

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.04.012

洪水基流分割非参数检验方法优选

冷梦辉¹, 白桦¹, 李二辉¹, 向君正¹, 黄监初², 桂发亮¹

(1. 南昌工程学院江西省水文水资源与水环境重点实验室, 江西 南昌 330099;

2. 江西省宜春水文局, 江西 宜春 336000)

摘要:基于江西省萍乡市五丰河流域 2016—2018 年实测场次洪水数据和直线斜割法所得基流流量, 对比分析累积距平法、Pettitt 法、滑动 T 检验法和 Mann-Kendall 检验法应用于基流分割的适用性和准确性, 选择集对分析法为优选非参数检验方法。结果表明: 海绵城市建设后(2018 年)相对建设前(2016 年)标准退水曲线基流流量增加 65.2%, 地下径流量增加 47.3%, 地下径流量占径流总量比例增加 53%。Pettitt 法与直线斜割法所得基流流量相对误差最小, 年均相对误差为 1.7%; 变差系数年均相对误差最小, 为 5%; 集对分析联系度最大, 为 0.81。Pettitt 方法是检验海绵城市直接地表和地下二元径流成分转化的最适非参数检验法。

关键词:基流分割; 场次洪水; 海绵城市; 非参数检验法; 集对分析; 直线斜割法

中图分类号:P333 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)04-0082-07

Optimization of nonparametric test methods for flood baseflow separation//LENG Menghui¹, BAI Hua¹, LI Erhui¹, XIANG Junzheng¹, HUANG Jianchu², GUI Faliang¹ (1. Jiangxi Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Water Environment, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 2. Yichun Hydrology Bureau of Jiangxi Province, Yichun 336000, China)

Abstract: Based on the measured flood data from 2016 to 2018 in the Wufeng River Basin in Pingxiang City, Jiangxi Province and the baseflow rate obtained by the baseflow straight bevel cutting method, the applicability and accuracy of baseflow separation using test methods of cumulative anomaly, Pettitt, sliding T and Mann-Kendall were compared. Optimization of nonparametric tests by set pair analysis was selected. The results showed that, compared with the pre-construction of sponge city(2016), the baseflow of the standard recession curve increased by 65.2%, the underground runoff increased by 47.3%, the proportion of underground runoff to the total runoff increased by 53% after the construction of sponge city (2018). The relative error of baseflow obtained by the Pettitt method and straight bevel cutting method was the smallest, with an average annual relative error of 1.7%; the relative error of variation coefficient is the smallest, which is 5%; and the connection degree obtained by set pair analysis is the highest, which is 0.81. The Pettitt method is the most suitable non-parametric test method for testing the conversion of direct surface and underground binary runoff components in sponge city.

Key words: baseflow separation; flood events; sponge city; non-parametric test method; set pair analysis; straight bevel cutting method

基流是源于包气带水和地下水的慢速径流, 对行业供水、防汛抗旱及生态环境保护等具有重要价值^[1-2]。海绵城市建设核心控制目标包括水资源、水环境、水生态、水安全等, 基流分割模拟、预测预报、规划管理是目标达成的关键^[3]。目前, 常用基流分割方法有图解法、数值模拟法、水量平衡法、同

位素法和水化学法等^[4]。不同基流分割方法适用范围不同, 往往使基流分割结果差异较大^[5-6], 加之气候变化和人类活动的影响, 基流分割难度加大, 现有基流分割方法难以准确甄别变化环境下流域径流成分^[7-8]。流域退水过程径流成分较为复杂, 包含饱和地表径流、直接地表径流、壤中流、地下径流等,

基金项目: 江西省教育厅科技项目(GJJ171005, GJJ170980); 江西省重点规划水利科技项目(KT201726); 国家自然科学基金(41761058)

作者简介: 冷梦辉(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水文与水资源。E-mail: 2269280327@qq.com

通信作者: 桂发亮(1965—), 男, 教授, 博士, 主要从事海绵城市水文效应研究。E-mail: guifaliang@126.com

2 研究方法

2.1 标准退水曲线

基于五丰河流域 2016—2018 年实测场次洪水流量数据,借助 AutoCAD 软件分别绘制逐年场次洪水流量过程线,将各年洪水流量过程线按同一比例沿时间坐标轴平移使其尾部重合,分别绘制各年光滑下包线,即为流域逐年标准退水曲线;作一斜线使斜线和该年标准退水曲线分别与时间坐标轴所围面积相等,用该斜线描述各年标准退水曲线时程倾向率,即为标准退水等效曲线;以逐年光滑下包线为据,采用直线斜割法划分各年场次洪水径流成分,可得场次洪水基流分割点及相应地下径流起始流量。

2.2 场次洪水径流分割

鉴于场次实测数据时间间隔各有差异,本研究以 0.5 h 为时间间隔,采用线性内插法进行数据扩充,计算场次洪水流量间斜率;借助非参数突变检验法识别场次洪水流量斜率突变来划分场次洪水径流,识别场次洪水基流分割点,即为地下水退水起始流量;以直线斜割法所得基流流量为依据,运用平均相对误差法^[18]对比分析各非参数检验法所得基流流量,并评价各非参数检验法准确性。筛选国内外较为常用的突变点检验方法,本文主要运用累积距平法、Pettitt 法、滑动 T 检验法和 Mann-Kendall 检验法 4 种较为经典的非参数突变检验法来检验五丰水文站各场次洪水流量过程线中斜率突变点。

2.2.1 累积距平法

累积距平法主要以离散数据对其均值的离散程度为依据,通过辨别累积距平曲线的上下起伏变化来判别样本点某一时间点处发生突变的均值检验方法,若累积距平值增大,表明离散数据大于其均值,反之则小于其均值^[19-20]。差积曲线上的拐点即为突变点,反映在雨洪过程线上则为地表径流与地下径流的分割点。

$$X_{t_a} = \sum_{i=1}^{t_a} (x_i - \bar{x}) \quad (1 \leq t_a \leq n) \quad (1)$$

式中: X_{t_a} 为样本序列在 t_a 时段的累积距平值; x_i 为场次洪水 i 时刻退水流量斜率值; $\bar{x}$ 为样本序列均值; n 为场次洪水退水总时段长。

2.2.2 Pettitt 法

Pettitt 法是识别水文序列突变点的非参数检验方法,其假设样本容量中存在突变点 m ,突变时刻 t_p ,采用 Mann-Whitney 的统计量 $U_{t_p,n}$ 检验样本序列突变点前后两个子样本 $\{x_1, x_2, \dots, x_{t_p}\}$ 和 $\{x_{t_p+1}, x_{t_p+2}, \dots, x_n\}$ 二者间累积分布是否存在显著差

对气候变化和人类活动有一定响应^[9],变化环境下退水过程径流成分相互转换,导致径流成分、组分和水文情势发生改变,各径流成分间流速差异较大,可能存在多个突变点^[10-12]。而变化环境下径流成分转换过程中,现有基流分割方法可能存在一定的不确定性。对于环境变化剧烈的海绵城市来讲,绿色屋顶、生物滞留池、下沉式绿地和透水铺装等海绵设施增大了地表稳渗率和糙率,更多地表水进入地下,同样也导致流域径流成分、组分及比例发生明显变化,退水过程相应存在突变点。目前,采用数值模拟方法简化基流分割过程是最常用的基流分割方法^[13-15],但主要用于处理长序列的水文动态数据,不适宜针对单场次洪水基流分割。采用非参数水文序列突变检验法对场次洪水基流分割的研究较少,而非参数突变检验法具有高效、准确的特点,对检验过程变化速率较为敏感,能准确识别过程变化中的突变^[16]。

本文以江西省萍乡市海绵城市建设示范区为研究对象,基于五丰水文站 2016—2018 年实测场次洪水数据,采用累积距平法、Pettitt 法、滑动 T 检验法和 Mann-Kendall 检验法划分场次暴雨洪水径流,以直线斜割法所得基流流量为据,借助集对分析法优选非参数检验方法,以期海绵城市洪水基流分割模拟、预测预报及规划管理提供参考。

1 研究区概况

萍乡市位于江西省西部,属亚热带季风性气候区,年平均降水量高达 1 600 mm,降水充沛但时空分布不均,4—6 月降水量约占全年降水量的 45%。城区城市化程度高,洪水具有峰高、暴雨历时短、陡涨陡落等特点,极易产生内涝。2015 年 4 月萍乡市成为全国首批“国家海绵城市建设试点城市”之一,示范区(27°37'N ~ 27°42'N, 113°50'E ~ 113°58'E)包含新、老城区总面积共 32.98 km²,人口 32 万人。示范区约占五丰河流域面积的 2/3,海绵城市示范区建设期为 2016—2018 年,其中 2016 年为海绵城市建设准备期,2017 年为海绵城市建设期,2018 年为海绵城市效益期。示范区内除建设大量绿色海绵基础设施外,同时还改造城市灰色基础设施,提倡“灰色-绿色”有机结合,走生态城市建设、雨水综合利用及可持续发展路线。绿色基础设施包括玉湖、鹅湖、透水铺装、绿色屋顶、植草沟、生物滞留池、植被缓冲带和下沉式绿地等,灰色基础设施包括排涝闸、跨流域调水工程、泵站、蓄水池、雨污排水管网、地下引水箱涵等^[17]。

本文所用数据为江西省萍乡市五丰河流域五丰

异^[21-22]。统计量 $U_{t_p,n}$ 计算公式为

$$U_{t_p,n} = U_{t_p-1,n} + \sum_{i=1}^n \text{sgn}(x_{t_p} - x_i) \quad (t_p = 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

$$K = \max_{1 \leq t_p \leq n} |U_{t_p}| \quad (3)$$

$$P \cong 2\exp[-6K^2/(n^3 + n^2)] \quad (4)$$

式中: x_{t_p} 、 x_i 分别为第 t_p 、 i 时刻场次洪水退水流量斜率值; K 为 t_p 时刻出现 $U_{t_p,n}$ 最大统计量; 若概率 $P \leq 0.05$, 则 m 点为显著突变点。

2.2.3 滑动 T 检验法

滑动 T 检验法主要检验由两子样本序列的均值是否存在显著差异来辨别突变点^[23]。假设在连续序列中存在一个突变点, 突变点前后两段子序列的容量分别为 n_1 、 n_2 , 计算统计量 s :

$$s = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (5)$$

式中: s 服从自由度为 $n_1 + n_2 - 2$ 的 t 分布; n_1 、 n_2 分别为某一基准时刻前后两段样本个数; $\bar{x}_1$ 、 $\bar{x}_2$ 分别为某一基准时刻前后两段场次洪水消退流量相邻时段斜率样本均值; s_1 、 s_2 分别为前后两段样本标准差。

2.2.4 Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 检验法目前广泛用于降水、径流等时间序列的非参数趋势检验或突变检验^[24-26]。对场次洪水流量消退相邻时段斜率样本容量为 n 的时间序列 x , 将第 i 个样本 $x_i > x_j$ 的累计数统计成为 F_k :

$$F_k = \sum_{i=1}^k f_i \quad (1 \leq k \leq n) \quad (6)$$

式中: f_i 为前后两个样本的值, 分别取 0 和 1。

2.3 基流分割方法优选

基于 2016—2018 年场次洪水直线斜割法和各非参数突变检验法所得基流分割流量数据, 采用集对分析法将各场次洪水直线斜割法识别的基流分割

点流量定义为集合 Y , 即 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_{16}\}$, 将各非参数突变检验法即累积距平法、Pettitt 法、滑动 T 检验法和 Mann-Kendall 突变检验法, 识别的各场次基流分割点流量定义为集合 $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$, 组成集对。通过参考相关文献^[27-28], 考虑本文实际数值情况制定分类标准为: 若各场次洪水基流流量 Y_i ($i = 1, 2, \dots, 16$) 在 $\pm 10\%$ 内, 则为同一特性, 将该指标归为第 I 类; 若 Y_i 在 $\pm 10\% \sim \pm 20\%$ 之间, 则为差异特性, 将该指标归为第 II 类; 若 Y_i 在 $\pm 20\%$ 之外, 则为对立特性, 将该指标归为第 III 类。根据分类原则和联系数最大原则统计联系方程中的联系系数, 计算各非参数检验法集对分析联系度。集对分析是一种新的处理不确定性问题的理论与方法, 反映两个样本间共有、对立及差异的特性, 通常用联系度 μ 描述两集合样本的相关程度^[28]:

$$\mu = a + bI + cJ \quad (7)$$

$$\text{其中} \quad a = \frac{S}{N} \quad b = \frac{F}{N} \quad c = \frac{P}{N}$$

式中: N 为集合样本特性总数; S 为集合样本中同一特性个数; F 为集合样本中差异特性个数; P 为集合样本中对立特性个数; I 为差异不确定系数; J 为对立系数且 $J = -1$; a 为集合样本同一度; b 为集合样本差异度; c 为集合样本对立度, 且满足 $a + b + c = 1$ 。

3 结果与分析

3.1 标准退水曲线及基流分割点

图 1 为五丰河流域 2016—2018 年标准退水曲线。分析可知: 2016—2018 年标准退水曲线洪峰流量 Q 分别为 $22.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $15.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $20.8 \text{ m}^3/\text{s}$, 基流分割点时间分别在 31.9 h、19.3 h 和 7.9 h, 相应流量分别为 $4.63 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $6.29 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $7.65 \text{ m}^3/\text{s}$, 退水流量时程倾向率分别为 $0.05 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{h})$ 、 $0.04 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{h})$ 和 $0.02 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{h})$ 。其中, 2016 年标准退水曲线地表径流量、地下径流量分别为 92.7 万 m^3 和 45.5

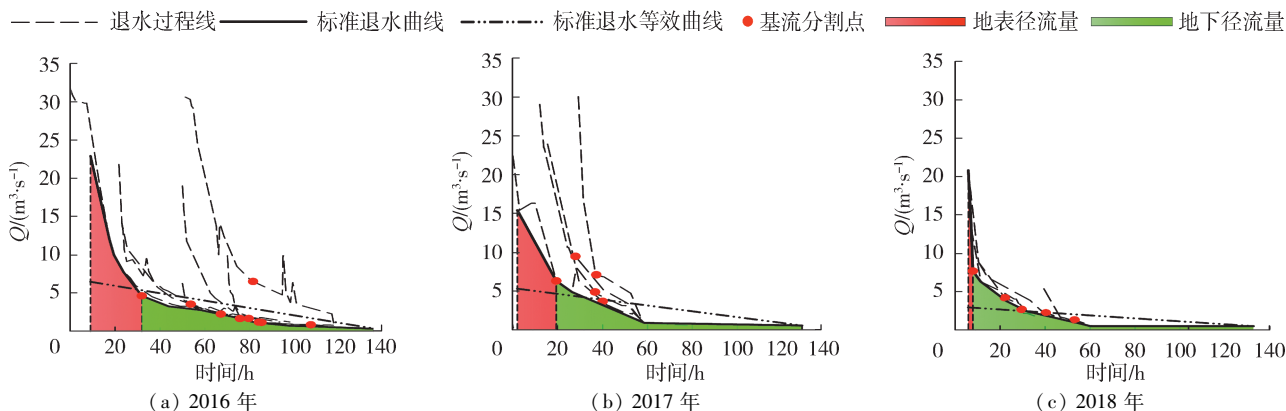


图 1 逐年标准退水曲线及直线斜割法识别的基流分割点

Fig. 1 Annual standard regression curve and baseflow separation point by straight bevel cutting method

万 m^3 , 占径流总量比例分别为 67% 和 33%; 2017 年标准退水曲线地表径流量、地下径流量分别为 67.7 万 m^3 和 65.8 万 m^3 , 占径流总量比例分别为 50.7% 和 49.3%; 2018 年标准退水曲线地表径流量、地下径流量分别为 10.9 万 m^3 和 67 万 m^3 , 占径流总量比例分别为 14% 和 86%, 表明流域洪峰流量、洪水总量相对 2016 年均减少, 退水速率减缓, 地表径流量占径流总量比例减少, 地下径流量占径流总量比例增加。采用直线斜割法识别出各场次洪水基流分割点(图 1), 分析可知: 2016—2018 年场次洪水基流分割点处流量分别在 $0.85 \sim 6.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $3.65 \sim 9.45 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1.29 \sim 4.18 \text{ m}^3/\text{s}$ 间变化, 均值分别为 $2.35 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $6.26 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $2.59 \text{ m}^3/\text{s}$, 变差系数分别为 0.75、0.35 和 0.40, 2018 年场次基流分割点处流量年均值相对 2016 年增大了 10.0%, 变差系数相对 2016 年减小了 45.9%, 表明场次基流分割点处流量年均值相对 2016 年增大, 异质性变小。

分析海绵城市建设前后流域退水规律变化成因可知: 海绵城市源头削减^[29]功能固持水量, 使流域径流系数减小、稳渗率增大, 地下径流量占径流总量比例提升, 弥补径流系数减小导致径流总量削减效应, 造成地下径流量增大 47.3%^[30-31]; 过程阻滞和末端调蓄措施增大地表粗糙度, 发挥蓄洪、滞洪、错峰功能, 造成流域地表汇流速率降低 60%, 汇流过程减缓, 洪水过程“坦化”^[32-33]; 以经典防洪排涝工程为代表的灰色基础设施可影响流域基流^[34-37], 造成地下水增加^[38-39]。

3.2 基于非参数检验的场次洪水基流分割点

基于五丰水文站 2016—2018 年场次洪水退水过程, 以直线斜割法所得基流流量为据, 采用非参数检验法识别洪水基流分割点, 结果见图 2(白圈为直线斜割法划分第 I 类标准); 以直线斜割法所得基流流量为据, 对比累积距平法、Pettitt 法、Mann-Kendall 检验法和滑动 T 检验法所得基流流量见表 1。其中, Mann-Kendall 检验法在显著水平 $\alpha = 0.05$ 无统计意义突变点, 即 Mann-Kendall 检验法未检验出场次洪水基流分割点。分析表明: 2016 年、2017 年和 2018 年与直线斜割法所得基流流量最接近的非参数检验方法是 Pettitt 法, 其中 2016 年相应基流流量年均值分别为 $2.35 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $2.42 \text{ m}^3/\text{s}$, 相对误差为 3%, 基流流量变差系数 C_v 分别为 0.75 和 0.74, 相对误差为 1%; 2017 年基流流量年均值分别为 $6.26 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $6.24 \text{ m}^3/\text{s}$, 相对误差为 0, 基流流量变差系数 C_v 分别为 0.35 和 0.39, 相对误差为 11%; 2018 年基流流量年均值分别为 $2.59 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $2.55 \text{ m}^3/\text{s}$, 相对误差为 2%, 变差系数 C_v 分别为 0.40 和 0.39, 相对误差为 3%。

Pettitt 法所得 2016 年、2017 年和 2018 年突变点相对出现时间分别在 11.3 ~ 72 h、8 ~ 37 h 和 8 ~ 28 h 间变化, 均值分别为 37.1 h、21.1 h 和 18.9 h; 地下径流历时占洪水历时比例分别为 47%、56.1% 和 52.1%。结果表明, 随着海绵城市建设, 年均地下水退水起始流量增大、地下水退水时间提前, 与赵刚等^[40]研究结果一致。究其原因, 海绵设施发挥源头

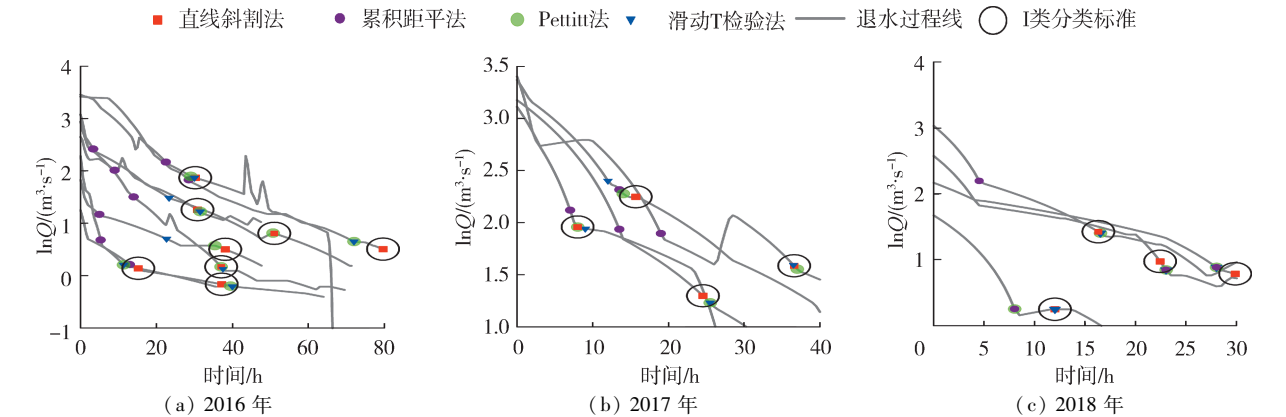


图 2 非参数检验法识别的基流分割点
Fig.2 Point of flood baseflow separation by non-parametric test method

表 1 不同径流分割法基流流量统计结果

年份	基流流量均值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)				C_v			
	直线斜割法	累积距平法	Pettitt 法	滑动 T 检验法	直线斜割法	累积距平法	Pettitt 法	滑动 T 检验法
2016 年	2.35	5.60	2.42	2.69	0.75	0.58	0.74	0.69
2017 年	6.26	8.00	6.24	6.57	0.35	0.17	0.39	0.43
2018 年	2.59	3.78	2.55	2.54	0.40	0.81	0.39	0.40

削减、过程阻滞和末端调蓄功能,使更多坡面洪水阻滞并渗入地下,直接地表径流结束时间提前,地下径流历时占洪水历时比例增加,与前文流域退水规律变化归因分析结论一致。

3.3 基于集对分析的基流分割非参数检验方法优选

基于2016—2018年直线斜割法所得场次洪水基流流量数据,设计集对分类标准划分场次洪水基流流量分类范围,依据分类范围统计各非参数检验法集对分析联系度,结果见表2。分析可知:Pettitt法联系度最大,为0.81;滑动T检验法联系度次之,为0.5;Mann-Kendall检验法联系度最小,为-1。可见,Pettitt法与直线斜割法所得基流流量相似性最大,是城镇洪水基流分割非参数检验的适宜方法。究其原因,城镇洪水退水过程主要径流为直接地表径流和地下径流,两径流流速差异较大,退水速率明显不同,其退水过程相应存在径流分割点。

表2 场次洪水基流流量集对符号量化及联系度
Table 2 Symbolic quantization and conection degree of set pair of flood events baseflow

场次洪水	累积距平法	Pettitt 检验法	滑动 T 检验法	Mann-Kendall 检验法
20160403	Ⅲ	I	I	Ⅲ
20160413	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ
20160426	Ⅲ	I	Ⅲ	Ⅲ
20160507	Ⅲ	I	I	Ⅲ
20160525	Ⅲ	I	I	Ⅲ
20160615	Ⅲ	I	I	Ⅲ
20160704	Ⅲ	I	I	Ⅲ
20160718	Ⅲ	I	Ⅱ	Ⅲ
20170322	Ⅱ	I	I	Ⅲ
20170601	Ⅲ	I	I	Ⅲ
20170605	I	I	Ⅱ	Ⅲ
20170702	Ⅲ	I	I	Ⅲ
20180222	I	I	I	Ⅲ
20180228	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ
20180307	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ
20180412	Ⅲ	I	I	Ⅲ
联系度	-0.56	0.81	0.5	-1

本文主要采用累积距平法、Pettitt 检验法、滑动T检验法和 Mann-Kendall 检验法识别城镇化流域退水过程地表径流和地下径流的突变点,其中,累积距平法和滑动T检验法检验时序数据时均有累加过程,数据有明显阶段性变化特征,易使突变点数值均化,造成突变点识别产生误差;Mann-Kendall 检验法检验均值、方差或均值与方差组合突变,退水过程检验出多个突变点,不适宜检验仅由直接地表径流和地下径流组成的城镇化流域退水过程;Pettitt 法对过程变化速率敏感,专注检验一个突变点,适用性较好,易于区分直接地表径流和地下径流分割点,适用于城镇化流域地表和地下径流的分割。

4 结 论

a. 以直线斜割法为准,Pettitt 法相较累积距平法、滑动T检验法、Mann-Kendall 检验法所求年均地下水退水起始流量相对误差最小,为1.6%;地下水退水起始流量年均变差系数相对误差亦最小,为5.1%。Pettitt 法与直线斜割法所求地下水退水起始流量最接近。

b. 集对分析优选结果表明,Pettitt 法是最适合检验城镇化流域洪水基流分割点的非参数检验法,滑动T检验法次之,累积距平法与 Mann-Kendall 检验法效果最差。

c. 海绵城市建设后洪水退水速率减缓,洪峰流量、洪水总量减少,地下径流量占径流总量比例增大,年均地下水退水起始流量增大、地下水退水时间提前。随着海绵城市建设规模化后,天然、人工海绵体将充分发挥积存、渗透、净化和缓释功能,退水过程将由单一地表和地下径流成分向地表径流、壤中流、地下径流等复杂成分转变,基流分割方法适用性将待进一步探讨。

参考文献:

[1] 熊斌,熊立华. 基于基流退水过程的非一致性枯水频率分析[J]. 水利学报,2016,47(7):873-883. (XIONG Bin, XIONG Lihua. Nonstationary frequency analysis of low-low series considering both baseflow recession process and rainfall[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2016,47(7):873-883. (in Chinese))

[2] FAN Y, CHEN Y, LIU Y, et al. Variation of baseflows in the headstreams of the Tarim River Basin during 1960-2007[J]. Journal of Hydrology, 2013, 487: 98-108.

[3] 康丹,叶青. 海绵城市年径流总量控制目标取值和分解研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31(19): 126-129. (KANG Dan, YE Qing. Study on evaluation and decomposition of volume capture ratio of annual rainfall in sponge city [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(19):126-129. (in Chinese))

[4] 赵贵章,徐远志,王莉莉,等. 黄河上游青铜峡水利枢纽对河川基流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 195-201. (ZHAO Guizhang, XU Yuanzhi, WANG Lili, et al. Effect of Qingtongxia hydraulic project in upstream of Yellow River on river baseflow[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(3): 195-201. (in Chinese))

[5] 徐榕熔,王小刚,郑伟. 基流分割方法研究进展[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 352-359. (XU Ronghan, WANG Xiaogang, ZHENG Wei. Research progresses in baseflow separation methods [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(5): 352-359. (in

- Chinese))
- [6] ECKHARDT K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods [J]. Journal of Hydrology, 2008, 352 (1) : 168-173.
 - [7] LI B, LIANG Z, ZHANG J, et al. Attribution analysis of runoff decline in a semiarid region of the Loess Plateau, China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 131 (1) : 845-855.
 - [8] CHANG J, WANG Y, ISTANBULLUOGLU E, et al. Impact of climate change and human activities on runoff in the Weihe River Basin, China [J]. Quaternary International, 2015: 169-179.
 - [9] 张泳华, 刘祖发, 赵铜铁钢, 等. 东江流域基流变化特征及影响因素 [J]. 水资源保护, 2020, 36 (4) : 75-81. (ZHANG Yonghua, LIU Zufu, ZHAO Tongtiegang, et al. Variation characteristics and influencing factors of base flow in Dongjiang River Basin [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (4) : 75-81. (in Chinese))
 - [10] 王国庆, 张建云, 管晓祥, 等. 中国主要江河径流变化成因定量分析 [J]. 水科学进展, 2020, 31 (3) : 313-323. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, GUAN Xiaoxiang, et al. Quantifying attribution of runoff change for major rivers in China [J]. Advances in Water Science, 2020, 31 (3) : 313-323. (in Chinese))
 - [11] 杨倩, 刘登峰, 孟宪萌, 等. 环境变化对汉江上游径流影响的定量分析 [J]. 水力发电学报, 2019, 38 (12) : 73-84. (YANG Qian, LIU Dengfeng, MENG Xianmeng, et al. Quantitative analysis of impacts of environment changes on runoff in upper Han River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38 (12) : 73-84. (in Chinese))
 - [12] 吴丽, 张爱静. 气候变化和人类活动对大凌河上游流域径流的影响 [J]. 水利水电科技进展, 2016, 36 (2) : 10-15. (WU Li, ZHANG Aijing. Effects of climate change and human activities on runoff in upper Daling River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36 (2) : 10-15. (in Chinese))
 - [13] 刘新有, 谢飞帆. 基于数字滤波法的怒江流域基流时空分异 [J]. 水资源保护, 2017, 33 (1) : 18-23. (LIU Xinyou, XIE Feifan. Spatial-temporal differentiation of base flow in Nujiang River Basin based on digital filtering method [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (1) : 18-23. (in Chinese))
 - [14] 黄文, 李占玲, 徐宗学, 等. 基流分割方法在寒旱区流域的适用性分析 [J]. 水文, 2018, 38 (3) : 21-28. (HUANG Wen, LI Zhanling, XU Zongxue, et al. Suitability analysis of different baseflow separation methods in cold and arid watershed [J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38 (3) : 21-28. (in Chinese))
 - [15] 胡胜, 杨冬冬, 吴江, 等. 基于数字滤波法和 SWAT 模型的澜河流域基流时空变化特征研究 [J]. 地理科学, 2017, 37 (3) : 455-463. (HU Sheng, YANG Dongdong, WU Jiang, et al. Spatiotemporal variation characteristics of baseflow in the Bahe River basin based on digital filter [J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37 (3) : 455-463. (in Chinese))
 - [16] 张媛, 李常斌, 王刘明, 等. 几种河川径流序列突变检验方法的对比 [J]. 水利水电技术, 2020, 51 (2) : 38-47. (ZHANG Yuan, LI Changbin, WANG Liuming, et al. Application and comparison of several test methods for changepoints diagnosis in streamflow variations [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51 (2) : 38-47. (in Chinese))
 - [17] 李辉, 李娜, 俞茜, 等. 海绵城市建设基本原则及灰色与绿色结合的案例浅析 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2017, 15 (1) : 1-9. (LI Hui, LI Na, YU Qian, et al. Integrating green and gray infrastructure into a sustainable future [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017, 15 (1) : 1-9. (in Chinese))
 - [18] 廖爱民, 刘九夫, 张建云, 等. 实验小流域尺度下高精度水位计的比测分析 [J]. 水科学进展, 2019, 30 (3) : 337-347. (LIAO Aimin, LIU Jiufu, ZHANG Jianyun, et al. Intercomparison of high-accuracy water level gauges in the scale of small experimental catchment [J]. Advances in Water Science, 2019, 30 (3) : 337-347. (in Chinese))
 - [19] WEBER K, STEWART M. A critical analysis of the cumulative rainfall departure concept [J]. Ground Water, 2004, 42 (6/7) : 935-938.
 - [20] 夏伟, 周维博, 何庆龙, 等. 气候变化和人类活动对澜河流域输沙量影响的定量评估 [J]. 水利水电科技进展, 2018, 38 (4) : 51-56. (XIA Wei, ZHOU Weibo, HE Qinglong, et al. Quantitative evaluation on impact of climate change and human activities on sediment discharge in Bahe River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38 (4) : 51-56. (in Chinese))
 - [21] 吴子怡, 谢平, 桑燕芳, 等. 水文序列跳跃变异点的滑动相关系数识别方法 [J]. 水利学报, 2017, 48 (12) : 1473-1481, 1489. (WU Ziyi, XIE Ping, SANG Yanfang, et al. Moving correlation coefficient-based method for the detection of change-points in hydrological time series [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48 (12) : 1473-1481, 1489. (in Chinese))
 - [22] 周园园, 师长兴, 范小黎, 等. 国内水文序列变异点分析方法及在各流域应用研究进展 [J]. 地理科学进展, 2011, 30 (11) : 1361-1369. (ZHOU Yuanyuan, SHI Changxing, FAN Xiaoli, et al. Advances in the research methods of abrupt changes of hydrologic sequences and their applications in drainage basins in China [J]. Progress in Geography, 2011, 30 (11) : 1361-1369. (in Chinese))
 - [23] 雷红富, 谢平, 陈广才, 等. 水文序列变异点检验方法的性能比较分析 [J]. 水电能源科学, 2007, 25 (4) : 36-40. (LEI Hongfu, XIE Ping, CHEN Guangcai, et al.

- Comparison and analysis on the performance of hydrological time series change-point testing methods[J]. Water Resources and Power, 2007, 25 (4) : 36-40. (in Chinese))
- [24] BISAI D, CHATTERJEE S, KHAN A, et al. Application of sequential Mann-Kendall test for detection of approximate significant change point in surface air temperature for Kolkata weather observatory, West Bengal, India [J]. International Journal of Current Research, 2014, 6 (2) : 5319-5324.
- [25] 蒋艳, 彭期冬, 骆辉煌, 等. 淮河流域水质污染时空变异特征分析[J]. 水利学报, 2011, 42 (11) : 1283-1288. (JIANG Yan, PENG Qidong, LUO Huihuang, et al. Analysis of spatial and temporal variation of water quality in Huaihe River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(11) : 1283-1288. (in Chinese))
- [26] 陈伏龙, 李绍飞, 冯平, 等. 考虑融雪洪水跳跃变异的水库极限防洪风险复核[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39 (6) : 9-16. (CHEN Fulong, LI Shaofei, FENG Ping, et al. Recheck analysis of reservoir extreme flood control risk considering snowmelt flood sequences with jump up components[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6) : 9-16. (in Chinese))
- [27] 符秋菊, 郭纯青, 周蕊, 等. 集对分析在水文统计、分类及相似性分析中的应用[J]. 水电能源科学, 2013, 31 (6) : 47-50. (FU Qiuju, GUO Chunqing, ZHOU Rui, et al. Application of set pair analysis in hydrologic statistics, classification and similarity analysis[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(6) : 47-50. (in Chinese))
- [28] 刘永安, 王文圣. 集对分析法在城市防洪标准方案优选中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(1) : 77-80. (LIU Yongan, WANG Wensheng. Set pair analysis and its application to optimization of standard schemes of urban flood control[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2018, 39(1) : 77-80. (in Chinese))
- [29] 夏军, 石卫, 王强, 等. 海绵城市建设中若干水文学问题的研讨[J]. 水资源保护, 2017, 33 (1) : 1-8. (XIA Jun, SHI Wei, WANG Qiang, et al. Discussion of several hydrological issues regarding sponge city construction[J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (1) : 1-8. (in Chinese))
- [30] 向晨瑶, 刘家宏, 邵薇薇, 等. 海绵小区削峰减洪效率对降雨特征的响应[J]. 水利水电技术, 2017, 48 (12) : 7-12. (XIANG Chenyao, LIU Jiahong, SHAO Weiwei, et al. Effectiveness of systematically-installed sponge facilities under different rain patterns [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48 (12) : 7-12. (in Chinese))
- [31] MOOERS E W, JAMIESON R, HAYWARD J L, et al. Low-impact development effects on aquifer recharge using coupled surface and groundwater models [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2018, 23 (9) : 04018040.
- [32] 李海忠. 山地城市小流域产汇流特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [33] 白桦. 海绵城市防洪减涝效应评价模型及其应用[D]. 西安: 中国科学院大学, 2020.
- [34] ROSE S, PETERS N E. Effects of urbanization on stream flow in the Atlanta area (Georgia, USA) : a comparative hydrological approach [J]. Hydrological Processes, 2001, 15 (8) : 1441-1457.
- [35] 黄绵松, 杨少雄, 齐文超, 等. 固原海绵城市内涝削减效果数值模拟[J]. 水资源保护, 2019, 35 (5) : 13-18. (HUANG Miansong, YANG Shaoxiong, QI Wenchao, et al. Numerical simulation of urban waterlogging reduction effect in Guyuan spong city [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5) : 13-18. (in Chinese))
- [36] 汪洋, 蔡剑洪, 黄绵松. 固原海绵城市建设工程公众参与意愿影响因素调查[J]. 水利经济, 2020, 38 (2) : 12-16. (WANG Yang, CAI Jianhong, HUANG Miansong. Investigation and analysis on influencing factors of public participation willingness in Guyuan sponge city construction project [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38(2) : 12-16. (in Chinese))
- [37] 继勇, 冷向南, 陈军飞, 等. 海绵城市建设“碎片化”问题及其治理[J]. 水利经济, 2020, 38 (4) : 33-40. (DING Jiyong, LENG Xiangnan, CHEN Junfei, et al. Governance of fragmented phenomenon of sponge city construction [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38 (4) : 33-40. (in Chinese))
- [38] 白乐, 李怀恩, 何宏谋. 降水和人类活动对秃尾河流域基流的影响[J]. 自然资源学报, 2014, 29 (12) : 2078-2088. (BAI Le, LI Huaien, HE Hongmou. Assessing the impacts of precipitation and human activities on base flow in the Middle Tuwei River Basin of the Yellow River [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29 (12) : 2078-2088. (in Chinese))
- [39] 亢小语, 张志强, 陈立欣, 等. 黄土高原中尺度流域基流变化驱动因素分析[J]. 自然资源学报, 2019, 34 (3) : 563-572. (KANG Xiaoyu, ZHANG Zhiqiang, CHEN Lixin, et al. Baseflow variation and driving factors for the last six decades in a watershed on the Loess Plateau, Northern China [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34 (3) : 563-572. (in Chinese))
- [40] 赵刚, 史蓉, 庞博, 等. 快速城市化对产汇流影响的研究: 以凉水河流域为例[J]. 水力发电学报, 2016, 35 (5) : 55-64. (ZHAO Gang, SHI Rong, PANG Bo, et al. Impact of rapid urbanization on rainfall-runoff processes in urban catchment: case study for Liangshui River Basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35 (5) : 55-64. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-08-03 编辑: 彭桃英)