

1952—2017 年出山店水库上游降水时空变化

甘容^{1,2}, 李丹丹^{1,2}, 杨峰³, 左其亭^{1,2}

(1. 郑州大学 水利科学与工程学院, 郑州 450001;

2. 河南省地下水污染防治与修复重点实验室, 郑州 450001; 3. 河南省出山店水库建设管理局, 河南 信阳 464043)

摘要:为了探究出山店水库上游流域近 65 a 来降水的时空变化特征, 基于出山店水库上游流域 13 个雨量站 1952—2017 年的逐日降水资料, 运用气候倾向率法、Mann-Kendall 趋势检验、Morlet 小波分析和反距离权重 IDW 插值法等多种方法, 研究了降水的年际变化、周期性与空间分布特征。结果表明: (1) 流域 1952—2017 年多年平均降水量为 1 028.3 mm, 年降水量的气候倾向率为 $-20 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p < 0.05$), 呈显著下降趋势, 从季节上看, 春、夏、冬降水随时间变化呈现减少趋势, 秋季的降水呈现增加趋势; (2) 年降水量呈现南高北低的空间分布, 而年降水量的气候倾向率的变化趋势则与之相反; (3) 流域降水量变化呈现 20 a 左右的第一主周期, 同时流域的周期性变化也存在一定的空间分布特征。近 65 a 来, 出山店水库上游年降水量变化趋势为先增加后减少, 在整个时间域上有显著的下降趋势, 并呈现 20 a 左右的周期性变化。

关键词:降水量; 时空变化; Mann-Kendall; Morlet 小波; 反距离权重(IDW)插值法; 出山店水库上游

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)04-0150-09

Spatiotemporal Variation of Precipitation in Upper Upstream of Chushandian Reservoir from 1952 to 2017

GAN Rong^{1,2}, LI Dandan^{1,2}, YANG Feng³, ZUO Qiting^{1,2}

(1. School of Water Conservancy Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001,

China; 2. Henan Key Laboratory of Groundwater Pollution Prevention and Remediation, Zhengzhou 450001,

China; 3. Administration of Reservoir Construction of Chushandian Reservoir, Xinyang, Henan 464043, China)

Abstract: In order to investigate the spatial and temporal characteristics of precipitation in the upper watershed of the Chushandian Reservoir over the past 65 years, based on the daily precipitation data of 13 rainfall stations in the upper upstream of Chushandian reservoir from 1952 to 2017, the interannual variation, periodicity and spatial distribution characteristics of precipitation were studied by using climate tendency rate method, Mann Kendall trend test, Morlet wavelet analysis and inverse distance weight (IDW) interpolation method. The results show that: (1) from 1952 to 2017, the annual average precipitation was 1 028.3 mm, and the climate tendency rate of annual precipitation was $-20 \text{ mm}/\text{decade}$ ($p < 0.05$), which showed a significant downward trend; from the seasonal point of view, the precipitation in spring, summer and winter showed a decreasing trend with time, and the precipitation in autumn showed an increasing trend; (2) the annual precipitation was higher in the south and lower in the north, while the trend of precipitation tendency rate was opposite; (3) the change of precipitation in the basin presented the first main cycle of about 20 years, and the periodic change of the basin also had some spatial distribution characteristics. In the past 65 years, the precipitation in the upstream of Chushandian reservoir showed a significant downward trend, and the difference of time and space was obvious, the trend of annual precipitation in upstream of Chushandian Reservoir had been increasing and then decreasing, with a significant downward trend throughout the time domain, and annual precipitation showed a cyclical change of about 20 years.

收稿日期: 2021-05-27

修回日期: 2021-07-05

资助项目: 河南省水利科技攻关计划项目(GG202026); 国家自然科学基金(51509222, U1803241)

第一作者: 甘容(1983—), 女, 湖北随州人, 副教授, 博士, 主要从事水文模型及气候变化研究。E-mail: ganrong168@163.com

Keywords: precipitation; spatiotemporal variation; Mann-Kendall; Morlet wavelet; inverse distance weighted (IDW) interpolation; upstream of Chushandian Reservoir

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第 4, 5, 6 次评估报告均指出全球气候变化环境下, 陆面降水模式发生重大改变, 给生态环境、人类生活、社会发展带来巨大的挑战^[1-3]。降水量比气温具有更大的空间异质性, 不仅对地表河流的径流量有直接影响, 对农业发展和粮食安全也至关重要^[4]。河南省是我国粮食主产地, 而淮河发源于河南省桐柏山区, 是河南省内流域面积占比最多的河流, 因此近年来专家和学者针对河南省以及淮河流域的降水变化特征进行了广泛研究。杨军勇等^[5]对河南省暖季(5—9 月)小时极端降水时空分布特征进行了统计分析, 分析了极端降水强度、频次、贡献率、日变化特征以及不同下垫面极端降水特征的差异; 王新伟等^[6]研究了河南省近 40 a 的夏季降雨, 结果表明河南省夏季降水随时间呈上升趋势; 赵国永等^[7]基于 1961—2013 年河南省的日降水数据, 分析了极端降水事件的时空变化特征; 张志高等^[8]研究了近 59 a 河南省汛期降水时空变化特征; 赵路伟等^[9]则分析了河南省近 54 a 来降水量的变化趋势, 研究结果表明降水量在研究期内呈现波动中减少的趋势, 其中河南省中东部降水呈现增加趋势, 西北和豫南地区降水明显减少; 王景才等^[10]分析了 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; 刘永婷等^[11]研究得出淮河流域上游河段降水量呈减少趋势, 递减率为 26.3 mm/10 a, 降水量的年际变化周期在 2 a 左右; 王怀军等^[12]基于淮河流域 1960—2014 年水文序列的日数据, 重点探索了极端气温、降水指数的时空变化规律。

河南省内淮河流域面积 8.61 万 km², 占全省总面积的 52.9%, 淮河虽然给沿淮地区带来了丰富的水电能源, 近年来治淮工作已取得显著效果, 但沿淮地区生活的人民群众仍受到水旱灾害的严重威胁。出山店水库对于控制上游山区洪水、提高沿淮地区防洪标准、促进当地经济发展, 具有极其重要的作用。目前针对出山店水库上游流域的研究相对匮乏, 因此本文运用多种方法研究出山店水库上游流域降水量的时空变化特征, 研究结果有利于相关部门科学地制定开发水资源、统筹蓄水灌溉的相关政策, 进而实现综合效益目标最大化。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

出山店水库坝址位于淮河干流的信阳市浉河区游

河乡出山店村, 地理坐标为 32°14′39″N, 113°57′36″E。坝址以上至淮河发源地河道长 100 km, 水库控制流域面积 2 900 km², 总库容 12.51 亿 m³。流域形状略呈东西向的椭圆形, 东西长约 70 km, 平均宽度 22.3 km, 形状系数为 0.592, 海拔高程为 80~1 000 m(图 1)。出山店水库是国家大力扶持建设的大(I)型水库, 主要任务是防洪, 兼顾灌溉、供水、发电、旅游等多种功能。水库上游大部分地区松林茂盛, 植被良好, 有少数丘岗地区草林稀疏。土地利用率为 22%, 共有耕地约 640 m², 多种植水稻和小麦, 其中水稻田约占 70%。植树育林及原有林区约占流域面积 50%。土壤覆盖, 丘岗坡地上多为红褐色粉质黏土, 沿干支流两岸台地多为重壤土和沙壤土。

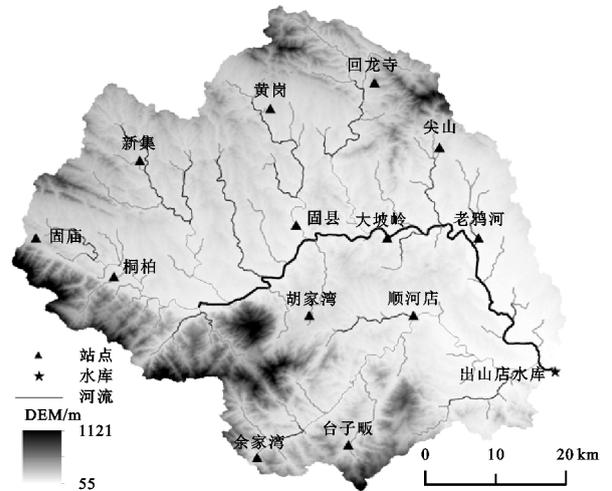


图 1 出山店水库流域高程及站点位置

1.2 研究方法

选取出山店水库上游 13 个雨量站 1952—2017 年的逐日降水资料为基础数据, 分析其降水量的时空分布与变化特征, 站点位置见图 1。

1.2.1 气候倾向率法 一般用线性方程来表征气象要素的趋势变化, 即 $y(t) = a + b \cdot t (t = 1, 2, \dots, n)$, 在线性回归分析中, 时间序列趋势的变化常用倾向率 ($10b$) 表示^[13-14]。倾向率为正表示水文序列随时间变化呈现上升趋势, 反之表示下降。

气候倾向率法考察降水序列的变化趋势时, 趋势的显著性可通过 F 检验判断^[15]。给定显著性水平 α , F 检验的 p 值 $< \alpha$, 则表示通过了相应信度水平的显著性检验。

1.2.2 M-K 检验法 Mann-Kendall 统计检验法的样本数据不需要遵从一定的分布, 适用于非正态分布的数据, 能够剔除少数异常值^[16]。因此, Mann-Kendall

统计检验法是气象学、水文学、气候学中比较常用的时间序列趋势检验方法^[17-19]。Mann-Kendall 检验的公式为:

$$Q = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (1)$$

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

$$Z = \begin{cases} \frac{Q-1}{\sqrt{\text{var}(Q)}} & (Q > 0) \\ 0 & (Q = 0) \\ \frac{Q+1}{\sqrt{\text{var}(Q)}} & (Q < 0) \end{cases} \quad (3)$$

式中: Q 为检验统计量; Z 为标准化后的检验统计量; x_i, x_j 为降水量时间序列数据 (mm); n 为样本数, 当 $n > 8$ 时, Q 近似为正态分布, 其均值和方差计算公式为:

$$E(Q) = 0 \quad (4)$$

$$\text{var}(Q) = \frac{n(n-1)(2n-5)}{18} \quad (5)$$

标准化后 Z 为标准正态分布, 趋势检验中, 给定 α 置信水平, 如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$ 则拒绝原假设, 即给定的置信水平 $\alpha = 0.05$, $|Z| \geq 1.96$ 时, 表示通过了信度 95% 的显著性检验, $Z > 0$ 时是显著上升趋势, 反之是显著下降趋势。

1.2.3 累积距平法 累积距平法可以更加直观准确地判断降水序列的年际变化, 在水文气候分析中应用广泛^[20], 是一种常用的、由曲线直观判断变化缺失的方法。对于降水序列 x , 某时刻 t 的累积距平表示为:

$$\hat{x}_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \quad (t=1, 2, 3, \dots, n) \quad (6)$$

式中: \hat{x}_t 为累积距平值 (mm); x_i 为 i 时刻的降水量 (mm); \bar{x} 为降水序列平均值 (mm)。

1.2.4 极值比和变异系数 极值比和变异系数用来表征年降水量的年际变化。年际极值比是指降水量变化的绝对值比例^[21], 即年降水极大值/年降水极小值。变异系数为样本数据的标准偏差和平均值之比, 即 $C_v = (\text{SD}/\text{Mean}) \times 100\%$, 式中: SD 为标准偏差; Mean 为平均值。

1.2.5 Morlet 小波分析法 与 Fourier 变换相比, 小波变换是时间(空间)频率的局部化分析, 利用伸缩平移运算实现信号(函数)的多尺度细化, 根据时频信号分析的要求, 小波分析可以自动调整, 聚焦到信号的任意细节。多用于研究复杂的水文时间序列, 该方法的优势在于借助时频局部化功能剖析出时间序列内部各种周期的强弱和分布情况^[22-24]。

1.2.6 反距离权重 (IDW) 插值法 反距离权重 (IDW) 插值使用采样点的线性权重组合来确定像元值^[25]。权重是基于距离的函数, 一般公式为:

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i) \quad (7)$$

$$\lambda_i = \frac{d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p}} \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (9)$$

式中: $\hat{Z}(S_0)$ 为 S_0 的插值结果; $Z(S_i)$ 为在 S_i 处获得的监测值; N 为参与插值的周围采样点的数量; λ_i 为各采样点的权重, 根据此权重进行插值计算; d_{i0} 为插值点与已知采样点 S_i 的距离。式(9)表明各采样点对插值结果作用的权重大小之和为 1。

2 结果与分析

2.1 降水时间变化分析

2.1.1 年际变化特征 结合多种方法分析了流域内 13 个雨量站的年降水量变化趋势, 结果见表 1。有 3 个站点(回龙寺、尖山、老鸦河)表现为不显著增加趋势, 其余站点均呈下降趋势, 其中顺河店、大坡岭、余家湾的下降趋势显著(通过了 90% 的显著水平)。呈上升趋势的站点降水量的气候倾向率变化范围为 0.18(回龙寺)~28.69(老鸦河) mm/10 a, 呈下降趋势的站点的气候倾向率变化范围为 -3.18(固县)~-42.85(余家湾) mm/10 a。年均降水量最高达到 1 228.69 mm, 最低为 842.59 mm, 各站点极值比在 2.58~3.92 波动, 变异系数变化范围为 21.9%~26.7%, 说明在研究期内研究区域的降水量年际变化剧烈。从 13 个站点的降水量极值分布可以看出, 降水量极小值集中在 20 世纪 90 年代和 21 世纪初, 有 7 个站点的降水量极小值都出现在 2001 年, 对应着枯水年; 降水量极大值的分布相对分散, 在 1956 年、2000 年分别有 3 个站点出现降水量极大值, 而丰水年对应着 1956 年。

2.1.2 年内分布 由各季节降水量占全年降水量百分比统计得出, 降水量年内分布不均, 夏季(6—8 月)降水量占全年降水量的 48.54%; 春、秋季占比分别为 22.73%, 21.24%; 冬季降水量仅占全年降水量的 7.85%。图 2 为出山店水库上游近 65 a 降水量的年内分布图, 流域多年平均降水量为 1 028.3 mm。研究发现年内降水主要集中在 5—9 月, 各站点降水最多的月份均出现在 7 月, 汛期(6—9 月)均值为 614.4 mm, 占年降水量的比重约为 59.8%。流域降水分布不均匀主要是因为研究区域地处亚热带向暖温带过渡区, 季风气候明显。

表 1 各站点气候倾向率及降水量变化

| 站点 | 气候倾向率/ (mm/10 a) | 年均降水量/ mm | 极小值 (出现年份)/mm | 极大值 (出现年份)/mm | 极值比 | 变异系数/ % |
|-----|---------------------|--------------|------------------|------------------|------|------------|
| 老鸦河 | 28.69 | 923.22 | 385.6(2001) | 1510.3(2000) | 3.92 | 26.7 |
| 尖山 | 1.07 | 842.59 | 421.1(2001) | 1222.9(2005) | 2.90 | 24.3 |
| 回龙寺 | 0.18 | 949.07 | 579.8(1982) | 1575.3(1956) | 2.71 | 25.5 |
| 固县 | -3.18 | 963.03 | 571.9(1988) | 1974.3(2000) | 3.45 | 24.3 |
| 胡家湾 | -5.04 | 1228.69 | 512.8(1997) | 1911.9(1985) | 3.73 | 23.7 |
| 桐柏 | -10.99 | 1147.45 | 635.8(1966) | 2014.3(1989) | 3.17 | 25.1 |
| 固庙 | -14.01 | 1125.95 | 676(2001) | 1746.8(1989) | 2.58 | 25.7 |
| 黄岗 | -14.39 | 884.98 | 523.8(2001) | 1454.5(1956) | 2.78 | 23.8 |
| 新集 | -16.40 | 1013.13 | 537.9(1966) | 1511.5(2000) | 2.81 | 24.9 |
| 顺河店 | -25.72* | 1077.72 | 485.2(1998) | 1805(1997) | 3.72 | 25.9 |
| 大坡岭 | -28.58* | 992.98 | 451.9(2001) | 1643.5(1956) | 3.64 | 25.4 |
| 台子畷 | -38.32 | 1156.15 | 487.5(2001) | 1715.3(1967) | 3.52 | 21.9 |
| 余家湾 | -42.85* | 1074.46 | 520.6(2001) | 1547.5(1968) | 2.97 | 23.1 |

注: * 表示通过了 90% 置信水平的显著性检验。

对 13 个站点的季节降水量分析得出,夏季、秋季、冬季的极小值都对应着 1999 年,分别有 6,9,6 个站点降水量极小值出现在 1999 年;春季有 9 个站点的降水量极小值出现在 2001 年,可以确定 1999 年、2001 年均均为枯水年。季节的极大值分布相对分散,春季无明显丰水年;夏季降水量极大值出现在 1956 年;冬季的极大值集中在 1953 年、1988 年;秋季降水的丰水年为 2017 年;结合上文丰水年为 1956 年,侧面反映了秋季、冬季对年降水影响较小。

期的降水变化趋势相似。(3) 春季有 3 个站点呈现上升趋势,其余站点均呈不显著下降趋势。(4) 冬季气候倾向率变化幅度最小,2 个站点呈不显著上升趋势;大坡岭、胡家湾下降趋势显著(分别通过了 90%, 95% 置信水平的显著性检验),其他站点均为不显著下降趋势。(5) 秋季有 10 个站点呈现上升趋势,其中回龙寺倾向率达 16.1 mm/10 a(超过了 95% 的置信水平)。对全流域来说,春季、夏季、冬季降水随时间有减少趋势,秋季降水有增加趋势,流域年降水显著下降的趋势是春季、夏季、冬季降水量变化共同作用的结果。

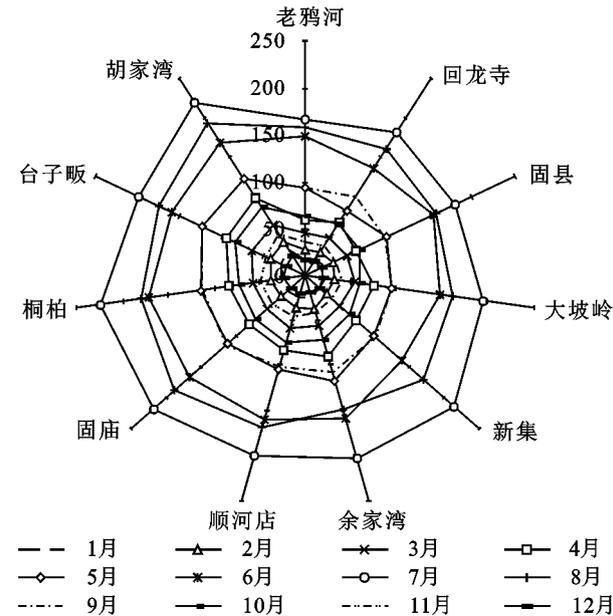


图 2 出山店水库上游降水年内分布

2.1.3 季节变化特征 由表 2 可知:(1) 汛期降水量 12 个站点(共 13 个站点)都呈下降趋势,余家湾汛期倾向率最大为 -31.31 mm/10 a(通过了 90% 置信水平的显著性检验)。(2) 夏季 6—8 月为主汛期,与汛

表 2 出山的水库上游流域气候倾向率

| 站点 | mm/10 a | | | | |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 春 | 夏 | 秋 | 冬 | 汛期 |
| 大坡岭 | -8.68 | -19.61 | 3.75 | -4.19* | -18.21 |
| 固庙 | -7.80 | -10.18 | 3.92 | -4.24 | -13.15 |
| 固县 | -2.12 | -9.36 | 3.23 | -0.54 | -10.62 |
| 胡家湾 | -9.90 | -12.37 | 14.88 | -7.30** | -6.39 |
| 黄岗 | -4.53 | -19.90* | 8.15 | -1.20 | -20.14 |
| 回龙寺 | 5.47** | -20.58 | 16.10** | -2.06 | -12.06 |
| 尖山 | 2.61 | -5.04 | 3.62 | 0.70 | -6.20 |
| 老鸦河 | 3.03 | 20.93 | 4.15 | 1.78 | 18.09 |
| 顺河店 | -9.21 | -20.85 | -3.13 | -1.26 | -23.57 |
| 台子畷 | -12.99 | -7.67 | -15.38 | -1.66 | -19.80 |
| 桐柏 | -6.14 | -8.83 | 6.97 | -3.18 | -4.37 |
| 新集 | -3.50 | -15.92 | 7.75 | -4.38 | -11.67 |
| 余家湾 | -13.07 | -19.26 | -14.92 | -0.63 | -31.31* |

注: * 表示通过了 90% 置信水平的显著性检验; ** 表示通过了 95% 置信水平的显著性检验。

2.2 降水突变分析

对 13 个站点进行 M-K 突变检验,结合累积距平图可以更加直观准确地判断降水量年际变化及突变信息。研究结果表明:老鸦河发生了多次降水量突变;尖山、新集分别在 1984 年、1980 年发生了降水量下降的突变;中部地区的胡家湾、大坡岭、顺河店、黄冈的突变年份分别为 1965 年、1971 年、1975 年、1978

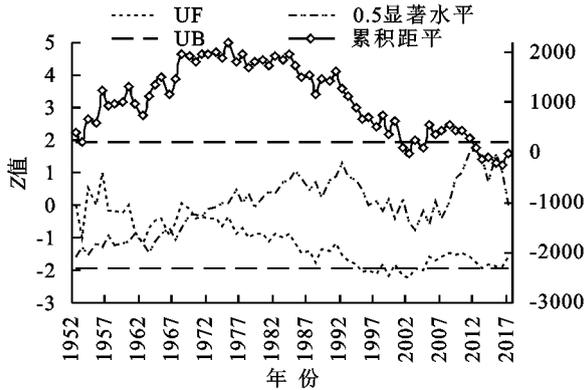
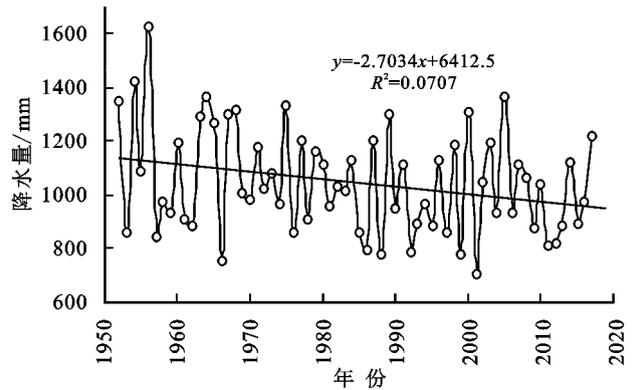


图 3 研究区年平均降水量 M-K 突变检验与累积距平值、降水量趋势变化

通过分析不同季节降水量变化趋势可以发现,虽然春、夏、冬 3 个季节的降水量变化趋势均呈现下降趋势,但是年际波动变化略有不同。春季在 1976 年之前呈现上升趋势,1977 年发生了降水量下降的突变,随后降水量表现为逐年减少趋势。夏季降水量 20 世纪 60 年代之前呈现上升趋势,1955 年、1956 年超过了 0.05 显著水平,上升趋势显著,60 年代之后年际间变化较为平缓,没有出现显著的变化趋势,整体呈平稳下降趋势。由于秋季降水量较少,虽然 1964—1988 年表现出显著的持续增加趋势,但对年降水量变化影响较小。冬季降水从 1956 年开始逐年减少,在 1962 年突破显著性水平,下降趋势显著,随后进入下降趋势波动变化阶段,整体呈下降趋势。年降水量的 M-K 检验图与汛期变化趋势相同,由此可见,汛期降水对全年降水的贡献较大。

图 4 给出了春季(顺河店)、夏季(黄冈)、秋季(胡家湾)、冬季(桐柏)代表站点的 M-K 检验和累积距平图。13 个站点的年、季节 M-K 突变检验结果显示,单个站点的不同时间尺度突变相关性不大,因此选取一个时间尺度下的多个站点分析其变化趋势的异同性。(1) 春季 M-K 突变结果显示,降水量变化主要有两种趋势:胡家湾、大坡岭、顺河店、黄冈、台子畈、桐柏、余家湾的大致变化趋势均为先增加再下降,突变年份(下降)发生在研究期中期之前;其他站点均在波动中下降。(2) 夏季 M-K 突变结果显示,尖山发生了多次突变:1985 年(下降),2003 年(增加),2010 年(下降);老鸦河、台子畈、桐柏变

年,均表现为降水量下降的突变;北部地区的台子畈、余家湾在 20 世纪 60 年代末、21 世纪初均发生了降水量下降的突变。其中余家湾在研究时段内有多次下降突变,气候倾向率达到 $-42.85 \text{ mm}/10 \text{ a}$,回龙寺、固县、固庙无明显突变信息。由图 3 可知,1975 年降水量发生突变,年降水变化趋势为先增加后下降,21 世纪以来下降趋势越发显著。



化趋势较平稳,无明显突变信息;其他站点在研究期初期均发生了降水量下降的突变,随后变化趋势也趋于平稳。(3) 秋季 M-K 突变与春季相似,大坡岭、固庙、胡家湾、黄冈、顺河店、桐柏、新集站点变化趋势均为先增加再下降,降水量增加的突变年份发生在 1960 年之前,降水量下降的突变分布在 1980—2000 年;固县、尖山、老鸦河、台子畈、余家湾均为持续下降趋势,降水量下降的突变年份出现在研究期初期,并在 21 世纪下降趋势显著。(4) 大部分站点的冬季降水变化趋势较平稳,没有明显突变年份;回龙寺、桐柏变化趋势为减少—增加—减少,回龙寺的突变年份是 1964 年(增加),2004 年(减少),桐柏的突变年份分别为 1957 年(减少),1985 年(增加),2007 年(减少);黄冈变化趋势是先增加再减少,在 1978 年发生了降水量下降的突变。

2.3 降水空间分布特征

从图 5 中可以看出:流域年降水量的空间分布基本呈现南高北低的趋势,地区降水分布相对均匀,流域站点间降水量差值最大为 386.1 mm。降水量的气候倾向率的变化趋势与降水量相反,在研究期间南部地区降水呈现减少的趋势,余家湾的降水量的气候倾向率达到 $-42.85 \text{ mm}/10 \text{ a}$ (通过了 90% 的置信水平);中部地区的年降水量也呈现下降趋势,其中大坡岭、顺河店站点下降趋势显著;北部地区的 3 个站点呈现不显著上升趋势。出山店水库上游年际变化较为剧烈,所测 13 个站点中有 8 个站点的降水量的气候倾向率绝对值大于平均值 $13.04 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。从各

站点的变化趋势来看,降水量呈上升趋势的站点集中在流域东北部,中部和西南部的站点呈现下降趋势。

如图 6 所示,春、夏、秋、冬各季节的降水量空间分布与年降水量分布一致,大致呈现南高北低的趋势;春季空间分布与年降水变化高度一致,南部降水多北部降水少,而南部年降水量多的地区近 65 a 来降水量呈现出减少的趋势;夏季降水量呈现西南部高、东北部低的趋势,除老鸦河外,降水量的气候

倾向率在整个流域内都呈现下降趋势;秋季、冬季降水量空间变化高度一致,大致呈现南高北低的趋势,而降水量的气候倾向率变化趋势完全相反;秋季除最南部的余家湾、台子畷呈现下降趋势,其他站点均呈现上升趋势,其中最北部的回龙寺上升趋势显著;冬季除了东北部的尖山、老鸦河呈现上升趋势,其他站点均呈现下降趋势,中部地区的胡家湾站点下降趋势显著。

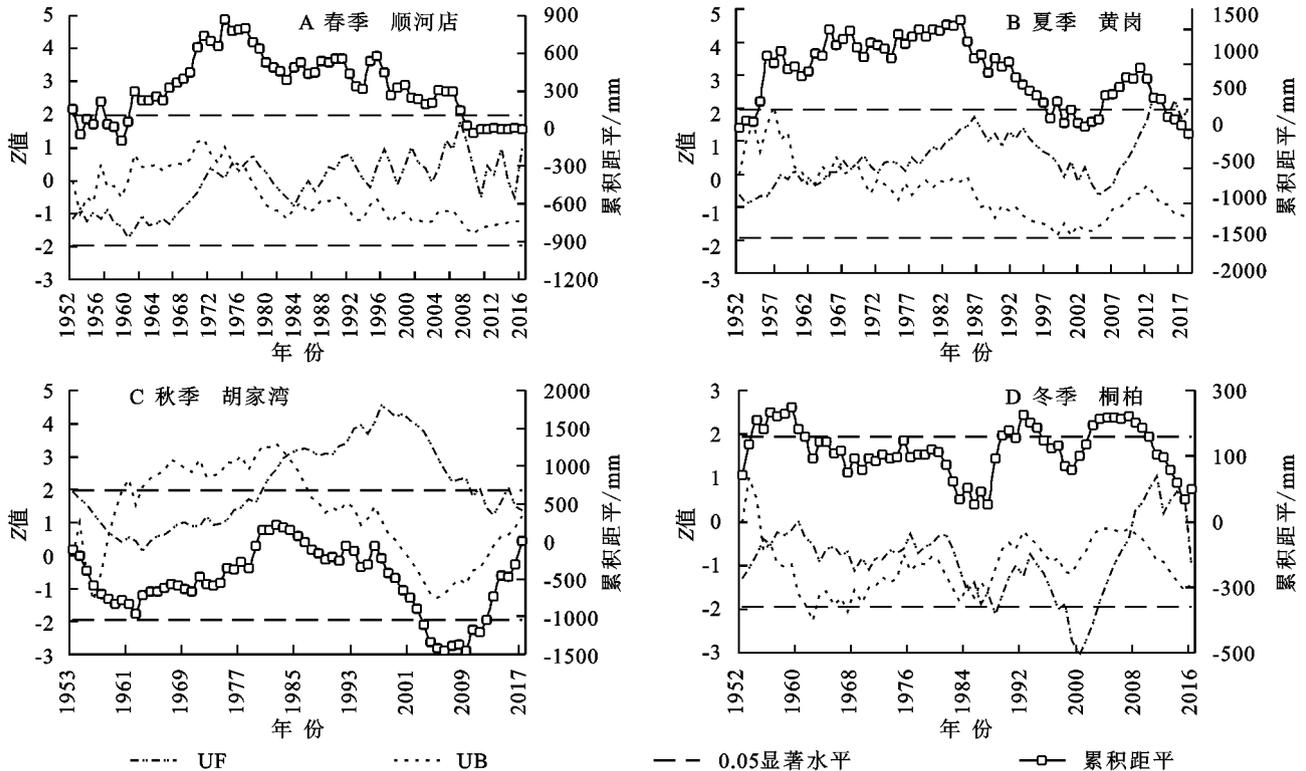


图 4 部分站点的 M-K 突变检验及累积距平

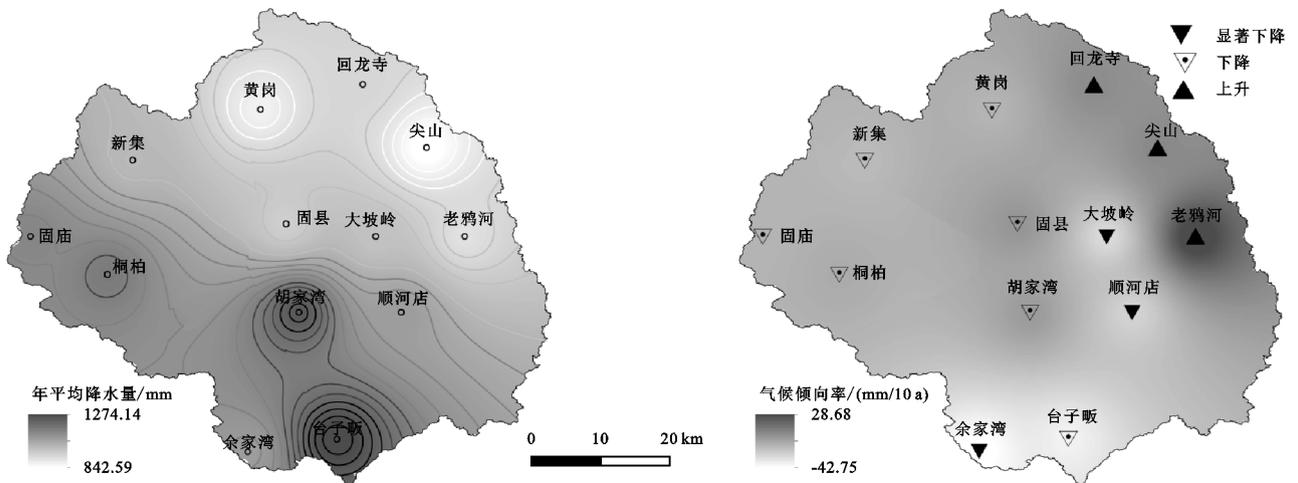


图 5 出山店水库上游降水量及其变化趋势空间分布

2.4 降水周期特征分析

对比分析站点的方差图发现,周期变化也存在一定的空间分布特征,结合年、季节降水量、周期分布特征将研究区划分为中部地区(固县、大坡岭、顺河店、

胡家湾)、西南部地区(新集、桐柏、余家湾、台子畷、固庙)、东北部地区(回龙寺、尖山、老鸦河、黄冈)。

从图 7 出山店水库上游西南部、中部、东北部、全流域站点周期特征分析可以看出:

(1) 西南部地区的桐柏、新集、固庙 3 个站点方差图存在 4 个明显峰值,最大峰值对应的第一主周期均为 30 a,周期震荡最强,时间域上具有枯—丰交替的准 3 次震荡,周期变化在整个分析时段内都较为稳定,具有全域性;桐柏、新集的第二主周期都为 17 a (固庙的第二主周期对应着 14 a),具有全域性,但在震荡次数的差异;第三、第四主周期的时间尺度周

期性均不显著。台子畝、余家湾的小波方差图存在 3 个明显峰值,最大峰值对应的第一主周期均为 19 a,周期震荡最强,时间域上具有枯—丰交替的准 4 次震荡,周期变化在整个分析时段内都较为稳定,具有全域性;台子畝、余家湾的第二主周期和第三主周期能量相近,分别为 12 a,4 a 和 4 a,11 a,具有局部性且时间尺度的周期性不显著。

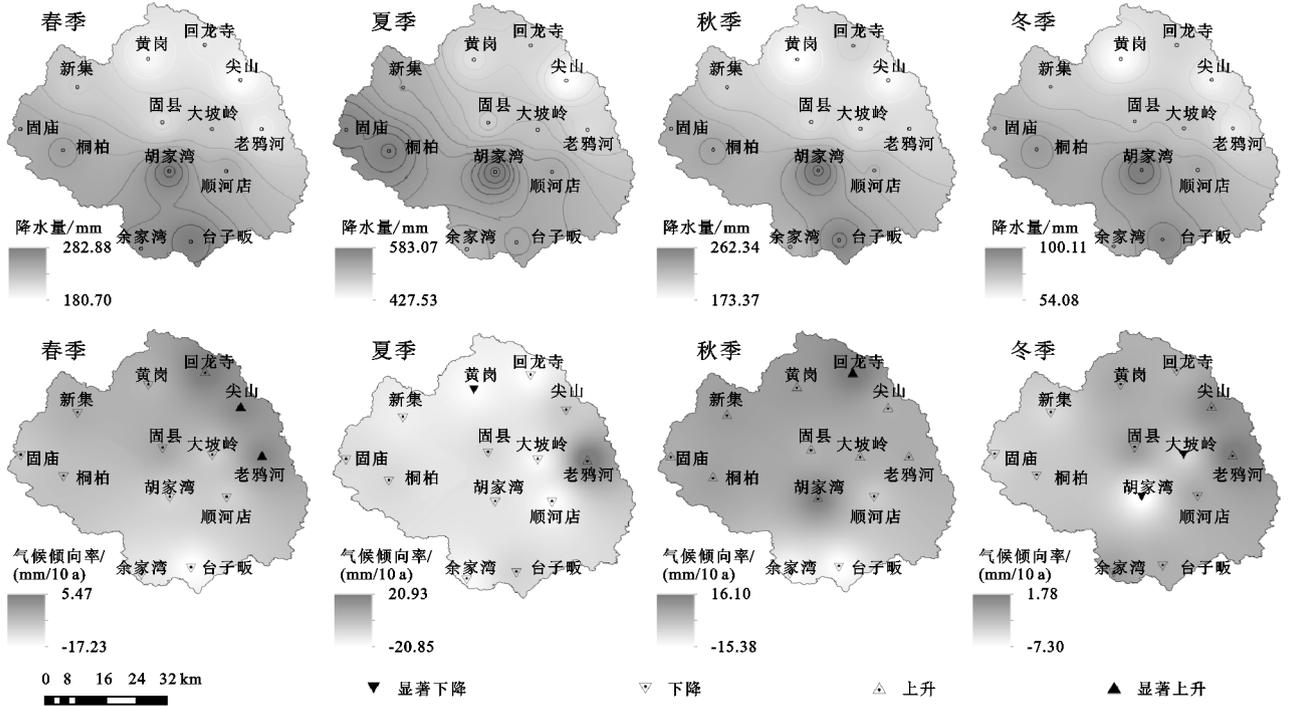


图 6 出山店水库上游四季降水量及季节降水量的气候倾向率空间分布图

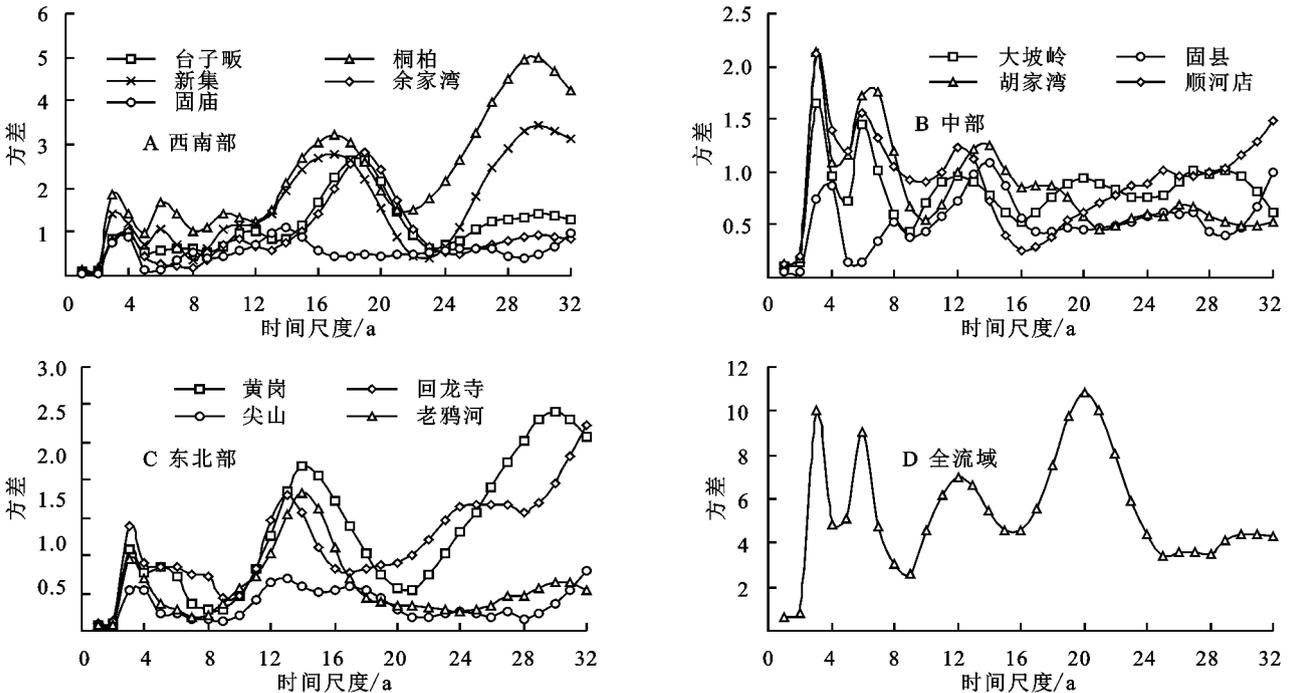


图 7 出山店水库上游西南部、中部、东北部、全流域站点周期特征分析

(2) 中部地区的固县第一主周期为 14 a,时间域上具有枯—丰交替的准 5 次震荡,具有全域性;其他

站点的第一主周期为 3 a,但在整个分析时段内都不具有全域性,主要出现在 20 世纪 70 年代之后;各站

点的其他主周期能量都较弱,时间尺度周期性不显著,在研究时段内也不具有全域性。

(3) 东北部地区的第一主周期应为 13 a 或 14 a,除尖山外,其他站点的周期性显著,时间域上有明确的枯—丰交替震荡表现,在整个分析时段内都较为稳定,具有全域性。其中,黄岗的 30 a 主周期能量最强,周期性最显著,在整个分析时段内都较为稳定。站点其他时间尺度的周期性均不显著、在分析时段内不稳定。

从流域平均年降水量的小波分析图(图 8)得到,流域年降水量 16~25 a 的时间尺度变化明显,中心时间尺度在 20 a,为第一主周期,时间尺度能量最强、周期最显著,在时间域上具有枯—丰交替的准 5 次震荡,周期性较稳定,在整个分析时段内都具有全域性。3 a,6 a 的时间尺度次之,但周期性不稳定,在整个分析时段内都不具有全域性。其余周期表现则较弱。

3 讨论

出山店水库位于信阳市境内,占信阳市面积的 15% 左右,本文对出山店水库上游流域内的 13 个站点 1952—2017 年逐日降水量进行了时空变化分析,对于充分利用洪水资源以及控制淮河上游山区洪水具有极其重要的作用,但是现有的研究文献中缺乏针对出山店水库流域的研究,因此本文采用前人针对信阳市的研究结果与本文的成果进行对比印证,对比结果如下:

(1) 贾军霞等^[26]通过对河南省 17 个气象站 1965—2014 年逐日降水量研究表明:信阳市年平均降水量达到 1 000 mm 以上,与本文的研究结果一致;信阳地区秋季、冬季降水量均呈现增加趋势,增幅最高分别达 12.68,11.80 mm/10 a,本文的研究结果表明秋季呈现增加趋势,而冬季呈现微弱的下降趋势,冬季变化趋势的差异可能与冬季占比年降水量较小、研究时段不同、研究站点不同有关。

(2) 史佳良等^[20]同样分析了河南省 17 个气象站 1965—2014 年的逐日降水资料,得到信阳市降水量达 1 094.21 mm,但气候倾向率达到了 $-13.62 \text{ mm}/10 \text{ a}$,本文研究得出出山店水库上游气候倾向率为 $-20 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p < 0.05$),研究结果整体上较一致。

(3) 韩艳等^[27]选取 1951—2013 年河南省 18 个观测站月观测降水量数据为研究对象,结果表明信阳地区降水量较多,与受东亚夏季风影响的强度大小有关;春季豫南(驻马店、信阳等)降水量减少趋势较显

著,冬季豫南降水量呈微弱下降趋势,与本文研究结果一致。

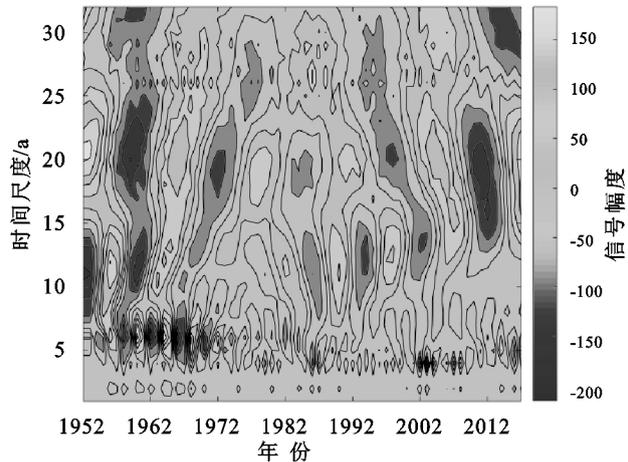


图 8 流域平均年降水量的小波分析

本文针对出山店水库上游流域的日降水量研究,站点较多,时间序列较长,所得结果更贴合研究流域的真实情况,可以为出山店水库的正常运行和科学管理提供理论支撑。但仍存在一些不足之处:流域的高程、经纬度变化范围相对较小,难以分析降水量变化趋势的空间分布与地理因子的关系。

4 结论

(1) 出山店水库上游流域 1952—2017 年多年平均降水量为 1 028.3 mm;汛期(6—9 月)降水均值为 614.4 mm,占年降水值的比重约为 59.8%;春季、夏季、秋季、冬季的平均降水量分别占年降水量的 22.73%,48.54%,21.24%,7.85%;1999 年、2001 年为枯水年、1956 年为丰水年。

(2) 流域地区降水分布存在差异,年降水量有显著的下降趋势,其气候倾向率为 $-20 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p < 0.05$)。13 个站点中,3 个站点呈现不显著上升趋势,集中在流域东北部;中部和西南部的 10 个站点表现为下降趋势。年降水量大致呈现南高北低的趋势,而气候倾向率的变化趋势则与之相反。从季节上看,春、夏、冬降水随时间有减少趋势,秋季降水有增加趋势。季节降水量空间分布与年降水量分布一致,但气候倾向率空间分布差别较大。

(3) 本文采用 M-K 突变检验法和累积距平法实现研究流域 65 a 降水量的突变性分析。年降水量变化趋势为先增加后减小,1975 年是降水量下降的突变,21 世纪以来下降趋势越发显著。春季变化与年降水量变化相似,相比之下春季降水量突变年份滞后了 2 a。夏季降水量 60 年代之前呈现上升趋势,之后

年际间变化较为平缓,无明显突变年份。秋季变化表现出与其他 3 个季节的较大差异,虽然 1964—1988 年表现出显著的持续增加趋势,但对年降水量变化影响较小。冬季降水从 1956 年开始逐年减少,60 年代之后进入下降趋势波动变化阶段。

(4) 由小波分析结果可以得到,流域降水量变化的第一主周期为 20 a 左右,在时间域上具有枯—丰交替的准 5 次震荡;除此之外,也有 3, 6, 12 a 左右的变化周期,周期性表现较弱。流域降水量周期变化也存在一定的空间分布特征,西南地区对应的第一主周期为 30 a,具有枯—丰交替的准 3 次震荡。中部地区第一主周期为 3 a,但在整个分析时段内不具有全域性。东北部地区的第一主周期应为 13 a 或 14 a,周期性显著,在整个分析时段内都较为稳定,具有全域性。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis, the Summary for Policymakers of the Working Group I Contribute to the Fifth Assessment Report[R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 鲁向晖,张海娜,胡羊羊.赣江流域 1966—2015 年降水量多尺度时空变化特征分析[J].水土保持研究, 2021, 28(2):168-175.
- [3] 赵德招,刘杰,张俊勇,等.长江口河势近 15 年变化特征及其对河口治理的启示[J].长江科学院院报, 2014, 31(7):1-6, 20.
- [4] Gao R, Li F, Wang X, et al. Spatiotemporal variations in precipitation across the Chinese Mongolian plateau over the past half century[J]. Atmospheric Research, 2017, 193:204-215.
- [5] 杨军勇,苏爱芳.河南省暖季小时极端降水时空分布特征[J].暴雨灾害, 2021, 40(2):153-159.
- [6] 王新伟,平凡,姬兴杰,等.近 40 a 河南省夏季降水变化特征分析[J].暴雨灾害, 2018, 37(3):219-229.
- [7] 赵国永,韩艳,刘明华,等.1961—2013 年河南省极端降水事件时空变化特征[J].水土保持研究, 2018, 25(6): 115-120.
- [8] 张志高,耿益新,蔡茂堂,等.近 59 年河南省汛期降水时空变化特征研究[J].中国农村水利水电, 2020(11):14-18, 23.
- [9] 赵路伟,徐刚.河南省 1961—2014 年气温和降水量的时空变化特征[J].南水北调与水利科技, 2016, 14(3):17-23, 54.
- [10] 王景才,徐蛟,蒋陈娟,等.1960—2014 年淮河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.
- [11] 刘永婷,徐光来,高超,等.淮河流域径流演变规律及其对气候驱动因子的响应[J].水土保持通报, 2018, 38(3):8-13.
- [12] 王怀军,潘莹萍,陈忠升.1960—2014 年淮河流域极端气温和降水时空变化特征[J].地理科学, 2017, 37(12): 1900-1908.
- [13] 张峰,雷晓辉,蒋云钟,等.近 55 年珠江上游流域降水演变规律[J].南水北调与水利科技, 2012, 10(1):49-54.
- [14] 马欣欣,石朋,王增海,等.沙颍河上游区降水序列变化趋势分析[J].水电能源科学, 2013, 31(8):7-11.
- [15] 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.
- [16] 马建琴,陈阳,郝秀平,等.2001—2019 年河南省地表蒸散发时空变化及其影响因素[J].水土保持研究, 2021, 28(5):134-141, 151.
- [17] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Corrigendum to “Power of the Mann-Kendall and Spearman’s rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series”[J]. Hydrology, 2002, 264(1):262-263.
- [18] 徐泽华,韩美,张广彩,等.山东降水空间分布变化及其影响因素[J].水土保持研究, 2018, 25(3):272-278.
- [19] 袁丽华,蒋卫国,申文明,等.2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J].生态学报, 2013, 33(24):7798-7806.
- [20] 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.
- [21] 杨远东,王永红,蔡斯龙,等.珠江流域下游近 60 年输沙率年际与年内变化特征[J].水土保持研究, 2021, 28(2):155-162.
- [22] 王景才,徐蛟,蒋陈娟,等.1960—2014 年淮河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.
- [23] Labat D. Recent advances in wavelet analyses: Part 1. A review of concepts[J]. Journal of Hydrology, 2008, 314(1/4):275-288.
- [24] 王文圣,丁晶,衡彤,等.水文序列周期成分和突变特征识别的小波分析法[J].工程勘察, 2003(1):32-35.
- [25] 王新宇,黄鹏程.基于 GIS 的气象要素插值方法比较研究[J].测绘与空间地理信息, 2020, 43(5):167-170.
- [26] 贾军霞,刘永和,王心义.河南省 1965—2014 年降水时空特征分析[J].黄河水利职业技术学院学报, 2018, 30(2):1-6.
- [27] 韩艳,赵国永,江蕾蕾,等.1951—2013 年河南省降水量时空变化特征[J].中国农学通报, 2015, 31(25):235-240.