

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.06.001

郑州市降雨-径流关系不确定性分析

张金萍^{1,2,3}, 王宇昊¹

(1. 郑州大学水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 中国气象科学院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;
3. 郑州大学黄河生态保护与区域协调发展研究院, 河南 郑州 450001)

摘要:为研究郑州市变化环境下的降雨-径流关系, 利用 1963—2012 年郑州市年降水量和年径流量作为基础数据, 运用时间突变理论确定径流突变点, 将其作为降雨-径流关系的变化点, 并将多时间尺度小波分析和集对分析结合研究降雨-径流在多时间尺度上的联系。结果表明: 郑州市年降水量无明显变化趋势, 年径流量在 1985 年和 2002 年发生显著突变, 降雨-径流关系愈发复杂; 郑州市年降水量具有准 2~4 a、5~7 a、6~11 a、23 a、32 a 的波动周期, 而年径流量具有准 2~4 a、4~9 a、8~11 a、17 a 的波动周期; 郑州市降雨-径流的不确定性关系在短、中、中长周期以同一性为主, 在长周期以差异性为主, 根据变异年份划分的 3 个时段基本符合这一规律。

关键词:降雨-径流关系; 滑动 t 检验; 小波分析; 集对分析; 累积距平; 波变换; 郑州市

中图分类号:TV121⁺.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)06-0001-06

Uncertainty analysis of rainfall-runoff relationship in Zhengzhou City // ZHANG Jinping^{1,2,3}, WANG Yuhao¹ (1. School of Water Conservancy and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 3. Yellow River Institute for Ecological Protection & Regional Coordinated Development, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to study the rainfall-runoff relationship under the changing environment in Zhengzhou City, using the annual precipitation and runoff of Zhengzhou City from 1963 to 2012 as the basic data, the runoff catastrophe point was determined by using the time catastrophe theory as the change point of rainfall-runoff relationship, and the rainfall-runoff relationship on multiple time scales was studied by combining multi time scale wavelet analysis and set pair analysis. The results show that the annual precipitation in Zhengzhou City has no obvious change trend, the annual runoff has a significant mutation in 1985 and 2002, and the rainfall-runoff relationship is becoming more and more complex. The annual precipitation in Zhengzhou City has a fluctuation period of quasi 2—4a, 5—7a, 6—11a, 23a and 32a, while the annual runoff has a fluctuation period of quasi 2—4a, 4—9a, 8—11a and 17a. The uncertainty relationship between rainfall and runoff in Zhengzhou City is dominated by identity in short, medium and medium long periods and difference in long periods, and the three time periods divided according to variation years basically accord with this law.

Key words: rainfall-runoff relationship; sliding t test; wavelet analysis; set pair analysis; cumulative anomaly; wavelet transform; Zhengzhou City

正确认识降雨-径流之间的关系, 可以识别下垫面的水文效应和气候变化的水文效应, 是区域水文模型构建的基础^[1]。随着人类活动的加剧, 降雨-径流关系不确定性增加, 对变化环境下降雨-径流关系的研究具有重要的意义。近年来, 许多人对降雨-径流关系进行了研究, 如, 张学成等^[2]运用动态分析研究了黄河流域划分的 11 个区域进行了降雨-径流

关系的动态变化特点; 郭爱军等^[3]利用滑动偏相关系数法诊断泾河流域降雨-径流关系变异情况, 并引入 Copula 函数分析降雨-径流关系变化特征; 高申等^[4]以汾河水库流域为例, 运用 M-K 检验和集对分析的方法, 分析了水土保持对降雨与径流关系的影响。这些研究主要集中于降雨-径流关系的突变及变化趋势上, 但降雨-径流关系具有动态性, 人类活

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0406501); 2019 年度河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(192102310508); 2021 年度河南省面上基金(212300410404); 灾害天气国家重点实验室开放课题(2021LASW-A15)

作者简介: 张金萍(1979—), 女, 教授, 博士, 主要从事水资源开发利用与管理研究。E-mail: jinpings2000_zh@163.com

动的动态变化时刻影响着降雨-径流关系^[5],这些研究无法反映降雨和径流之间在不同时间尺度下的联系。本文以郑州市年降水量和年径流量数据序列为基础,利用累积距平法对降雨和径流进行趋势分析,结合滑动 t 检验法确定径流突变年份作为降雨-径流关系的突变点,再分别对长序列的郑州市年降水量、年径流量进行多时间尺度小波分析,最后对不同时间尺度下和不同时间段的降雨-径流进行集对分析。

1 研究区概况及数据来源

郑州市位于河南省中部,北临黄河,西依嵩山,东南为广阔的黄淮平原。全市东西长 135 ~ 143 km,南北宽 70 ~ 78 km,总面积 7446 km²。郑州市属北温带大陆性季风气候,冷暖气团交替频繁,四季分明,年平均气温 14.3 ℃,全市多年平均降水量 635.6 mm。郑州市地跨黄河、淮河两大流域,其中黄河流域面积 2012 km²,淮河流域面积 5434 km²,全市大小河流 124 条,流域面积较大的河流有 29 条,其中黄河流域 6 条,淮河流域 23 条。

本文选用郑州市及周边的 50 个雨量站的年降水量加权平均后作为郑州市年降水量序列;告成、中牟、新郑 3 个水文站的年径流量之和作为郑州市年径流量序列,其中告成站位于颍河,中牟站位于贾鲁河,新郑站位于双洎河。研究区域内主要河流和站点分布见图 1。

2 研究方法

2.1 滑动 t 检验

滑动 t 检验根据滑动点和步长对序列逐点进行 t 检验,即设滑动点前为序列 1,滑动点后为序列 2,从两序列中抽取容量分别为 n_1 和 n_2 的样本,对两序列的分布函数相等这一假设进行检验^[6],则

$$T = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_w \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

其中

$$S_w = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

$$S_1 = \sqrt{\frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2}$$

$$S_2 = \sqrt{\frac{1}{n_2 - 1} \sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} (x_i - \bar{x}_2)^2}$$

式中: T 为检验值; $\bar{x}_1$ 和 $\bar{x}_2$ 分别为 n_1 和 n_2 两样本的均值。

T 服从 $t(n_1 + n_2 - 2)$ 分布,对于给定的显著性水平 α ,当 $|T| > t_{\alpha/2}$ 时原假设被拒绝,即抽取的两个样本存在显著性差异,序列发生突变^[7]。

2.2 小波变换

小波变换的基本思想是用一簇小波函数系来表示逼近某一信号或函数^[8]。因此,小波函数是小波变换的关键,它是指具有震荡性、能够迅速衰减到 0 的一类函数^[9],即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (2)$$

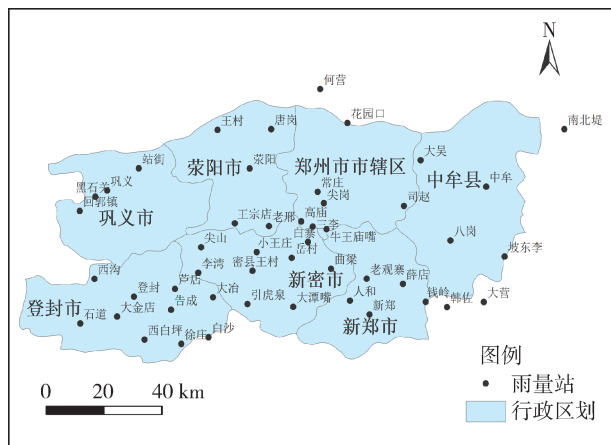
式中 $\psi(t)$ 为基小波函数,它可通过尺度的伸缩和时间轴上的平移构成一簇函数系。

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3)$$

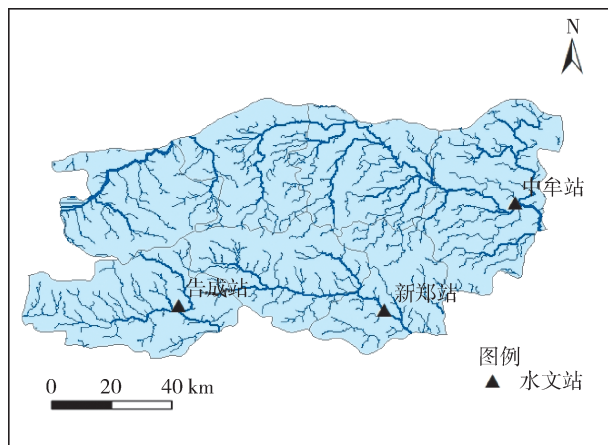
式中: $\psi_{a,b}(t)$ 为子小波; a 为尺度因子,反映小波的周期长度; b 为平移因子,反映时间上的平移。对于给定的能量有限信号 $f(t) \in L^2(R)$,其连续小波变换为

$$W_f(a,b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4)$$

式中: $W_f(a,b)$ 为小波变换系数; $f(t)$ 为一个信号或



(a) 雨量站



(b) 主要河流及水文站

图 1 郑州市主要河流和站点分布

Fig. 1 Distribution of major rivers and sites in Zhengzhou City

平方可积函数; $\bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的复共轭函数。

水文时间序列数据大多是离散的,设函数 $f(k\Delta t)$, Δt 为取样间隔,则式(4)的离散小波变换形式为

$$W_f(a,b) = |a|^{-1/2} \Delta t \sum_{k=1}^N \left[f(k\Delta t) \bar{\psi}\left(\frac{k\Delta t - b}{a}\right) \right] \tag{5}$$

由式(5)可知小波变换的基本原理,即通过增加或减小伸缩尺度 a 来得到信号的低频或高频信息,分析信号的概貌或细节,实现对信号不同时间尺度和空间局部特征的分析^[10]。

2.3 集对分析法

集对分析是对不确定系统中有关联的两个集合构造集对,二者等级水平相同的即为同一,相差一级的即为差异,相差两级的为对立。做同一性、差异性、对立性分析,然后用联系度描述集对的同、异、反关系^[11]。

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{L}{N}j = e + fi + gj \tag{6}$$

其中

$$N = S + F + L \quad e = S/N$$

$$f = F/N \quad g = L/N$$

式中: μ 为两个集合的联系度,联系度越大,二者关系越密切; S 为同一性个数; F 为差异性个数; L 为对立性个数; N 为集合的总长度; i 为差异性系数, i 的取值范围为 $[-1,1]$,本文中 i 取0.5; j 为对立性系数, j 值常取-1; e 、 f 和 g 分别为两个集合的同一度、差异度和对立度^[12]。

3 结果与分析

3.1 降雨-径流关系变化趋势

图2为1963—2012年郑州市年降水量和年径流量变化,可见,1963—2012年,郑州市年降水量变化线整体围绕多年平均降水量上下波动,而年径流量变化没有明显的规律,二者的变化趋势在大部分时段内基本一致,存在若干时段高度一致或变化趋势相反。

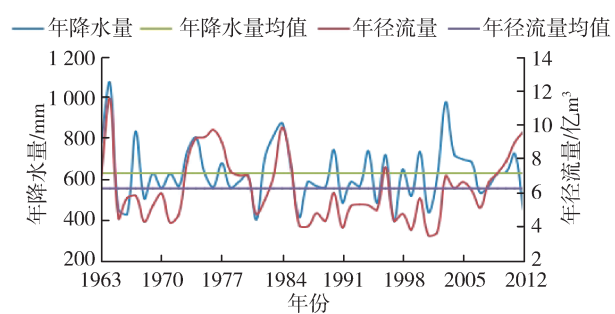


图2 1963—2012年郑州市年降水量和径流量变化
Fig.2 Changes of annual precipitation and runoff in Zhengzhou City from 1963 to 2012

为进一步研究年降水量和年径流量的变化趋势,对降雨和径流序列作累积距平^[13]曲线(图3)。由图3可见,郑州市年降水量增减不定,呈现出3~5a的周期变化,整体上没有明显的变化趋势;1965—1972年,郑州市年径流量始终低于多年均值;1972、1985、2002年径流趋势发生改变且1973—1984年,2003—2012年两时段内年径流量基本高于多年均值,而1985—2002年时段内年径流量基本低于多年均值。

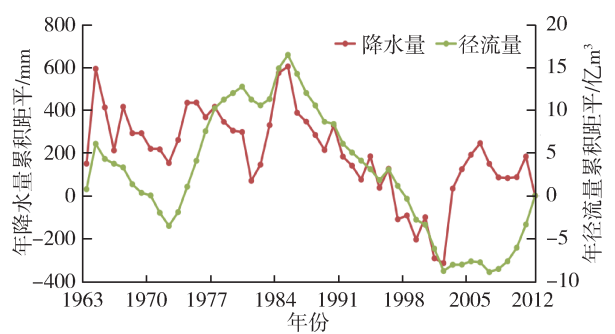


图3 郑州市降雨-径流累积距平曲线
Fig.3 Rainfall-runoff cumulative anomaly curve of Zhengzhou City

为了进一步确定径流的突变年份,利用滑动 t 检验法,分别取步长为5a、7a、10a,取显著性水平为0.01,查表得临界值依次为3.355、3.055、2.878,对年径流量进行突变分析,结果见图4。由图4可见, $n_1 = n_2 = 5$ a时,年径流量在1972年、1977年、2002年发生突变; $n_1 = n_2 = 7$ a时,年径流量在1972年、1985年、2003年发生突变; $n_1 = n_2 = 10$ a时,年径流量在1985年、2002年发生突变。

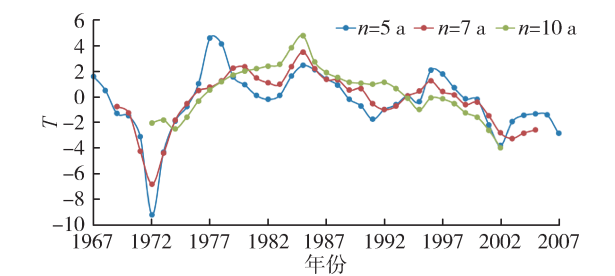


图4 郑州市年径流量滑动 t 检验曲线
Fig.4 Annual runoff sliding t test curve of Zhengzhou City

由于滑动 t 检验默认前后两序列样本容量相等,存在一定的局限性^[14-15],因此假设1972年、1985年、2002年为径流突变年份,与突变点划分时段的长度不一致,因此对根据假设突变点划分的时段,对突变点进行进一步 t 检验,见表1。

由表1结合图4可得:①在99%的置信度下,1985年、2002年为郑州市径流突变年份,且1985年的突变最为显著,由于郑州市降雨无明显变化趋势,则径流量的突变年份即为降雨-径流关系发生改变

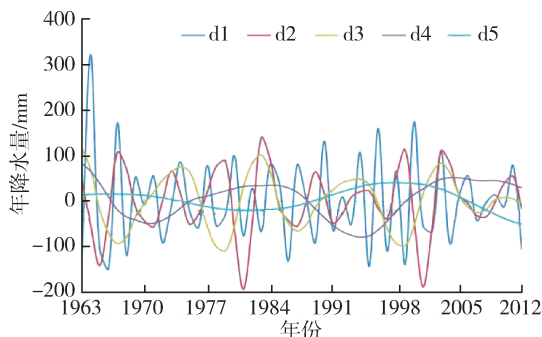
表 1 突变点的显著性 t 检验Table 1 Significant t test of mutation point

年份	n_1/a	n_2/a	T	$t_{\alpha/2}(\alpha=0.01)$
1972	9	13	-1.761	2.845
1985	13	17	4.631	2.763
2002	17	11	-3.327	2.779

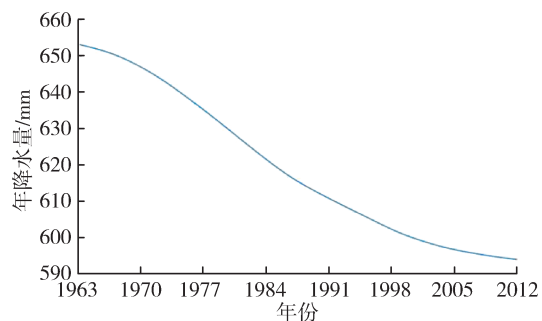
的年份;②1985 年径流量发生减小突变,说明人类活动对径流量影响显著,根据实际情况分析,这一结果可能是 1985 年后郑州市社会经济高速发展,人口急剧增长,城市取用水量增大所导致的;③2002 年径流量发生增大突变,结合实际情况,可能是因为进入 21 世纪以来郑州市城市化程度不断提高^[16],不透水面积增大导致下渗量减小,从而使径流量增大^[17-18]。

3.2 降水量和径流量的小波分析

选用紧支集正交小波 (db6)^[19-22],对年降水量和年径流量序列进行一维离散小波分析。图 5、图 6 分别为二者分解所得的分量,其中 P_{d5} 分量可体现年降水量整体的变化趋势, R_{a5} 分量体现年径流量整体的变化趋势。从图 5、图 6 可以看出:①郑州市降水量分量 P_{d1} 具有准 2~4 a 波动周期,波动幅度逐渐减小,至今较为平稳;分量 P_{d2} 具有准 5~7 a 波动周期,波动幅度总体变化趋势散乱;分量 P_{d3} 具有准 6~11 a 波动周期,前期波动幅度较为平缓,2005—2012 年波动幅度减小;分量 P_{d4} 具有准 23 a 波动周期;分量 P_{d5} 具有准 32 a 波动周期。②郑州市径流量的分



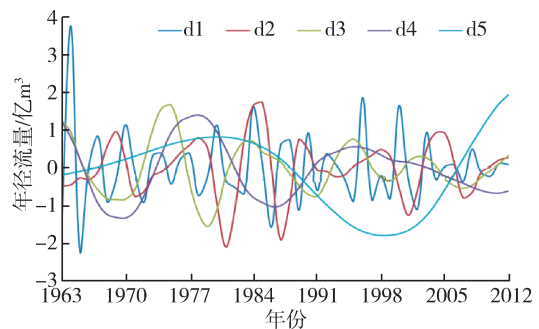
(a) d1 ~ d5 分量



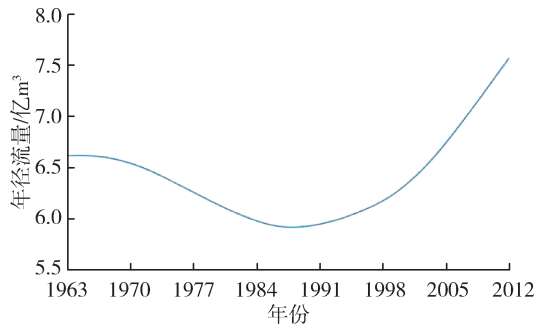
(b) a5 分量

图 5 db6 小波分解年降水量的各分量变化

Fig. 5 db6 wavelet decomposition curves of annual precipitation components



(a) d1 ~ d5 分量



(b) a5 分量

图 6 db6 小波分解年径流量的各分量变化

Fig. 6 db6 wavelet decomposition curves of annual runoff components

量 R_{d1} 具有准 2~4 a 波动周期,波动幅度在 20 世纪 60 年代中期较大,之后至今波动幅度较为平稳;分量 R_{d2} 具有准 4~9 a 波动周期,波动幅度在 20 世纪 80 年代较大,其他时段波动幅度较为平稳;分量 R_{d3} 具有准 8~11 a 波动周期,波动幅度从 20 世纪 80 年代开始逐渐减小;分量 R_{d4} 具有准 17 a 波动周期,波动幅度呈减小趋势。③年降水量呈现逐渐减小的趋势;年径流量呈现先减后增的趋势,且在 20 世纪 80 年代末达到最小值。

3.3 降水量与径流量的多时间尺度集对分析

根据小波变换多时间尺度的分析结果,设定 2~4 a 为短周期,5~9 a 为中周期,10~16 a 为中长周期,17~23 a 为长周期,将降水量的各细节成分序列与径流量的各细节成分序列分别进行多时间尺度集对分析。采用均值标准差法,降水量和径流量分级标准分别见表 2 和表 3。

表 2 降水量分级标准

Table 2 Classification criteria for precipitation

等级	P_{d1}	P_{d2}	P_{d3}	P_{d4}
枯 (I)	< -49.74	< -34.66	< -27.77	< -16.19
平 (II)	$[-49.74, 49.58)$	$[-34.66, 34.38)$	$[-27.77, 29.70)$	$[-16.19, 25.42)$
丰 (III)	≥ 49.58	≥ 34.38	≥ 29.70	≥ 25.42

构建 4 个集对: $H(P_{d1}, R_{d1})$ 、 $H(P_{d2}, R_{d2})$ 、 $H(P_{d3}, R_{d3})$ 、 $H(P_{d4}, R_{d4})$ 。计算每一集对的同一度、差异度、对立度和联系度,计算结果见表 4。从表 4

表3 径流量分级标准

Table 3 Classification criteria for runoff

等级	R_{d1}	R_{d2}	R_{d3}	R_{d4}
枯(Ⅰ)	< -0.48	< -0.39	< -0.34	< -0.43
平(Ⅱ)	$[-0.48, 0.50)$	$[-0.39, 0.36)$	$[-0.34, 0.34)$	$[-0.43, 0.31)$
丰(Ⅲ)	≥ 0.50	≥ 0.36	≥ 0.34	≥ 0.31

可见,郑州市降水量和径流量的同一度主要表现在短周期尺度上,差异度主要表现在中长周期尺度上,对立度主要表现在长周期尺度上。郑州市降雨和径流的相关程度在中周期尺度和中长周期尺度上最高,在长周期尺度上最小。郑州市年降水量和年径流量在短、中、中长周期以同一性为主,差异性同样占主要位置,对立性可忽略不计;在长周期则以差异性为主,且此时对立性较同一性占主要位置。

表4 郑州市降雨-径流多时间尺度集对分析结果

Table 4 Multi-time scale set pair analysis results of rainfall-runoff in Zhengzhou City

集对	同一度	差异度	对立度	联系度
$H(P_{d1}, R_{d1})$	0.64	0.28	0.08	0.7
$H(P_{d2}, R_{d2})$	0.56	0.4	0.04	0.72
$H(P_{d3}, R_{d3})$	0.5	0.48	0.02	0.72
$H(P_{d4}, R_{d4})$	0.28	0.4	0.32	0.16

同理,对1963—1984年、1985—2001年、2002—2012年3个时段的降雨径流进行集对分析(表5)。将郑州市各时段降雨-径流集对分析结果与多时间尺度集对分析结果进行比较可得,1963—1984年这一时段郑州市降雨-径流关系与长周期尺度下的降雨-径流关系一致性较高;1985—2001年这一时段郑州市降雨-径流关系与中长周期尺度下的降雨-径流关系一致性较高;2002—2012年这一时段郑州市降雨-径流关系与中周期尺度下的降雨-径流关系一致性较高。

表5 各时段降雨-径流集对分析结果

Table 5 Set pair analysis results of rainfall-runoff in each period

时段	同一度	差异度	对立度	联系度
1963—1984年	0.364	0.545	0.091	0.545
1985—2001年	0.706	0.294	0	0.853
2002—2012年	0.545	0.364	0.091	0.636

4 结论

a. 郑州市降雨-径流关系在1985年和2002年发生显著改变,人类活动对径流影响愈发显著,径流的影响因素增多,降雨-径流关系的不确定性增加。根据突变年份划分为3个时段:1963—1984年、1985—2001年、2002—2012年,其中第二时段二者相关程度最大,第一、第三时段二者相关程度较小。

b. 郑州市年降水量具有准2~4a、5~7a、6~11a、23a、32a的波动周期;年径流量具有准2~4a、4~9a、8~11a、17a的波动周期,反映了降雨-径流关系的复杂性。

c. 郑州市年降水量和年径流量在短、中、中长周期以同一性为主,差异性同样占主要位置,对立性可忽略不计;在长周期则以差异性为主,且此时对立性占主要位置。这一规律可为从宏观和微观角度预测郑州市径流、研究郑州市下垫面和气候变化等方面提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 翟媛. 黄土高原地区降雨径流理论分析[J]. 人民黄河, 2015, 37(9): 14-16. (ZHAH Yuan. Theoretical analysis of the rainfall and runoff in Loess Plateau Area [J]. Yellow River, 2015, 37(9): 14-16. (in Chinese))
- [2] 张学成, 王玲, 高贵成, 等. 黄河流域降雨径流关系动态分析[J]. 水利水电技术, 2001, 32(8): 1-5. (ZHANG Xuecheng, WANG Ling, GAO Guicheng, et al. Dynamic analysis of rainfall-runoff relationship in Yellow River Basin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2001, 32(8): 1-5. (in Chinese))
- [3] 郭爱军, 畅建霞, 王义民, 等. 近50年泾河流域降雨-径流关系变化及驱动因素定量分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 165-171. (GUO Aijun, CHANG Jianxia, WANG Yimin, et al. Variation characteristics of rainfall-runoff relationship and driving factors analysis in Jinghe River Basin in nearly 50 years [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(14): 165-171. (in Chinese))
- [4] 高申, 吴泽宁, 胡彩虹, 等. 水土保持对降雨-径流关系影响的集对分析[J]. 人民黄河, 2017, 39(4): 87-90. (GAO Shen, WU Zening, HU Caihong, et al. Set pair analysis of the relationship between rainfall and runoff affected by water and soil conservation [J]. Yellow River, 2017, 39(4): 87-90. (in Chinese))
- [5] 杜尧, 陈启慧, 和鹏飞, 等. 南京地区暴雨变化特性分析[J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 89-94. (DU Yao, CHEN Qihui, HE Pengfei, et al. Analysis of rainstorm variation characteristics in Nanjing region [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 89-94. (in Chinese))
- [6] LI Z J, LI X B, XU Z M. Impacts of water conservancy and soil conservation measures on annual runoff in the Chaohe River Basin during 1961-2005 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(6): 947-960.
- [7] 李荣波, 魏鹏, 纪昌明, 等. 雅砻江流域近60a径流趋势特征分析[J]. 人民长江, 2017, 48(5): 38-42. (LI Rongbo, WEI Peng, JI Changming, et al. Analysis of runoff

- tendency characteristics of Yalong River for past 6 decades [J]. Yangtze River, 2017, 48(5): 38-42. (in Chinese))
- [8] 张珊,杨树文,王恒亮. 顾及黄土滑坡的兰州市不同等级降雨时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 184-191. (ZHANG Shan, YANG Shuwen, WANG Hengliang. Spatiotemporal variation of rainfall for different categories in Lanzhou during 1965-2015 considering Loess landslide[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1): 184-191. (in Chinese))
- [9] 张学真,刘燕. 澜河出山径流序列变化的小波分析[J]. 水资源保护, 2006, 22(3): 12-15. (ZHANG Xuezhen, LIU Yan. Wavelet analysis on runoff sequences from mountainous watershed of Bahe River[J]. Water Resources Protection, 2006, 22(3): 12-15. (in Chinese))
- [10] 刘源,徐国宾,段宇,等. 洪泽湖入湖水沙序列的多时间尺度小波分析[J]. 水利水电技术, 2020, 51(2): 128-135. (LIU Yuan, XU Guobin, DUAN Yu, et al. Multi-time scale wavelet analysis of streamflow and sediment sequences into Hongze Lake[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(2): 128-135. (in Chinese))
- [11] 王文圣,向红莲,李跃清,等. 基于集对分析的年径流丰枯分类新方法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40(5): 1-6. (WANG Wensheng, XIANG Honglian, LI Yueqing, et al. A new approach to annual runoff classification based on set pair analysis[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2008, 40(5): 1-6. (in Chinese))
- [12] CHOU C M. Application of set pair analysis-based similarity forecast model and wavelet denoising for runoff forecasting[J]. Water, 2014, 6(4): 912-928.
- [13] 刘涛,杨银科,王天尧. 乌江水系典型小流域年径流序列变化规律及周期特征分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(9): 3744-3749. (LIU Tao, YANG Yinke, WANG Tianyao. Annual runoff series variation and periodic characteristics of typical small watershed in Wujiang River system[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(9): 3744-3749. (in Chinese))
- [14] 贺冉冉,陈元芳,黄琴,等. 基于 Generalized LASSO 模型的长江寸滩站年均径流突变研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 358-364. (HE Ranran, CHEN Yuanfang, HUANG Qin, et al. Abrupt change of annual mean streamflow at Cuntan Station on Yangtze River based on generalized LASSO[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2017, 45(4): 358-364. (in Chinese))
- [15] 鲍振鑫,张建云,王国庆,等. 不同水文序列突变检测方法在漳河观台站径流分析中的对比研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(5): 47-52. (BAO Zhenxin, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, et al. Comparison of the breakpoint of hydrological series detected by multiple methodologies at the Guantai Hydrologic Station in the Zhang River[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(5): 47-52. (in Chinese))
- [16] 王慧亮,吴泽宁,孙若尘. 郑州市城市化对贾鲁河流域水文过程的影响[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(31): 316-321. (WANG Huiliang, WU Zening, SUN Ruochen. Effect of urbanization in Zhengzhou on river hydrological process in Jialu River watershed[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(31): 316-321. (in Chinese))
- [17] 班璇,师崇文,郭辉,等. 气候变化和水利工程对丹江口大坝下游水文情势的影响[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(4): 1-7. (BAN Xuan, SHI Chongwen, GUO Hui, et al. Effects of climate change and water conservancy projects on hydrological regime downstream of Danjiangkou Dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4): 1-7. (in Chinese))
- [18] 孔波,樊晶晶,黄强. 北洛河流域分期径流变异诊断及成因分析[J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 52-57. (KONG Bo, FAN Jingjing, HUANG Qiang. Diagnosis of runoff variation in different periods in Beiluo River Basin and its causes analysis[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 52-57. (in Chinese))
- [19] 陈玉壮,管仪庆,谢悦波,等. 海流兔河流域径流变化的周期和趋势分析[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 45-51. (CHEN Yuzhuang, GUAN Yiqing, XIE Yuebo, et al. Period and trend analysis of streamflow change of Hailiutu River Basin[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 45-51. (in Chinese))
- [20] 荣艳淑,胡玉恒,冯瑞瑞,等. 广义相加模型在乌江夏季径流预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 121-126. (RONG Yanshu, HU Yuheng, FENG Ruirui, et al. Application of generalized additive model in summer runoff forecasting of Wujiang Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(2): 121-126. (in Chinese))
- [21] 赵娜娜,王贺年,张贝贝,等. 若尔盖湿地流域径流变化及其对气候变化的响应[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 40-47. (ZHAO Nana, WANG Henian, ZHANG Beibei, et al. Runoff variation in Zoige Wetland Basin and its response to climate change[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 40-47. (in Chinese))
- [22] 邓鹏,孙善磊,黄鹏年. 气候变化对鄱阳湖流域径流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 39-45. (DENG Peng, SUN Shanlei, HUANG Pengnian. Influence of climate change on runoff in Poyang Lake Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(1): 39-45. (in Chinese))

(收稿日期:2020-06-05 编辑:王 芳)