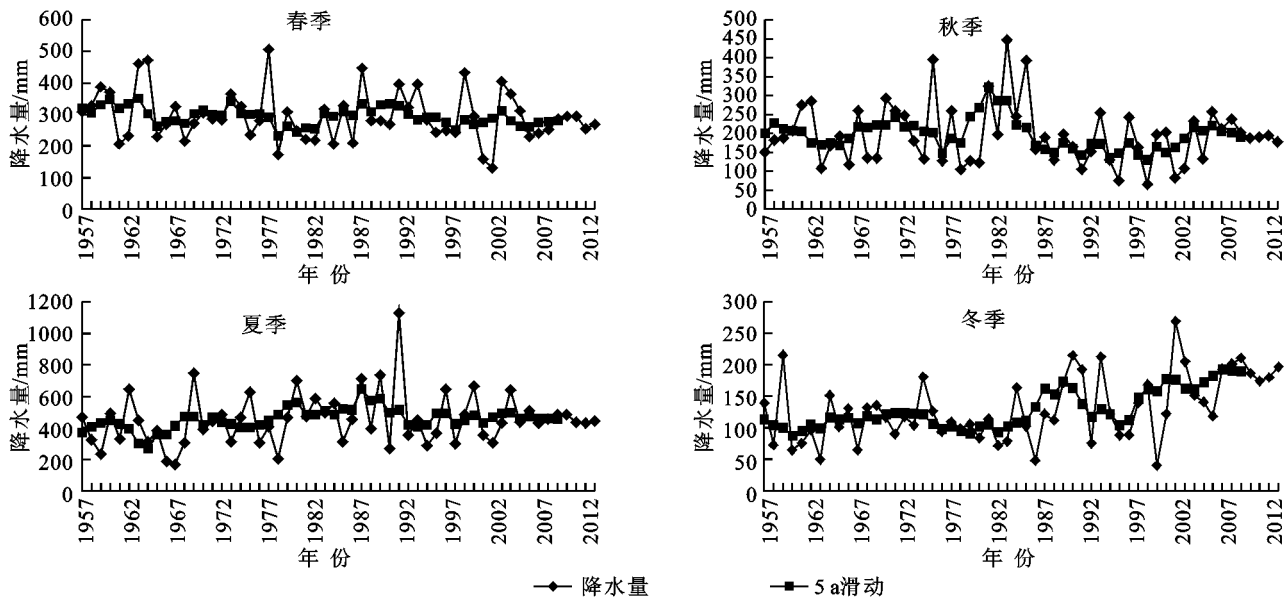
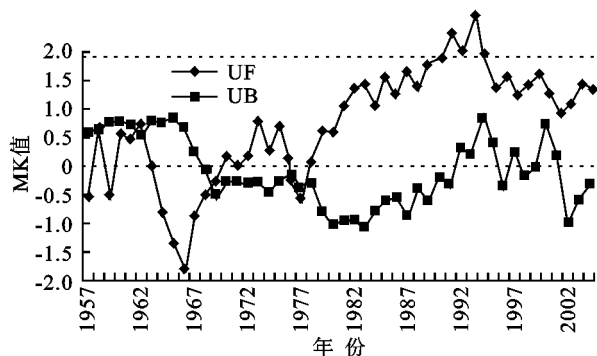


图 2 1957—2012 年巢湖流域四季降水量的趋势曲线变化

### 3.2 降水突变分析

从一个稳定的气候阶段向另一个稳定的气候阶段过渡,且气候阶段持续时间的长度远大于过渡时期的长度,这种现象称作气候突变<sup>[17]</sup>。用 Mann-Kendall法对 1957—2012 年巢湖流域降水变化序列进行突变检验分析(图 3):1957 年、1959 年的  $UF < 0$ ,说明这两年的降水量是减少的;1960—1963 年,  $UF > 0$ ,表明降水趋势逐渐上升;1964—1968 年,  $UF < 0$ ,说明这一阶段降水趋势逐渐下降。1969—2007 年,只有 1976 年、1977 年、1978 年的  $UF < 0$ ,表明只有 3 a 的降水量是呈减少趋势的,其余年份的降水量是增加的,这也与前面对于降水年际变化的研究结果相一致。根据  $UF$ ,  $UB$  曲线的交叉点判断,  $UF$  与  $UB$  线在  $\pm 1.96$  临界线之间分别在 1963 年、1969 年、1976 年、1978 年 4 处相交,这 4 个点即为突变点。并且在 1990—1993 年  $UF$  线超过 0.05 显著性水平,表明这几个年份的降水量趋势显著增加。



注:图中虚线是显著水平  $\alpha = 0.05$  时,  $U = \pm 1.96$  的临界线。

图 3 1957—2012 年巢湖流域年降水的 Mann-Kendall 检验

### 3.3 周期性分析

目前,可选用的小波函数很多,如 Mexican hat 小

波、Haar 小波、Morlet 小波和 Meyer 小波等。由于本文的研究对象的时间序列是连续的,所以我们选用 Morlet 连续复小波变换来分析巢湖流域 50 a 间降水的周期性变化特征。首先通过 Matlab 经过信号延伸 singal extension 处理,然后经过一维复合小波分析处理采用 cmor 方法得出小波系数,再通过 Excel 获取小波系数实部图,最后在 sufer 8.0 中运用克里金插值求得全年和各季的小波系数实部时频图(图 4)。图中小波系数中心值所对应的横坐标为年份,对应的纵坐标值为序列的变化周期,小波系数正值表示降水处于对应的子波周期中的多雨期,负值表示降水处于干旱期。

由图 4 可知,年降水量主要存在 3~5, 6~10, 12~18, 22~28 a 的周期变化规律,其中心时间尺度分别为 4, 9, 15, 27 a 左右。1958—1973 年、1993—1998 年分别存在着准 9 a 和准 4 a 的显著周期变化。2007 年以后的正相位等值线未完全闭合,因此可以推测此后一段时间年降水仍将处在偏多的状态。

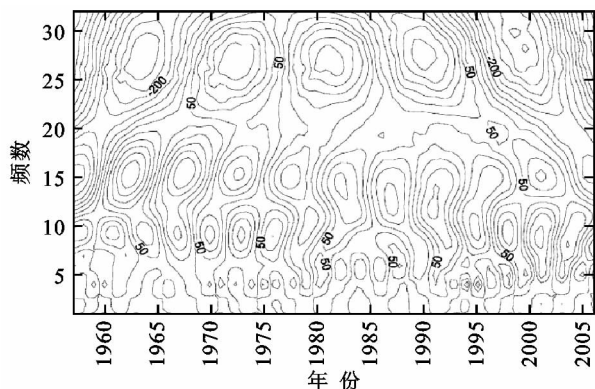


图 4 1957—2012 年巢湖流域年降水小波变换实部时频

### 3.4 SPI 指数与旱涝变化的适应性分析

通过对巢湖流域 1957—2012 年的年降水量通过

标准化降水指数计算,可以得到近 50 a 来巢湖流域年降水量 SPI 变化距平图(图 5),可见,SPI 指数随年份波动较为显著,旱涝交替发生。依照国家气候中心划分标准<sup>[18]</sup>所划分的旱涝等级(表 1)。发现每级的理论频率和实际频率均较接近(表 2),表明该 SPI 指数等级划分标准能够反映巢湖流域的旱涝灾害的变化特征。

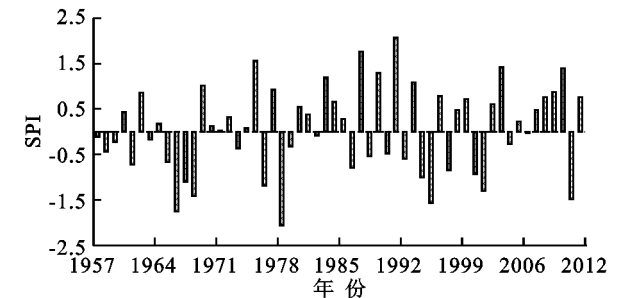


图 5 1957—2012 年巢湖流域年降水量 SPI 指数变化距平

表 1 标准化降水指数(SPI)旱涝分级

SPI 值	旱涝等级	累计频率
$SPI \geq 2.00$	极涝	$>95\%$
$1.50 \leq SPI < 2.00$	重涝	$>85\% \sim 95\%$
$1.00 \leq SPI < 1.50$	中涝	$>70\% \sim 85\%$
$-1.00 < SPI \leq 1.00$	正常	$>30\% \sim 70\%$
$-1.50 < SPI \leq -1.00$	中旱	$>15\% \sim 30\%$
$-2.00 < SPI \leq -1.50$	重旱	$>5\% \sim 15\%$
$SPI \leq -2.00$	极旱	$<5\%$

表 3 1957—2012 年巢湖流域年降水量突变前后各级 SPI 指数出现频率及时间

旱涝指数	1957—1977 年			1978—2012 年		
	出现时间/a	出现频率/%	涝—正常—旱频率/%	出现时间/a	出现频率/%	涝—正常—旱频率/%
极涝	0	0.0	19.1	2	5.7	34.3
重涝	1	4.8		3	8.6	
中涝	3	14.3		7	20.0	
正常	11	52.4	52.4	13	37.1	37.1
中旱	2	9.5	28.6	6	17.1	28.5
重旱	3	14.3		2	5.7	
极旱	1	4.8		2	5.7	

4 结论与讨论

- (1) 1957—2012 年 56 a 间巢湖流域年降水量呈显著增加的趋势,平均以每 10 a 增加 30.14 mm 的速度递增加,春季和秋季的降水略有递减,夏季和冬季降水有递增的趋势。其中夏季的降水变化强度最大,占年降水量的比重也最大,春季次之。
- (2) 通过降水突变分析可知,巢湖流域年降水呈增加趋势,与趋势分析法的结果相一致,并在 1963 年、1969 年、1976 年、1978 年存在 4 个降水突变点,并且在在 1990—1993 年之间 UF 线超过 0.05 显著性水平,表明 1990—1993 年降水量趋势显著增加。
- (3) 对于降水的周期性分析,可以发现巢湖流域

表 2 1957—2012 年巢湖流域年降水量 SPI 指数旱涝等级出现频率

等级	SPI 指数旱涝等级 频率(全年)/%	理论频率
极涝	4	5
重涝	8	10
中涝	16	15
正常	42	40
中旱	14	15
重旱	10	10
极旱	6	5

由上文研究可知,当降水突变发生在 1978 年,最接近 1990 年的显著水平,所以将降水突变 1978 年前的 21 a 与降水突变后的 35 a 进行对比(表 3)。可以看出,在 56 a 间极涝、重涝、中涝出现的年份分别由突变前的 0,4.8%,14.3%升高为突变后的 5.7%,8.6%,20.0%;中旱、重旱、极旱出现的年份由突变前的 9.5%,14.3%,4.8%上升到 17.1%,5.7%,5.7%,表明在降水量突变前后,旱涝灾害变化趋势明显。并且从涝—正常—旱出现频率可以看出,涝灾发生的频率由 19.1%上升到 34.3%,变化趋势明显,表明在降水灾变后,巢湖流域涝灾发生更加频繁。

- 50 a 间年降水量主要存在 3~5,6~10,12~18,22~28 a 的周期变化规律,1958—1973 年、1993—1998 年分别存在准 9 a、准 4 a 的显著周期变化。并且 2007 年以后的正相位等值线未完全闭合,由此推测此后一段时间年降水仍将处在偏多的状态。
- (4) 通过对巢湖流域年降水量标准化降水指数进行旱涝等级划分,并对其突变前后的变化分析可知涝灾发生的频率由 19.1%上升到 34.3%,变化趋势明显,表明巢湖流域在降水灾变后,洪涝灾害发生更加频繁,巢湖流域逐渐向洪涝状态变化。
- 通过对以上巢湖流域近 56 a 巢湖流域降水特征进行分析,可以得出引起洪涝灾害和旱灾发生的原因是复杂的,降水量的趋势变化是旱涝灾害发生的最主

要因素。巢湖流域内的旱涝灾害可能与气温、土壤、人类活动等因素有关,但具体的影响机理是什么,影响程度如何等问题还有待进一步地研究与阐释。

#### 参考文献:

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group I. Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Summary for Policymakers[M]. Intergovernmental Panel on Climate Change Secretariat, 2007.
- [2] 翟盘茂,邹旭恺. 1951—2003 年中国气温和降水变化及其对干旱的影响[J]. 气候变化研究进展, 2005(1): 16-19.
- [3] 孙善宇,徐利岗. 宁夏 1951—2008 年降水变化特征及趋势分析[J]. 人民黄河, 2011, 33(4): 24-28.
- [4] 徐宗学,张楠. 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析[J]. 地理研究, 2006, 25(1): 27-34.
- [5] 康淑媛,张勃. 基于 Mann-Kendall 法的张掖市降水量时空分布规律分析[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 501-508.
- [6] 张剑明,章新平,黎祖贤,等. 湖南省 46 年来降水的气候特征[J]. 热带气象学报, 2008, 24(5): 512-518.
- [7] 黄玉霞,李栋梁. 西北地区近 40 年降水异常的时空特征分析[J]. 高原气象, 2004, 23(2): 245-252.
- [8] 杜海波,吴正方,张娜,等. 近 60 a 丹东极端温度和降水事件变化特征[J]. 地理科学, 2013, 33(4): 473-480.
- [9] Narisma G T, Foley J A, Licker R, et al. Abrupt changes in rainfall during the twentieth century[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(6): 306-316.
- [10] 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.
- [11] 姚蕊,陈子桑. 基于标准降水指数的广西旱涝特征演变分析[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2013, 52(2): 115-120.
- [12] 王志良,曹蕾. 基于 SPI 的郑州市近 60 年旱涝特征分析[J]. 华北水利水电学院学报, 2011, 32(6): 30-32.
- [13] 郑晓东,鲁帆,马静,等. 基于标准化降水指数的淮河流域干旱演变特征分析[J]. 水利水电技术, 2012, 43(4): 102-106.
- [14] 韩丹,程先富. 安徽省 1961—2007 年降水特征分析[J]. 人民长江, 2011, 42(23): 23-26.
- [15] 窦鸿身,姜加虎. 中国五大淡水湖[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.
- [16] 窦睿音,延军平. 1960—2010 年关中地区旱涝灾害对气候变化的响应[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2012, 38(5): 542-547.
- [17] 吴洪宝,吴蕾. 气候变率诊断和预测方法[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [18] 向红莲,丁晶,王文圣. 小波分析在水文学中的应用研究及展望[J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 515-520.
- [19] 张建云,王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [20] 李贤彬,丁晶. 水文时间序列的子波分析法[J]. 水科学进展, 1999, 10(2): 144-149.
- [21] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]// 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim, California: American Meteorological Society, 1993: 179-183.
- [22] Kao S C, Govindaraju R S. A copula-based joint deficit index for droughts[J]. Journal of Hydrology, 2010, 380(1): 121-134.
- [23] 陈实,高超. 不同季节划分尺度下巢湖流域气候变化趋势分析[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(5): 582-587.

(上接第 288 页)

(3) 2007—2012 年协调状态空间分布格局的变化。不协调状态在滇西地区分布的数量有所减少,而在滇中地区分布的数量有所增加;协调状态类型的空间分布趋于集中,集中于滇东和滇西;相对不协调状态类型的空间分布在滇中消失,而在滇西新出现。这表明 2007—2012 年滇中城市化的协调性较差,人口与土地的配置不协调,并且这种不协调还在扩大,而滇东与滇西人地配置状态良好。

#### 参考文献:

- [1] 杨万钟. 经济地理学导论[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1999.
- [2] 郭施宏,王富喜,高明. 山东半岛人口城市化与土地城市化时空耦合协调关系研究[J]. 经济地理, 2014, 34(3): 72-78.
- [3] 陆大道,姚士谋,李国平,等. 基于我国国情的城镇化过程综合分析[J]. 经济地理, 2007, 27(6): 883-887.
- [4] 吕萍,周滔. 土地城市化与价格机制研究[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2008.
- [5] 李培祥. 广东人口城市化与土地城市化关系研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(29): 12955-12958.
- [6] 杨磊,张永福,王伯超. 乌鲁木齐市土地集约利用潜力评价研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(3): 35-38.
- [7] 郭施宏,王富喜. 山东省城市化与城市土地集约利用耦合协调关系研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 163-167.
- [8] 张萌萌,王亚华,柴明堂,等. 人口城市化与土地城市化协调关系研究: 以南京市为例[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(28): 17450-17452.
- [9] 刘彦随,杨忍. 中国县城城镇化的空间特征与形成机理[J]. 地理学报, 2012, 67(8): 1011-1020.
- [10] 朱凤凯,张凤荣,李灿,等. 1993—2008 年中国土地与人口城市化协调度及区域差异[J]. 地理科学进展, 2014, 33(5): 647-656.