

常州市降水时程演变及小波变化特征分析

刘 淼¹, 刘酌希², 周 毅¹, 郝曼秋², 高 成²

(1. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029;

2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于水文部门提供的常州市雨量站 1951 ~ 2010 年间的逐日降水资料, 利用 Mann-Kendall 趋势分析法和突变检验法对常州市年降水量、汛期降水量、非汛期降水量和降水日数进行趋势分析和突变检验, 并利用 Morlet 小波变换法分析常州市年降水量和汛期降水量的多时间尺度周期变化特征。结果表明, 年降水量和汛期降水量呈上升趋势, 但上升趋势不显著, 降水日数呈下降趋势, 且下降趋势显著。

关键词: 常州; 降水量; 时程演变; 周期分析

中图分类号: TV125

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839 (2018) 08-0020-05

Analysis on the time history evolution of precipitation and wavelet transform characteristics in Changzhou City

LIU Miao¹, LIU Zhuoxi², ZHOU Yi¹, HAO Manqiu², GAO Cheng²

(1. Jiangsu Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Nanjing 210029, Jiangsu;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu)

Abstract: Based on the daily precipitation data of Changzhou rainfall station in 1951~2010 from the hydrological department, the trend analysis and mutation test were used to analyze the annual precipitation, the precipitation in flood season, the non flood season precipitation and the number of precipitation days by Mann-Kendall trend analysis method and the mutation test method, and the Morlet wavelet transform method was used to analyze the multi-time scale periodic variation characteristics of annual precipitation and flood season precipitation in Changzhou City. The results showed that annual precipitation and flood season precipitation showed an upward trend, but the upward trend was not significant, while the number of precipitation days showed a downward trend, and the downward trend was significant.

Key words: Changzhou; precipitation; time history evolution; cycle analysis

0 引言

近年来, 气候变化和快速城市化使得城市水安全问题日益凸显, 而降水量是气候资源中最为重要的因素之一, 降水量的异常是引起许多地区

旱涝灾害的最主要原因^[1-2]。降水也是陆地供水的主要来源, 降水丰枯程度对当地的水资源量有着重要的影响^[3]。崔婷婷^[4]等通过分析苏州市城市扩张过程, 并通过分析受城市扩张影响程度大和受城市扩张影响程度小的两个雨量站的降水规律,

收稿日期: 2018-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301016); 中央高校基本科研业务费项目(2014B16814); 长江水利委员会长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2015206/KY); 江苏省水利科技项目(2017006)。

作者简介: 刘淼(1982—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究工作。

结果表明,随着城市扩张,城市降水量也发生了显著变化。秦建国^[5]等通过对苏南城市的降雨趋势分析,并结合历史演变法,建立了地区的降雨预报模型。曹宇峰^[6]等结合 Mann-Kendall 检验法和线性倾向估计法对淮河流域的降水变化特征进行了研究。张涵丹^[7]等通过采用 Mann-Kendall 突变检验法和 R/S 分析等方法分析了定西市的降水变化特征,结果表明,45 年来定西市的降水呈下降趋势,且夏秋季下降较为明显,降水量无明显的突变现象。孙青雪^[8]采用 Mann-Kendall 检验法对青山库区近 50 年的降水与径流数据进行分析,结果表明,降水无明显变化趋势,而径流呈现显著增加的趋势。王景才^[9]等采用气候倾向率和 Mann-Kendall 分析法等方法对淮河上中游流域的年降水和主汛期降水进行统计分析,得出流域内降水的时空分布特征。但目前针对常州市的降水量变化趋势的研究相对较少,为此本文选取年降水量、汛期降水量和降水日数等指标,研究常州市的降水变化趋势和特征演变,并利用小波分析对常州市的年降水量和汛期降水量进行周期分析。研究结果将会对分析常州市的历史及未来水文情势变化具有重要意义,同时也可作为常州市雨洪综合管理提供参考依据。

1 研究区概况

常州市位居长江之南、太湖之滨,地处长三角腹地,是江苏长江经济带的重要组成部分,全市面积 4385 km²。常州地貌类型属高沙平原,山丘平圩兼有,境内地势西南略高,东北略低,高低相差 2 m 左右。常州属北亚热带海洋性气候,常年气候温和,雨量丰沛,四季分明。常州春末夏初多有梅雨发生,夏季炎热多雨,冬季气候阴冷。常州市地处长江三角洲中心地带,由于具有特殊的地理环境,且近年来城市化进程加快,城市气候也随之发生了相应的变化,因此,对常州市降水变化规律的研究具有重要的现实意义。

2 资料与方法

2.1 研究资料

本文采用常州站 1951 ~ 2010 年的逐日降水资料,统计出逐年降水量,逐年汛期降水量及降水日数,其中汛期为每年的 4 ~ 9 月。表 1 为常州

市年降水量统计值,由表 1 知,常州市多年降水量的方差和极差较大,降水较不均匀。峰度系数大于 0,表明年降水量的分布比正态分布更为集中。

表 1 常州市 1951 ~ 2010 年年降水量统计值

统计值	平均值	方差	极差	峰度系数
年降水量(mm)	1092.2	48092.8	1296.3	2.5

2.2 Mann-Kendall 趋势检验

Mann-Kendall 法是世界气象组织推荐的一种非参数检验方法,由于该检验方法中的样本不需要遵从一定的分布,且分析结果不会受到少数异常值的干扰,更适用于揭示水文时间序列的变化趋势^[10]。

假定 X_1, X_2, \dots, X_n 为时间序列变量, n 为时间序列的长度。Mann-Kendall 法定义统计量 S 为:

$$S = \sum_{i < j} a_{ij} \quad (1)$$

$$a_{ij} = \text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_i < x_j) \\ 0 & (x_i = x_j) \\ -1 & (x_i > x_j) \end{cases} \quad (2)$$

当样本数目 n 比较大时,统计量 S 近似服从正态分布,其均值为 0,方差为:

$$\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (3)$$

Mann-Kendall 统计量 Z 可用下面方法计算:

$$Z = \begin{cases} (s-1)/\sqrt{\text{var}(s)} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ (s+1)/\sqrt{\text{var}(s)} & (S < 0) \end{cases} \quad (4)$$

在双边趋势检验中,对统计量 Z 而言,若 $Z > 0$,则存在上升趋势;若 $Z < 0$,则存在下降趋势。给定置信水平 α ,若 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,则在 α 置信水平上,时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。在水文统计中,置信水平 α 通常选用 0.05^[11]。

2.3 Mann-Kendall 突变检验

Mann-Kendall 法用于突变检验时,假定 X_1, X_2, \dots, X_n 为时间序列变量, n 为该时间序列的长度,变量构成一秩序列:

$$S_k = \Phi = (X - E_X) / \bar{X} C_v \quad (k=2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

式中:当 $X_j > X_i$ 时, $r_i = 1$; 当 $X_j \leq X_i$ 时, $r_i = 0$ ($j=1, 2, \dots, i$)。

定义统计量:

$$UF_k = [S_k - E(S_k)] / [\text{Var}(S_k)] \quad (6)$$

$$E(S_k) = n(n-1)/4 \quad (7)$$

$$\text{Var}(S_k) = n(n-1)(2n+5)/72 \quad (8)$$

UF_k 为标准正态分布, 给定置信水平 α , 若 $|UF_k| \geq U_{\alpha/2}$, 则代表序列具有显著的趋势变化。

再通过逆序时间序列 X_n, X_{n-1}, \dots, X_1 , 依据上式再次进行计算, 得出 UF'_k 统计序列, 同时使得 $UB_k = UF'_{n-k}$ ($k=1, 2, \dots, n$)。

分析统计序列 UF_k 和 UB_k 可以得出序列的变化趋势, 并可进一步确定突变发生的时刻。若 $UF_k > 0$, 表明序列具有上升的趋势; 若 $UF_k < 0$, 表明序列具有下降的趋势; 若 UF_k 超过临界值, 表明其变化趋势显著; UF_k 若与 UB_k 的曲线存在交点且交点在临界直线之间, 则交点对应的时间即是突变开始的时刻^[12]。

2.4 小波分析

小波分析法是一种具有多分辨功能的周期分析方法, 其基本思想为用一簇小波函数系来表示或逼近某一信号或函数。

对于给定的小波函数 $\varphi(t)$, 水文时间序列 $f(t)$ 的连续小波变换为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\varphi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (9)$$

式中: $W_f(a, b)$ 为小波变换系数; a 为尺度因子, 反映小波的周期长度; b 为时间因子, 反映时间上的平移; $\overline{\varphi}\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为小波函数。

小波方差 $Var(a)$ 的计算公式为:

$$Var(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} [W_f(a, b)]^2 db \quad (10)$$

$Var(a)$ 随 a 的变化过程反映了波动的能量随尺度的分布, 其峰值对应的时间尺度即为水文序列的主周期^[13]。

3 结果与分析

3.1 趋势分析

常州市 1951 ~ 2010 年间的平均降水量和 3 年滑动平均降水量时间序列如图 1 所示。由图 1 知, 常州市 1951 ~ 2010 年间的降水量变化幅度较大, 逐年分布不均衡。60 年多年平均降水量为 1092.2 mm。其中年降水量最大值出现在 1991 年, 为 1888.3 mm; 年降水量最小值出现在 1978 年, 为 592 mm, 两者相差 1296.3 mm。对于 3 年滑动平均降水量而言, 1985 ~ 1991 年降水较多, 其中 1989 ~ 1991 年 3 年滑动平均降水量最大, 为 1406.4 mm。1978 ~ 1980 年 3 年滑动平均降水量最小, 为 899.5 mm。降水量总体呈现增加趋势。

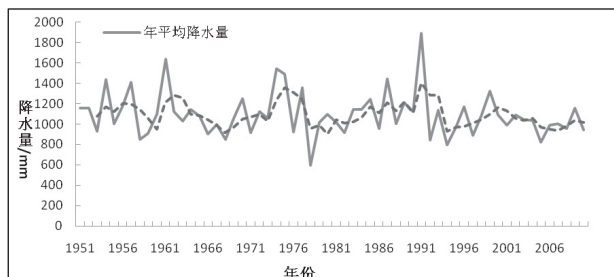


图 1 常州市 1951 ~ 2010 年平均降水量和 3 年滑动平均降水量时间序列

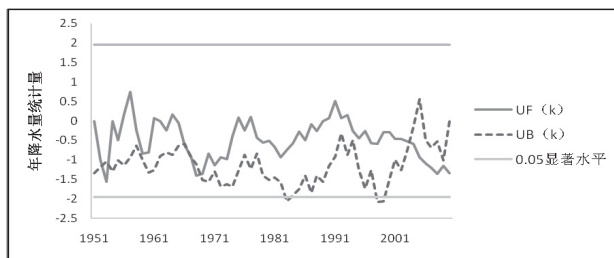
利用 Mann-Kendall 趋势检验法对常州市近 60 年的年降水量、降水日数和汛期降水量进行趋势检验, 检验结果见表 2。由表 2 可知, 常州市的年降水量和汛期降水量的 Z 值大于 0, 表明常州市的年降水量和汛期降水量均呈上升趋势。降水日数的 Z 值小于 0 且通过了 95% 的显著性检验, 表明常州市的降水日数呈下降趋势且趋势显著。年降水量和汛期降水量的 Z 值相对较低, 表明常州市的年降水量和汛期降水量上升趋势不显著。

表 2 常州市降水 Mann-Kendall 统计量

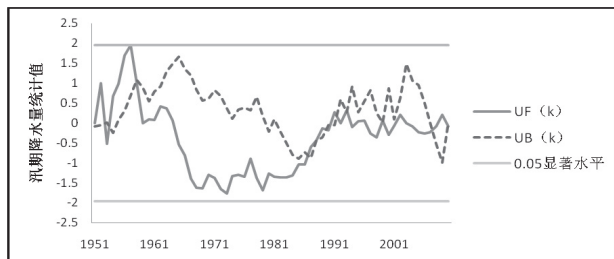
	Z	$Z_{\alpha/2}$	变化趋势	显著性
年降水量	0.60	1.96	上升	不显著
降水日数	-4.40	1.96	下降	显著
汛期降水量	0.84	1.96	上升	不显著

3.2 突变分析

对常州市年降水量、汛期降水量和降水日数进行 Mann-Kendall 突变检验, 得出突变检验图见图 2。



(a)



(b)

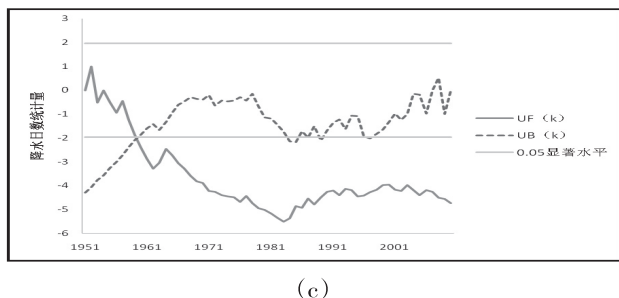


图2 Mann-Kendall 突变检验图

分析年降水量突变检验图(图2(a))可知, UF_K 和 UB_K 分别在 20 世纪 60 年代初和 21 世纪初存在交点, 交点所对应的年份为常州市降雨变化的转折点。1966 年前后 UF_K 和 UB_K 相交, 之后年降水量发生减少突变, 而 2003 年前后年降水量也发生减少突变, 但 2 次突变均未通过 95% 置信度检验, 说明突变并不显著。

依据汛期降水量突变检验图(图2(b))可知, 常州市汛期降水量自 20 世纪 50 年代以来也存在多个交点, 分别位于 20 世纪 50 年代末, 20 世纪 90 年代初和 21 世纪初。1958 年前后降雨发生突变, 至 20 世纪 90 年代初基本呈下降趋势, 之后在 21 世纪初发生增加突变, 此后至 2010 年基本呈上升趋势, 但趋势不显著。

由降水日数突变检验图(图2(c))可知, 自 1955 年之后 UF_K 值均小于 0, 表明降水日数呈现出下降的趋势。在 1959 年 UF_K 和 UB_K 发生相交, 且 Z 值为 2.01 超过了临界值, 表明这一年降水日数减少显著。

3.3 周期分析

结合 matlab 和 surfer 分别绘制出常州市 1951 ~ 2010 年年降水量的小波系数实部等值图, 见图 3。由图 3 可知, 常州市的年降水量数据主要存在 3 个不同时间尺度的周期震荡。在 22 ~ 32 a 的时间尺度上, 4 个正值中心和 3 个负值中心交替出现, 且周期表现较为稳定。在 12 ~ 20 a 的时间尺度上周期表现较为显著, 主要经历了 10 个时期的降水交替变换。在 8 ~ 10 a 的时间尺度上丰枯交替较为频繁且在 21 世纪以前表现较为稳定。

计算 Morlet 小波方差并绘制常州市年降水量 Morlet 小波方差图, 见图 4。小波方差图可以反映时间序列的波动能量随尺度 a 的分布情况, 从而可以读取降水的主周期时间尺度。图 4 中有 3 个较为明显的峰值, 分别为 28 a、17 a 和 8 a。其

中最大峰值 28 a 对应常州市年降水量的第一主周期, 17 a 对应常州市年降水量的第二主周期, 8 a 对应常州市的第三主周期。

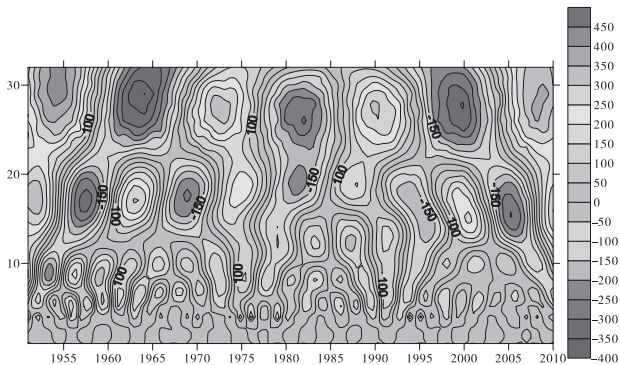


图3 常州市年降水量 Morlet 小波变化系数等值线

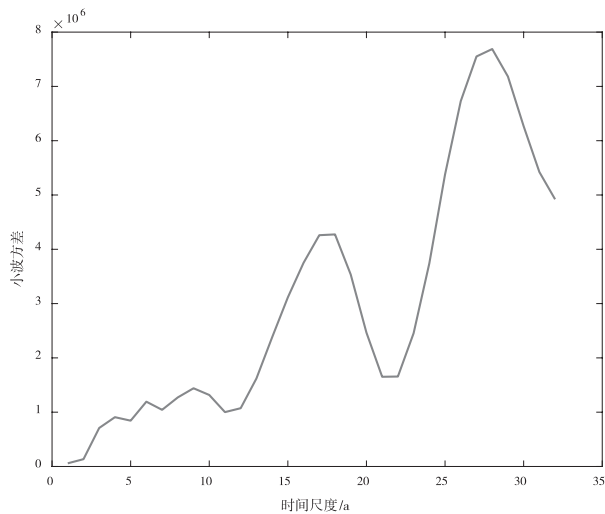


图4 常州市年降水量 Morlet 小波方差

同样地, 绘制出常州市 1951 ~ 2010 年汛期降水量的小波系数实部等值图, 见图 5。由图 5 可知, 常州市的汛期降水量存在 4 个较为明显的周期震荡。在 21 ~ 32 a 的时间尺度上, 4 个正值中心和 3 个负值中心交替出现, 且周期表现比较显著。在 13 ~ 20 a 的时间尺度上, 存在着 5 个正负交替的周期震荡, 且周期震荡较为稳定, 近 60 年里始终存在且强度较强。在 8 ~ 12 a 的时间尺度上, 丰枯交替较为频繁且在 1990 年以前表现比较稳定。在 3 ~ 7 a 的时间尺度上, 丰枯交替一直存在且强度较强。

图 6 为常州市汛期降水量 Morlet 小波方差图, 由图知, 27 a、18 a、6 a 和 9 a 为从大到小排列的 4 个峰值, 其对应的波动能量依次减弱, 因此, 常州市汛期降水量的第一至第四主周期分别为 27 a、18 a、6 a 和 9 a。

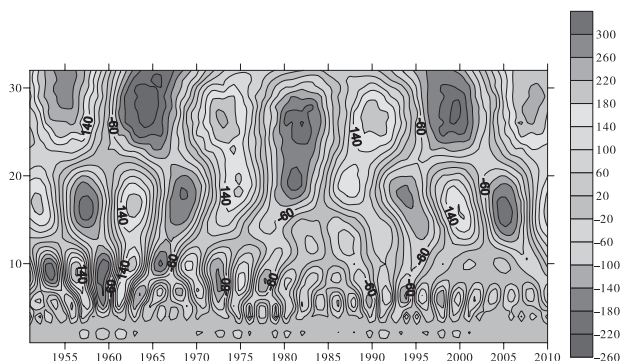


图 5 常州市汛期降水量 Morlet 小波变化系数等值线

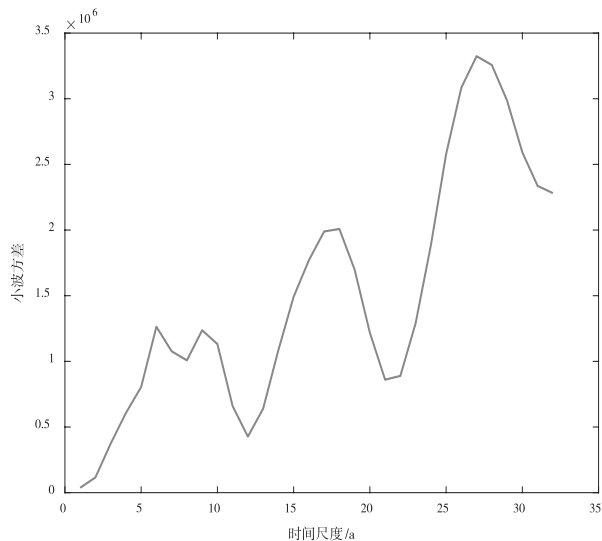


图 6 常州市汛期降水量 Morlet 小波方差图

4 结论

本文通过统计分析常州市 1951 ~ 1010 年的降雨资料,对常州市年降水量、汛期降水量和降水日数进行了趋势分析和突变分析,并利用小波分析对常州市年降水量和汛期降水量进行了周期分析,得出以下主要结论:

(1) 近 60 年来,常州市的年降水量、汛期降水量均呈上升趋势,但上升趋势不显著。降水日数呈下降趋势,且通过了 95% 的显著性检验,下降趋势显著。

(2) 年降水量突变发生在 20 世纪 60 年代初和 2003 年前后;汛期降水量突变发生在 20 世纪 50 年代末,20 世纪 90 年代初和 21 世纪初;降水日数突变发生于 1959 年。

(3) 常州市年降水量的第一至第三主周期分别为 28 a、17 a 和 8 a;常州市的汛期降水量的第一至第四主周期分别为 27 a、18 a、6 a 和 9 a。

参考文献:

- [1] YE X C, ZHANG Q, et al. Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China[J]. Journal of hydrology, 2013 (494) 83-95.
- [2] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007:69-72.
- [3] 丁瑾佳, 许有鹏, 潘光波. 苏锡常地区城市发展对降雨的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19 (8):873-877.
- [4] 崔婷婷, 王银堂, 等. 城镇化进程中苏州城市扩张过程及其对降水规律影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2017 (10):89-93.
- [5] 秦建国, 洪国喜, 等. 无锡站年际降雨趋势、特征与预报分析[J]. 水文, 2013, 33 (4):92-96.
- [6] 曹宇峰, 刘高峰, 等. 基于 Mann-Kendall 方法的淮河流域降雨量趋势特征研究[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2014, 37 (5):477-485.
- [7] 张涵丹, 卫伟, 等. 基于 R/S 分析和 Mann-Kendall 检验的定西市气温降水变化特征[J]. 水土保持研究, 2015, 22 (6):183-189.
- [8] 孙青雪. 基于 Mann-Kendall 检验的青山库区降水、径流变化趋势及突变分析[J]. 浙江水利水电学院学报, 2016, 28 (5):29-33.
- [9] 王景才, 徐蛟, 等. 1960 ~ 2014 年淮河上中游流域年降水和主汛期降水的时空分布特征[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15 (6):51-58.
- [10] 丁晶, 邓育仁. 随机水文学[M]. 成都: 成都科技大学出版社. 1988.
- [11] K H Hamed. Exact distribution of the Mann-Kendall trend test statistic for persistent data[J]. Hydrology, 2009 (1):86-94.
- [12] 桑燕芳, 王中根, 刘昌明. 水文时间序列分析方法研究进展[J]. 地理科学进展, 2013, 32 (1):20-30.
- [13] Lab at D. Recent advances in wavelet analyses: Part 1. A review of concepts[J]. Journal of Hydrology, 2005 (314):275-288.