

近 59 年许昌市降水演变特征分析

杨孟豪¹, 曹连海^{1,2}, 夏帆³, 商震霖¹

(1. 华北水利水电大学 测绘与地理信息学院, 河南 郑州 450046; 2. 南水北调中线水源区水安全河南省协同创新中心, 河南 南阳 473061; 3. 华北水利水电大学 水利学院, 河南 郑州 450046)

摘要: 利用许昌市 13 个降水量观测点 1956–2014 年的月降水量数据, 结合线性回归、Mann–Kendall 秩相关检验、累积距平和 Morlet 连续复小波分析等方法, 研究了许昌市不同时间尺度降水量的演变特征。结果表明: 许昌市年、雨季、旱季降水量分别以 8.7、1.6、7.3 mm/10a 的速率不显著减少; 年、雨季、旱季降水量在空间上均呈现出自东北向西南方向递增的分布格局; 年降水量在 1964 年发生了由多到少的突变; 雨季、旱季降水量在 1999 年分别发生了由少到多和由多到少的突变; 年降水量存在着 14、22、5a 的第一、第二、第三主周期变化; 雨季、旱季降水量同样存在着多个时间尺度的周期变化特征; 根据不同时间尺度主周期判断, 许昌市即将进入降水偏丰时期。研究结果可为许昌市防洪抗旱和水生态文明建设提供依据。

关键词: 降水; 演变特征; Mann–Kendall 秩相关检验; Morlet 连续复小波分析; 许昌市

中图分类号: P426.614

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)01-0060-06

Analysis of the evolution characteristics of precipitation in Xuchang City in recent 59 years

YANG Menghao¹, CAO Lianhai^{1,2}, XIA Fan³, SHANG Zhenlin¹

(1. College of Surveying and Geo- Informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Collaborative Innovation Center of Water Security for Water Source Region of Mid-line Project of South-to-North Water Diversion of Henan Province, Nanyang 473061, China; 3. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Using the monthly precipitation data of 13 precipitation observation points from 1956 to 2014 in Xuchang City, combined with the linear regression, Mann–Kendall rank correlation test, cumulative anomaly and Morlet continuous complex wavelet analysis, the evolution characteristics of the precipitation at different time scales in Xuchang City were studied. The results show that the annual precipitation and the precipitation in rainy season and dry season in Xuchang decrease non-significantly at the rates of 8.7 mm/10a, 1.6 mm/10a, 7.3mm/10a respectively. The annual precipitation, the rainy season and dry season, precipitation show a spatial pattern that increases from northeast to southwest. The annual precipitation reduced abruptly in 1964, and the precipitation of the rainy season increased and dry season reduced respectively in 1999. The first, second and third major cycle changes of annual precipitation respectively were 14a, 22a, and 5a. The precipitation of the rainy season and dry season also have several time scale periodic variation. According to the features of the major cycle changes, Xuchang city will enter a period of relatively abundant precipitation. The research results can provide basis for flood control and drought relief, and water ecological civilization construction in Xuchang City.

Key words: precipitation; evolution characteristics; Mann–Kendall rank correlation test; morlet continuous complex wavelet analysis; Xuchang City

收稿日期: 2018-05-21; 修回日期: 2018-07-17

基金项目: 河南省科技攻关项目(152102210325)

作者简介: 杨孟豪(1993-), 男, 河南襄城人, 硕士研究生, 研究方向为水资源开发与保护。

通讯作者: 曹连海(1970-), 男, 河南商城人, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为水土资源高效利用。

1 研究背景

气候变化将引起降水、径流的时空变化,进而增加了干旱、洪涝等极端气候事件发生的频次^[1-3]。IPCC^[4]第五次评估报告指出,在全球气候变暖背景下,区域间、雨季与旱季的降水对比度将会更激烈。因此,研究区域降水的演变特征对于了解区域降水发展动态、防洪抗旱具有重要作用^[5-8]。

许昌市位于河南省中部,地处南北气候过渡带,气候复杂多变,多旱、涝等气象灾害^[9-10],尤其是旱灾,几乎每年都有发生,已严重影响了许昌市的农业生产^[10];同时,作为首批国家级水生态文明建设试点城市,许昌市却是一个严重缺水的城市^[11],降水资源的有效利用是加快建设许昌市水生态文明的关键。因此,研究许昌市降水演变特征意义重大。苏丰敏等^[9]利用五年滑动平均法研究了许昌市年降水量的变化趋势,认为许昌市降水量整体呈现增多趋势,在季节上呈现出春季和秋季减少、夏季和冬季增多的趋势;顾万龙等^[12]结合河南省 103 个站点的降水资料,利用线性相关法分析了河南省 1956 - 2007 年降水的变化特征,指出豫中地区降水量呈现减少趋势。综合已有研究发现以下问题:(1) 研究所用方法相对单一;(2) 研究所用数据多在 2007 年以前;(3) 已有的研究结论不统一;(4) 缺乏对许昌市多时间尺度降水突变情况及周期性变化规律的研究。鉴此,本文采用线性回归、Mann - Kendall 秩相关检验、累积距平和 Morlet 连续复小波分析等方法,从年、雨季、旱季时间尺度出发,探讨许昌市 1956 - 2014 年降水量的变化趋势、突变情况以及周期性变化规律,以期为许昌市防洪抗旱提供参考,同时可为许昌市水生态文明城市的建设提供科学依据。

2 资料与方法

2.1 研究区概况

许昌市地处河南省中部(113°03' ~ 114°19'E, 33°42' ~ 34°24'N),总面积 4 996 km²,其中山地 521.2 km²,丘陵和岗地 836.8 km²,平原 3 638 km²。许昌市属北暖温带季风气候区,热量资源丰富,无霜期长。全市多年平均降雨量 691.2 mm,95% 干旱年份降水仅为 480.6 mm,而 20% 湿润年份降水为 809.6 mm,降水量年际变化大,年降水量变差系数 C_v 值为 0.22;降水年内分配也极不均匀,其中 6 - 9 月份降水集中,占全年降水量的 62%。许昌市因地处南北气候过渡带,属于大陆性季风气候,年内、年

际多旱、涝等气象灾害。

2.2 数据来源与处理

研究区所需降水量数据来源于许昌水文水资源勘测局,所有数据均经过严格的质量检测。因降水量观测起始年份的差异,且考虑到许昌市降水量观测点的迁移、撤销等问题,为了建立时间长度一致、观测稳定的降水量序列,在综合考虑许昌市山地、丘陵和岗地、平原等地形区域分布差异的情况下,最终选取了许昌市 13 个降水量观测点的月降水量数据作为本文的基础数据,降水量观测点的空间分布情况见图 1。降水量数据的时间跨度是 1956 年 1 月至 2014 年 12 月。

对许昌市降水量数据的处理分析主要是基于 Matlab R2017a、Excel 2007、Arcgis 10.2 等软件操作平台实现的。许昌市年降水量主要集中在雨季,因此本文对于降水量季节的划分采用雨旱季,即 6 - 9 月为雨季,其它月份为旱季。

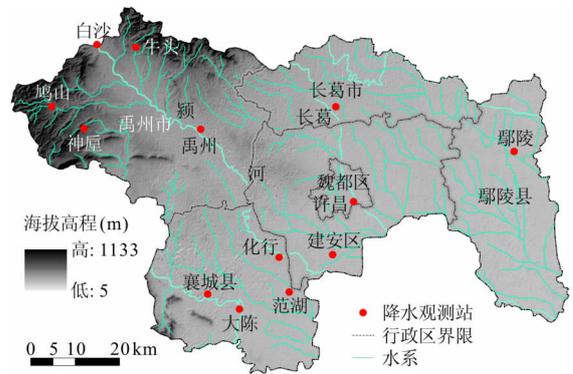


图 1 许昌市降水量观测点空间分布

2.3 研究方法

本次研究主要运用线性回归法^[13]、Mann - Kendall 秩相关检验法(以下简称 M - K 法)对许昌市年际和年内降水量进行趋势分析^[13-15]和突变状况检验^[13,16-17],并结合累积距平法^[18-19]对可能存在的虚假突变时间点进行剔除,确定符合实际的降水突变情况;文中选定 M - K 值取 ± 1.96 ,相应的显著性水平为 0.05。利用 Morlet 连续复小波分析法^[20-22]研究许昌市降水量的周期性变化规律,提取降水量变化的主周期,揭示多时间尺度降水变化的复杂结构。

3 结果与分析

3.1 降水量变化趋势

通过线性回归得到许昌市年降水量、雨/旱季降水量的时间变化如图 2 所示。许昌市年降水量最大值出现在 1964 年(1156.2 mm),与旱季降水量最大

值(623.4 mm)出现的时间点一致;年降水量第二高值时间点出现在1984年(1131.5 mm),与雨季降水量最大值(906.0 mm)出现的时间点一致。许昌市年际、年内降水量整体上均呈现波动减少趋势,结合

降水量变化趋势线可知,许昌市不同时间尺度降水量的减少速率由大到小依次为:年降水量(8.7 mm/10a) > 旱季降水量(7.3 mm/10a) > 雨季降水量(1.6 mm/10a)。

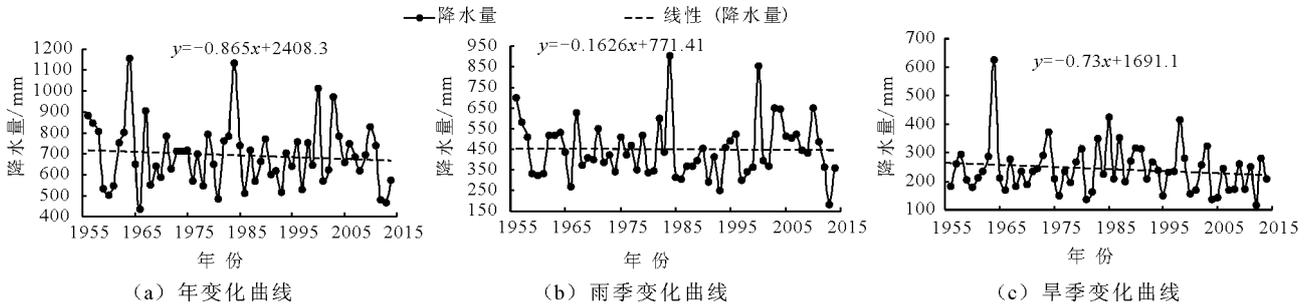


图2 许昌市降水量变化曲线

通过对许昌市13个降水量观测点年降水量、雨/旱季降水量进行M-K法趋势检验,得到各观测点M-K值的空间分布如图3所示。图3中的降水量背景值是由许昌市13个降水量观测点1956-2014年多年平均降水量借助Arcgis 10.2软件平台的地统计工具,利用克里金空间插值法^[23]得到。可以看出许昌市多年平均降水量在年际、年内时间尺度上的空间分布均存在着明显的地区差异,但整体上都呈现出自东北往西南方向降水递增的分布格局。其中,在襄城县、禹州市西南部山地以及鄢陵县南部地区存在着明显的年降水量、雨/旱季降水量高值区,而年降水量、雨/旱季降水量的低值区则主要分布在禹州市北部以及长葛市北部地区。

由图3可得,许昌市13个降水量观测点年降水

量、雨/旱季降水量的趋势检验结果均未通过0.05显著性水平检验,都表现为不显著变化趋势。其中,年降水量表现为下降趋势的有11个观测点,表现为上升趋势的有2个观测点;雨季降水量表现为下降趋势的有9个观测点,表现为上升趋势的有3个观测点,无变化的有1个观测点;值得注意的是所有13个观测点的旱季降水量变化趋势一致,均表现为下降趋势。

总体来看,近59年来许昌市年降水量、雨/旱季降水量均呈现为不显著减少趋势(表1),其中变化趋势M-K检验值的绝对值由大到小依次为:年降水量 > 旱季降水量 > 雨季降水量,这与线性回归法得到的降水量变化趋势一致,同时也验证了用M-K法检验许昌市降水量变化趋势是合理的。

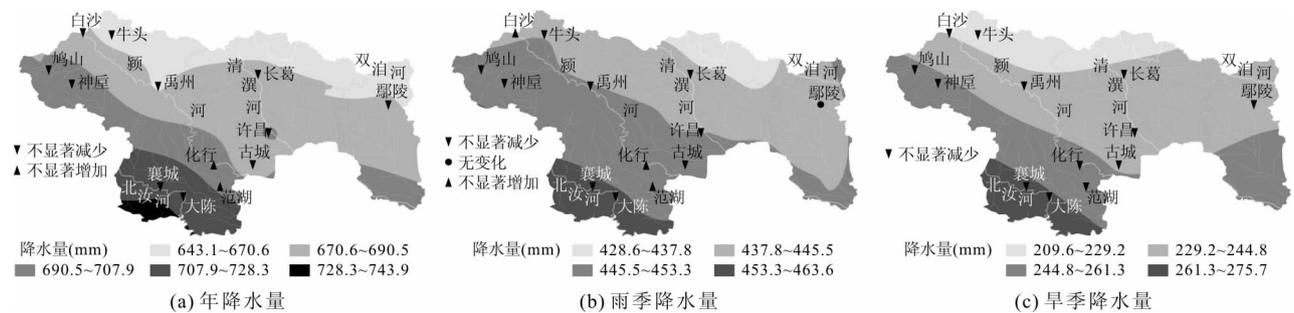


图3 各降水量观测点M-K值空间分布

表1 年、雨/旱季降水量M-K值

时间尺度	M-K值	0.05显著性水平	趋势	是否显著
年	-0.76	±1.96	减少	否
雨季	-0.24	±1.96	减少	否
旱季	-0.73	±1.96	减少	否

3.2 降水量突变分析

3.2.1 年降水量突变 通过M-K法和累积距平法研究许昌市年降水量的突变情况,如图4所示。图4(a)表明,许昌市近59年来年降水量表现为波动下降趋势,下降趋势不显著,仅在1959年通过了0.05的显著性水平,之后整体下降趋势微弱。 UF_k 和 UB_k 曲线在

1956 - 1957 年、1963 - 1965 年、1970 - 1971 年、1978 - 1980 年、1993 - 1998 年和 2011 - 2012 年间有多个交点,并且都在 0.05 显著性水平内,但若将这些点全部作为突变点显然不合适,进而配以累积距平法进行虚假突变点的剔除。结合累积曲线(图 4(b))分析发现,许昌市 1956 - 2014 年降水量存在明显的“升”、“降”阶段性变化特征,即 1956 - 1958 年降水量表现为增加趋势,1958 - 1961 年降水量大幅度减少,低于多年平均降水量,1961 - 1964 年降水量迅速增加,并于 1964 年达到了

历年降水量最高值,之后在 1965 - 2011 年降水量整体呈现“W”型微弱下降趋势,2012 - 2014 年降水量表现为持续下降趋势。综合两种方法推断许昌市的降水突变点在 1964 年,降水量发生了由多到少的突变,而其它年份的突变不明显。

3.2.2 雨/旱季降水量突变 为进一步了解许昌市年内降水量的突变情况,对年内雨季、旱季的降水量进行突变检验,绘制 M - K 突变检验曲线及累积曲线如图 5。

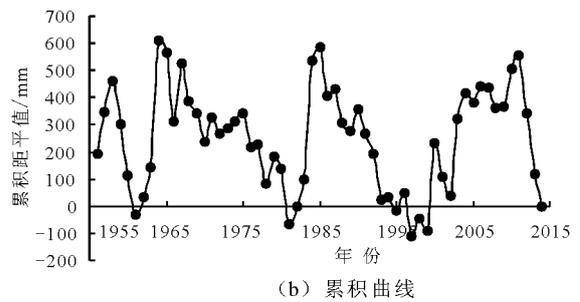
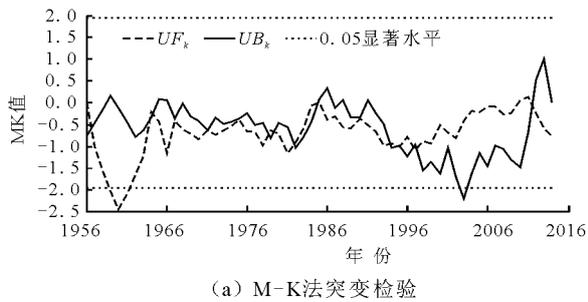


图 4 年降水量 M - K 突变检验及累积曲线

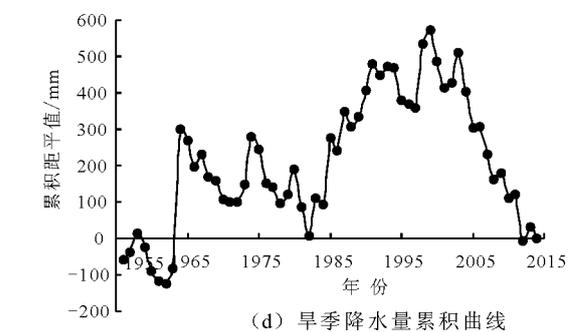
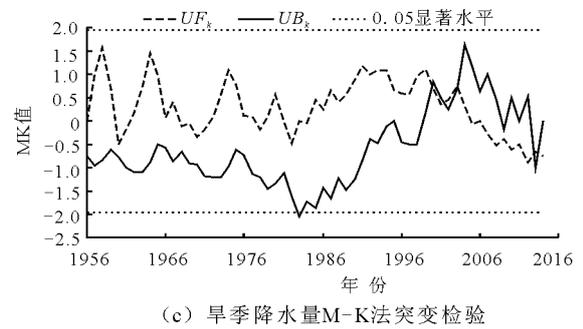
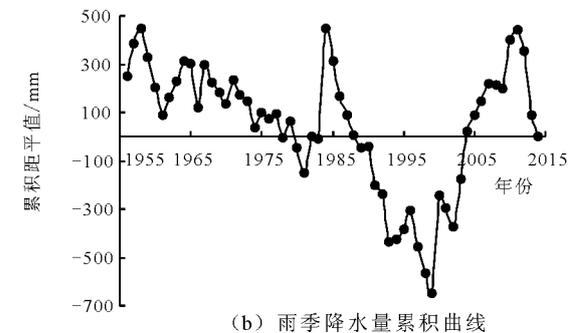
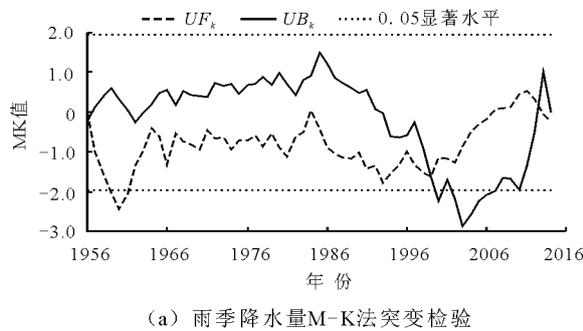


图 5 许昌市雨、旱季降水量 M - K 法突变检验及累积曲线

由图 5(a)可知,许昌市雨季降水量的变化趋势与年降水量的变化趋势相似,整体上表现为不显著的波动下降趋势。其中 UF_k 和 UB_k 曲线于 0.05 显著性水平内在 1956 - 1957 年、1998 - 1999 年和 2012 - 2013 年有交点,结合累积曲线(图 5(b))发现许昌市 1956 - 2014 年雨季降水量变化特征主要表现为:“降 - 升 - 降”,即 1956 - 1999 年呈现波动

下降趋势,1999 - 2011 年呈现波动上升趋势,之后又呈现下降趋势。综合两种分析可知,许昌市雨季降水量可能在 1999 年发生了由少到多的突变。

从图 5(c)可以发现,许昌市旱季降水量的整体变化特征为 1999 年之前表现为波动增加趋势,之后表现为减少趋势,与年降水量或雨季降水量的变化特征正好相反,但变化趋势都不显著。其中 UF_k 和

UB_k 曲线于 0.05 显著性水平内的交点在 1999 - 2004 年、2012 - 2014 年间,综合累积曲线(图 5(d))发现,许昌市旱季降水量的突变点为 1999 年,降水量发生了由多到少的突变。

3.3 降水量周期性变化

3.3.1 年降水量周期 图 6 是由 Morlet 连续复小波分析得到的近 59 年降水量小波系数实部和小波方差图,其中正值区域代表降水量偏丰,负值区域表明降水量偏枯。由图 6 可知,许昌市年降水量存在不同时间尺度的变化周期,年降水量的小波系数实部等值线在 5、14、22 a 这 3 个时间尺度上比较密集,即许昌市年降水量的整体变化过程存在着 3 个显著的周期变化特征。按周期震荡程度由大到小分别对应着 14、22、5 a 的时间尺度,说明许昌市年降水量存在着 14、22、5 a 的第一、第二、第三主周期。其中 14 a 时间尺度的周期变化

对许昌市降水量序列的方差贡献最大,即许昌市年降水量在 1956 - 2014 年 59a 时间尺度上存在着 14 a 的强周期。根据 14 a 的强显著主周期特征,在 2014 年处于降水负相位和正相位交界处,且将进入正相位区域,可以预测许昌市在 2014 年之后会进入降水相对偏丰的时期。

据河南省水利网发布的 2015 年和 2016 年的水资源公报显示,许昌市 2015 年和 2016 年的降水量较 2014 年分别增加了 22.88%、17.64%,这两年的降水情况与小波分析结果一致,也验证了 Morlet 连续复小波分析用于该地区降水周期性变化的研究是合理的。

3.3.2 雨/旱季降水量周期 图 7 给出了许昌市雨季、旱季降水量小波系数实部和小波方差,可以发现许昌市雨季、旱季降水量的周期性变化均存在着多个时间尺度。

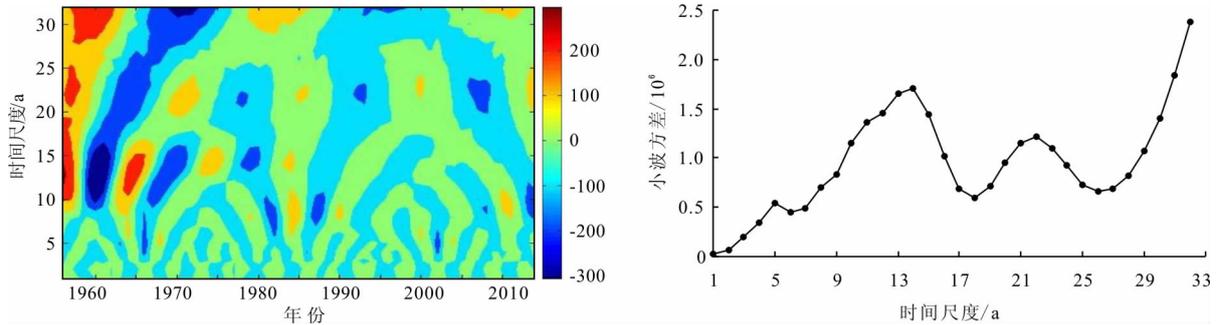


图 6 许昌市年降水量小波系数实部和小波方差图

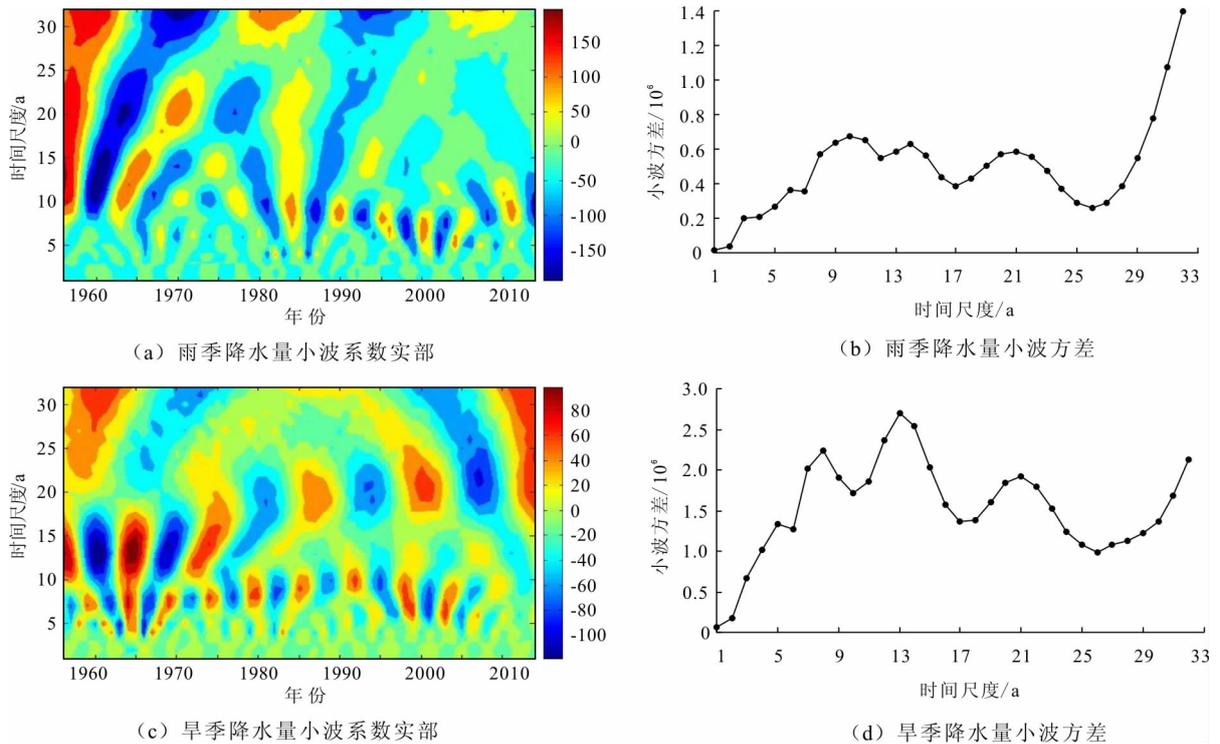


图 7 许昌市雨/旱季降水量小波系数实部和小波方差图

从图 7(a)、7(b) 可以得出,雨季降水量的变化周期在中大时间尺度上与全年降水量的相似,存在着 14、21 a 时间尺度的变化周期,另外雨季降水量还存在着 10a 时间尺度的强显著变化周期。结合小波方差值来看,10 a 为第一主周期,14 和 21 a 年分别为第二、第三主周期。从 10 和 14 a 时间尺度看,许昌市雨季降水量小波实部图在 2014 年均处于负相位即将闭合状态,由此可以判断许昌市雨季降水量也将会很快进入降水相对偏丰时期。

从图 7(c)、7(d) 可以得出,许昌市 1956 - 2014 年旱季降水量的变化周期同样主要存在着三个明显的时间尺度,按周期震荡程度由大到小排列分别为 13、8、21 a 时间尺度,即 13 a 时间尺度为第一强显著主周期,8、21 a 时间尺度分别为第二、第三主周期。从 13 a 第一主周期和 8 a 第二主周期时间尺度来看,许昌市旱季降水量小波实部图在 2014 年均处于负相位闭合、正相位即将开始状态,以此推断许昌市旱季降水量在 2014 年之后会迎来降水相对偏丰的时期。

4 讨 论

研究表明,许昌市近 59 年的降水量呈现出不显著减少趋势,与豫中区域降水呈现减少趋势^[12]的研究结果相吻合,但与苏丰敏等^[9]认为许昌市降水量整体上呈现增多趋势的结论不一致,可能是由于降水时间序列长度不一导致的。许昌市近 59 年来年降水量的整体减少趋势为 8.7 mm/10a,但只对许昌市近 10 年来降水量进行线性回归发现,降水量减少速率高达 281.5 mm/10a,远远大于许昌市多年平均减少速率,尤其是在 2013 年,更是遭遇了 60 年一遇的严重旱灾,将研究时间序列扩展到近些年难免会出现与前人研究结果不一致的现象,但将会增强研究结果的可信度和研究成果的实用性。通过对许昌市降水演变特征的研究,可为该地区防洪抗旱和水生态文明建设提供一定的科学依据。

5 结 论

本文开展了许昌市不同时间尺度的降水量变化趋势、突变情况及周期性变化规律的研究,分析了近 59 年来的降水演变特征,得到以下结论:

(1) 许昌市近 59 年年降水量、雨/旱季降水量分别以 8.7、1.6、7.3 mm/10a 的速率减少。采用 M - K 法的检验结果与线性回归法的结果一致,年降

水量、雨/旱季降水量的 M - K 值分别为 -0.76、-0.24、-0.73,减少趋势都不显著。

(2) 许昌市多年平均年降水量、雨/旱季降水量在空间上均呈现出自东北往西南方向递增的分布格局;其中,多年平均年降水量、雨/旱季降水量的高值区都主要分布在襄城县、禹州市西南部山地以及鄢陵县南部地区,而低值区则主要分布在禹州市北部和长葛市北部地区。

(3) 通过 M - K 法结合累计距平联合检验发现许昌市年降水量在 1964 年发生了由多到少的突变,雨季降水量在 1999 年发生了由少到多的突变,旱季降水量在 1999 年发生了由多到少的突变。

(4) 许昌市降水量存在着多时间尺度的周期变化特征,年降水量存在着 14、22、5 a 的第一、第二、第三主周期变化;雨季降水量存在着 10、14、21 a 的第一、第二、第三主周期变化,旱季降水量存在着 13、8、21 a 的第一、第二、第三主周期变化。根据主周期判断,年、雨季、旱季降水量将会很快迎来降水偏丰时期。

参考文献:

- [1] 李峰平,章光新,董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J]. 地理科学,2013,33(4):457 - 464.
- [2] 董磊华,熊立华,于坤霞,等. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J]. 水科学进展,2012,23(2):278 - 285.
- [3] 王国庆,张建云,章四龙. 全球气候变化对中国淡水资源及其脆弱性影响研究综述[J]. 水资源与水工程学报,2005,16(2):7 - 10 + 15.
- [4] STOCKER T F, DAHE Q, PLATTNER G K. Climate change 2013: The Physical Science Basis[J]. Contribution of Working,2013,43(22):866 - 871.
- [5] 曾小凡,叶磊,翟建青,等. 1961 - 2010 年金沙江流域降水时空演变特征[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(3):402 - 407.
- [6] WANG Shuai, LEI Xiaohui, ZHANG Feng. Analysis on variation characteristics of precipitation time series in Weihe River Basin during the Past 55 Years[J]. Advanced Materials Research,2013,684:246 - 252.
- [7] 陈阿娇,贺新光,秦建新,等. 长江流域近 51a 来日降水时空变异的多尺度特征[J]. 长江流域资源与环境,2016,25(5):794 - 803.
- [8] 曹永强,张亮亮,王学风,等. 近 50 年辽宁省气温及降水量变化趋势与突变特征分析[J]. 水电能源科学,2016,34(1):6 - 9 + 39.

(下转第 72 页)

- [5] WINTER T C. Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems [J]. Hydrogeology Journal, 1999, 7(1): 28-45.
- [6] 韩菲, 陈永灿, 刘昭伟. 湖泊及水库富营养化模型研究综述[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 785-791.
- [7] 谭界雄, 位敏. 我国水库大坝病害特点及除险加固技术概述[J]. 中国水利, 2010(18): 17-20.
- [8] 王旭东. 水库工程常见病害及防治措施[J]. 科技创新与应用, 2018(18): 113-114.
- [9] 刁延峰. 平原型水库工程地质问题浅议[J]. 陕西水利, 2017(3): 61-63.
- [10] 崔宇龙, 黄涛, 彭道平, 等. 川西高原某水库坝址区渗流场模拟及渗漏量计算[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(5): 51-54.
- [11] 束龙仓, 李伟. 北塘水库库底地层渗透系数的随机特性分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(2): 216-220.
- [12] 李鹏, 焦振华. 平原型水库浸没预测方法探讨——以陕西省斗门水库为例[J]. 资源环境与工程, 2015, 29(5): 661-665.
- [13] 张人权. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 2011.
- [14] 李伟. 北塘水库对地下水的渗漏补给特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [15] 国家质量技术监督局, 中华人民共和国建设部. GB/T 50123-1999; 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [16] 吉青克. 大孔隙材料渗透系数的室内测定[J]. 公路交通科技, 2002, 19(2): 31-34.
- [17] 李扭串. 三泉水库库区渗漏模式及渗漏强度问题研究[J]. 水利建设与管理, 2017, 37(8): 59-63.
- [18] 张晗. 西安曲江南湖蓄水对地下水动力场的影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [19] 宋扬. 灞河橡胶坝库区沉积物渗透系数空间变异及河水-地下水交互作用研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [20] 胡顺军, 宋郁东, 田长彦, 等. 潜水埋深为零时塔里木盆地不同土质潜水蒸发与水面蒸发关系分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(S1): 80-83.
- [21] 周维博, 宋扬, 李慧, 等. 大西安城市建设引起的水循环变化规律研究[R]. 西安: 长安大学, 2016.
- [22] 王碧琦, 王锦峰, 陈莉, 等. 陕西省斗门水库工程可行性研究报告[R]. 西安: 水利部西安水土保持生态环境规划设计院, 陕西省水利电力勘测设计研究院, 2017.
- [23] 李鹏, 李之随, 刁延峰, 等. 陕西省斗门水库地质勘察报告(起步区试验段)[R]. 咸阳: 陕西省水利电力勘测设计研究院, 2014.

(上接第65页)

- [9] 苏丰敏, 李文峰, 王军, 等. 许昌市降水资源及变化分析研究[J]. 中国农村小康科技, 2011(2): 20-23.
- [10] 李谢辉, 王磊. 河南省历史水旱灾害危险性分析[J]. 资源科学, 2012, 34(8): 1526-1532.
- [11] 周念清, 夏学敏, 朱勍, 等. 许昌市水资源多模式联合调度与合理配置[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 7-13.
- [12] 顾万龙, 王记芳, 竹磊磊. 1956-2007年河南省降水和水资源变化及评估[J]. 气候变化研究进展, 2010, 06(4): 277-283.
- [13] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术: 第2版[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [14] 丁楠, 俞芳琴, 刘俊, 等. 1961-2011年深圳市降水变化趋势分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5): 61-64.
- [15] 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.
- [16] 李斌, 解建仓, 胡彦华, 等. 近50年陕南地区降水时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(1): 14-19+25.
- [17] 何庆龙, 周维博, 夏伟, 等. 延安市近60年降水时空特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 31-37.
- [18] 张应华, 宋献方. 水文气象序列趋势分析与变异诊断的方法及其对比[J]. 干旱区地理, 2015, 38(4): 652-665.
- [19] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 等. 1961-2005年东北地区气温和降水变化趋势[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 519-531.
- [20] 李森, 夏军, 陈社明, 等. 北京地区近300年降水变化的小波分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(6): 1001-1011.
- [21] 徐建新, 陈学凯, 黄鑫, 等. 贵州省近50年降水量时空分布及变化特征[J]. 水电能源科学, 2015, 33(2): 10-14.
- [22] 王晓莹, 杨丹, 邵银龙. 南京市近60年气候变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4): 119-124.
- [23] 汤国安, 杨昕. ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.