

王涛,伊丽努尔·阿力甫江,李思颖,等,2022. 三种趋势分析法在东帕米尔高原降水特征分析中的应用[J]. 气象,48(10): 1312-1320. Wang T, Yiliner A, Li S Y, et al, 2022. Three trend analysis methods in precipitation characteristic analysis of eastern Pamirs[J]. Meteor Mon, 48(10): 1312-1320(in Chinese).

三种趋势分析法在东帕米尔高原降水 特征分析中的应用^{*}

王 涛¹ 伊丽努尔·阿力甫江¹ 李思颖¹ 阿依谢姆古丽·孜比不拉²
张心蕊¹ 高腾飞¹

1 新疆大学地理与遥感科学学院, 乌鲁木齐 830017

2 新疆克州气象局, 阿图什 845350

提 要: 基于东帕米尔高原 3 个气象站近 58 年(1961—2018 年)逐月降水量资料,借助创新性趋势分析(innovative trend analysis, ITA)法、Mann-Kendall(M-K)非参数检验和 Sen's 斜率估计法分析了东帕米尔高原降水量的变化趋势。结果表明:三种分析方法得出的结论具有一致性,近年来东帕米尔高原降水量呈增加趋势。Sen's 斜率估计法分析得出有 69.44% 的月份降水呈增加趋势,11.11% 的月份呈减少趋势;M-K 法分析得出有 75% 的月份降水呈增加趋势,22.22% 的月份呈减少趋势;ITA 法分析得出有 94.44% 的月份降水呈增加趋势,5.56% 的月份呈减少趋势。三种方法在分析过程中也存在着差异性,如利用 Sen's 斜率估计法分析塔什库尔干气象站点时有 5 个月无变化趋势,与其他两种方法分析结果差异较大。而 ITA 和 M-K 法较为准确地辨识时间序列的变化趋势,且不受异常值影响;三种分析方法中,显著性趋势最强的是 ITA 法,其次是 M-K 法,Sen's 斜率估计法表现较为一般。其中,ITA 分析法有 63.89% 的月份通过了 0.10 的显著性水平检验,M-K 有 25% 的月份通过了 0.10 的显著性水平检验。相较于传统分析方法,ITA 的优势在于,它能够给出不同月份不同级别降水量增加或减少的范围和趋势,所以可以有效地识别传统检验无法确定的隐藏的微弱趋势,更有助于分析水文气象方面数据系列的变化趋势。

关键词: 降水量, Sen's 斜率估计法, 非参数检验法, 创新性趋势分析法, 东帕米尔高原

中图分类号: P466

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.080501

Three Trend Analysis Methods in Precipitation Characteristic Analysis of Eastern Pamirs

WANG Tao¹ YILINUER Alifujiang¹ LI Siying¹ AYSHEMGULI Zibibula²
ZHANG Xinrui¹ GAO Tengfei¹

1 College of Geographic and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830017

2 Keshou Meteorological Office of Xinjiang, Atushi 845350

Abstract: Based on monthly precipitation data of three meteorological stations in the eastern pamirs during the past 58 years (1961—2018), this paper uses innovative trend analysis (ITA), Mann-Kendall (M-K) nonparametric test and Sen's slope estimation method to analyze the variation trend of precipitation in the eastern Pamirs. The results show that the results obtained by the three methods are highly consistent. In recent years, the precipitation in the eastern pamirs has an increasing trend. According to Sen's slope

^{*} “天池博士”科研项目(tcbs201819)、新疆大学博士科研启动基金项目(BS180245)共同资助

2021 年 7 月 30 日收稿; 2022 年 6 月 6 日收修定稿

第一作者: 王涛, 主要从事水文水资源工程研究. E-mail: w1913175300@163.com

通讯作者: 伊丽努尔·阿力甫江, 主要从事干旱区水文水资源研究. E-mail: elnur1103@163.com

estimation method, 69.44% shows an increasing trend of precipitation, and 11.11% shows a decreasing trend. The precipitation increases in 75% of the months and decreases in 22.22% of the months by M-K method. According to ITA analysis, precipitation increases in 94.44% of the months and decreases in 5.56% of the months. However, there are also differences among the three methods in the analysis process. For example, the most obvious difference is that the β value of Tashkogan meteorological station in five months by using Sen's slope estimation method is 0, indicating no trend of change, which is significantly different from the results of the other two methods. ITA and M-K methods can distinguish the trend of time series more accurately, and are almost not affected by outliers. In addition, ITA method has the strongest significance trend, followed by M-K method, and Sen's slope estimation performance is relatively general. The ITA analysis has passed the 0.10 significance level test in 63.89% of the months and M-K has passed the 0.10 significance level test in 25% of the months. Compared with the traditional analysis method, ITA has the advantage that it can give the range and trend of increase or decrease of different levels of precipitation in different months. Therefore, ITA can effectively identify the hidden micro trend that cannot be determined by the traditional test, and is more helpful to analyze the change trend of hydrometeorological data series.

Key words: precipitation, Sen's slope, nonparametric test, innovative trend analysis, eastern Pamirs

引 言

近百年来全球气候变化对各地区降水产生了显著的影响,受影响最为显著的是干旱半干旱区(马柱国和符淙斌,2005)。IPCC(2014)的第五次评估报告表明,陆地上越来越多的地区出现降水量的增长。受全球气候变化影响,区域间气候差异较大,整体气温和降水变化与局部地区气温和降水变化呈现出的趋势可能不同。而我国气候复杂多变,气温和降水变化可能与其他地区呈现出差异性,尤其中国西北干旱半干旱地区近年来降水变化显著。目前关于气候变化的研究,丁一汇(2008)、姚世博等(2017)、严中伟等(2020)主要是从气候要素,如气温、降水变化特征来分析气候变化的趋势和原因。左洪超等(2004)、王遵娅等(2004)、张先恭和李小泉(1982)、丁一汇和戴晓苏(1994)研究表明中国气候变化与全球气候变化趋势基本一致。西北地区的降水变化也引起了众多学者的关注(杨金虎等,2006;陈冬冬和戴永久,2009;王澄海等,2021)。杨阳等(2022)得出我国西北干旱半干旱地区降水量呈增加趋势。王宝灵(1997)得出西北大部分地区大气可降水量呈增加趋势,新疆等地增加趋势明显。黄小燕等(2018)也分析出了西北地区 6 月降水量 1961—1990 年间明显递增。

新疆是西部面积最大的省份,研究新疆及其周边地区近年来降水量变化具有重大意义。左洪超等

(2004)研究得出中国新疆地区降水量变化最为明显。降水量的增加在范围和强度上与国内其他地区相比最大(热孜宛古丽·麦麦提依明等,2016;杨维西,2008),增湿趋势十分明显(崔彩霞,2001;姜大膀等,2009)。新疆腹地的和田地区 1961—2000 年降水量总体呈增多趋势(玉苏甫·阿布都拉等,2006)。位于新疆省西南边缘的东帕米尔高原气候变化也明显受到影响,降水量的不断变化可能会形成洪水和极端天气事件,并且对生态环境产生了较大影响。毛炜峰等(2006)分析得出 1961—2015 年帕米尔高原的年降水量呈显著线性增加趋势。努尔帕提曼·买买提热依木和帕尔哈提·阿不都拉(2015)分析得出 1960—2014 年塔什库尔干县年降水量呈缓慢增加的趋势。关于东帕米尔高原降水量变化研究较少,研究方法集中于 M-K 检验法、一元线性趋势分析法和累积距平法等,基于创新性趋势分析(innovative trend analysis, ITA)法的研究还未实践。ITA 法首先是对数据处理做出直观的图像变化趋势,图像将数据点分为上半三角增加区、下半三角减少区和无明显变化区,且将图像纵向分为“低”组、“中”组和“高”组,能够非常直观地观察出降水量在不同阶段不同范围的变化趋势(黄丹等,2018)。它弥补了 M-K 只能检验单调变化趋势的不足;它更易于理解、计算,分析结果更精确和更清楚,表现在于:ITA 不需要假设,保证了对趋势存在性的直观检查可能性;它可以用于给定时间序列中的详细趋势的确定和分类解释,用数字观察可视化趋势之外的变

化,给出的 D 值(表征趋势增减性)有助于确定最小值隐藏的趋势,还可以防止其他误导性的判断(如无限变化率等),而图形检验可以直观地检验出单调和非单调的变化趋势,允许对三部分做图形化的评估。因此,本研究利用 ITA 法研究分析东帕米尔高原塔什库尔干、吐尔尕特、乌恰 3 个气象站 58 年(1961—2018 年)的月降水变化趋势。对了解东帕米尔高原近年来降水变化特征具有一定意义。

1 研究区概况

东帕米尔高原位于中亚东南部、中国新疆维吾尔自治区的西南边缘, $38^{\circ} \sim 41^{\circ} \text{N}$ 、 $73^{\circ} \sim 76^{\circ} 30' \text{E}$ 。北起天山、东以木吉谷地和塔什库尔干谷地为界,西与昆仑山相接、南至喀拉昆仑山。高原海拔为 4000~7700 m,拥有许多高峰,最高峰可达 7719 m,平均海拔在 4500 m 以上,主要山峰均在 6000 m 以上。

东帕米尔高原属严寒的强烈大陆性高山气候,冬季漫长,绝对最低气温达 -50°C ,历史上布仑戈 1953 年最低气温曾低至 -53.3°C ,历年最高气温不超过 20°C ,年降水量仅为 75~100 mm,在喀拉湖盆地更是少至 30 mm。本区处在西风和西南季风冷湿气流进入青藏高原西北边缘的通道山区,因而较为寒冷。由于本区地处亚欧大陆腹地,远离海洋,降水较少,故气候寒冷且干燥(曾磊等,2013)。多年来极端升温过程造成该区域夏季融雪(冰)洪水发生风险提高,并且极端降水形成的混合型洪水及其衍生地质灾害风险也在加剧(毛炜峰等,2019),地质灾害风险的加剧越来越影响人类正常的生产生活,所以研究此区域近年来气候变化有一定的实际意义。

2 研究方法

2.1 Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall(M-K)趋势检验法是一种非参数检验,用于检测气象水文时间序列的趋势和突变检验(Kendall, 1938; Mann, 1945)。该方法已被世界气象组织应用于研究处理气候数据的时间变化。其优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,检验能力优于参数检验,并且无须事先假定样本的统计分布,人为性少,定量程度高,计算较简便。 α 为显著性水平,本文取 $\alpha=0.10$ 。

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

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

式中: x_i 和 x_j 是在 i 和 j 时刻的数据值, n 表示数据集的长度(数据集中数据的个数)。而 S 的正值表示增加趋势,负值表示减少趋势(Mann, 1945; 黄丹等, 2018; 魏凤英, 2007)。

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \times [n(n-1)(2n+5) - \sum_{k=1}^m t_k(t_k-1)(2t_k+5)] \quad (3)$$

式中: m 是并列组数(时间序列中的相等数据),摘要符号(\sum)表示所有并列组的总和。 t_k 是第 m 组中观察值的数目(李红梅等, 2008; 艾雅雯等, 2020)。用式(3)计算时间序列方差后,标准 Z_c 值根据式(4)计算, Z_c 为正表示该序列具有增加趋势,而 Z_c 为负表示该序列呈减少趋势(魏凤英, 2007)。

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

2.2 Sen's 斜率估计法

Sen's 斜率估计法计算序列的斜率 β , β 表示序列的平均变化率和序列的趋势,当 $\beta > 0$ 时,序列呈上升趋势; $\beta = 0$ 时,序列趋势不明显; $\beta < 0$ 时,序列呈下降趋势。估计 n 个样本中 N 对数据的趋势斜率:

$$\beta = \text{Median} \frac{x_j - x_i}{j - i}, \quad i = 1, \dots, N \quad (5)$$

式中: x_j 和 x_i 分别是第 j 个和 i 个时间的样本序列值($j > i$), Median 为取中值函数。

2.3 创新性趋势分析(ITA)法

ITA 法并不要求数据是独立的或者是正态分布的(Şen, 2012; 2014; 2017)。该方法是将时间序列分为两个子序列,并将子序列按升序的方式分别排列,并将 1:1 (45°) 线也置于坐标系内(图 1a)。然后分析整理成像的数据与 1:1 线之间的关系。如果数据落在 1:1 线上则表明没有变化趋势。如果数据位于 1:1 线的上方(增加区域),则表明呈增

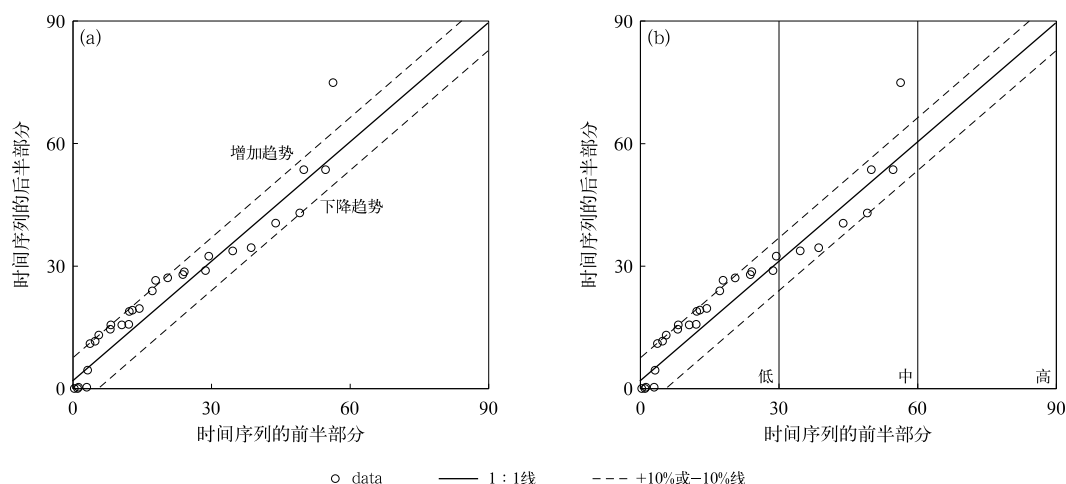


图 1 以创新性趋势分析(ITA)法为例:(a)非单调趋势,(b)3 组数据点分布趋势

Fig. 1 Taking the innovative trend analysis (ITA) method as an example:

(a) the non monotonic trend, (b) distribution trend of three groups of data points

加趋势(Caloiero et al, 2018)。如果数据积落在 1 : 1 线的下方(减少区域),则表明呈减少的趋势。为了更好地分析出图像,将图像纵向分为“低”组、“中”组和“高”组。

ITA 指数 D 来表征趋势增减性,其中 x_i 和 y_i 是在 i 时刻的数据值, n 表示数据集的长度(数据集中数据的个数), \bar{x} 表示平均数(Alifujiang et al, 2020; 2021)。

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{10(y_i - x_i)}{\bar{x}} \quad (5)$$

3 分析结果

3.1 M-K 法分析结果

选取东帕米尔高原 3 个代表性的气象站(塔什库尔干、吐尔尕特和乌恰)58 年(1961—2018 年)的逐月降水资料,采用 M-K 趋势检验 3 个气象站的降水量进行趋势分析,其计算结果见表 1。

从表 1 可知:

(1)塔什库尔干站 6 月和 8 月降水量的 Z_c 值 > 0 ,分别为 2.119 和 2.361,均通过了 0.05 的显著性水平检验,呈显著增加趋势。而其他月份均未通过 0.10 显著性水平检验,呈增加或减少趋势。其中 3、5、10 和 11 月的 Z_c 值均 > 0 ,呈增加趋势。而其他月份均未通过 0.10 显著性水平检验,占 33.333%;

而 1、2、4、7、9 和 12 月的 Z_c 值均 < 0 ,呈减少趋势,约占 50%。

(2)吐尔尕特站降水量除了 1 月($Z_c = -0.085$)呈减少趋势外,2—12 月的 Z_c 值都 > 0 ,呈增加趋势,约占 91.667%。其中,4 月($Z_c = 1.733$)通过了 0.10 的显著性水平检验,3 月($Z_c = 2.119$)、6 月($Z_c = 2.197$)和 10 月($Z_c = 2.348$)均通过了 0.05 的显著性水平检验,占 25%;而 12 月($Z_c = 2.871$)通过了 0.01 的显著性水平检验,呈显著增加趋势。

(3)乌恰站的降水量在 6 月和 7 月($Z_c = 2.295$ 和 $Z_c = 2.439$),通过了 0.05 的显著性水平检验,呈显著增加趋势,占 16.667%。除了 3 月($Z_c = -0.268$)为减少趋势,该站 1、2、4、5 月和 8—12 月这 9 个月均没通过 0.10 的显著性水平检验,但 Z_c 值都 > 0 ,因此说明该站在这 10 个月降水量呈增加趋势,占 83.333%。

基于 M-K 检验法 3 个站点的多年降水量中夏季(6—8 月)增加趋势均显著,对全年降水贡献最大;秋季(9—11 月)和冬季(12 月和次年 1—2 月)次之;春季变化趋势不明显,甚至塔什库尔干站和吐尔尕特站 1 月和 2 月与乌恰站 3 月呈减少趋势。与曾磊(2012)分析的 1957—2010 年东帕米尔高原不同季节降水量变化趋势一致:“研究区不同季节降水量除春季外,夏季、秋季和冬季表现出一定的升高趋势并且夏季降水量增幅最为明显”。

表 1 1961—2018 年东帕米尔高原 3 个气象站点月降水量变化(单位:mm)

Table 1 Statistics of monthly precipitation changes at three meteorological stations on the eastern Pamirs (1961—2018) (unit: mm)

站点 月份	塔什库尔干		吐尔尕特		乌恰	
	β	Z_c	β	Z_c	β	Z_c
1	0	-0.281(A)	0	-0.085(A)	0.007	0.602(A)
2	0	-0.072(A)	0.018	0.831(A)	0	0(A)
3	0.007	0.687(A)	0.153	2.119(R)**	-0.005	-0.268(A)
4	-0.006	-0.405(A)	0.156	1.733(R)*	0.008	0.144(A)
5	0.039	0.713(A)	0.115	0.916(A)	0.263	1.328(A)
6	0.170	2.119(R)**	0.373	2.197(R)**	0.371	2.295(R)**
7	-0.060	-0.092(A)	0.204	1.073(A)	0.367	2.439(R)**
8	0.150	2.361(R)**	0.295	1.432(A)	0.234	1.622(A)
9	0	-0.163(A)	0.100	0.726(A)	0.216	1.543(A)
10	0.005	1.177(A)	0.187	2.348(R)**	0.016	1.118(A)
11	0	0.118(A)	0.043	1.347(A)	0	0.085(A)
12	0	-0.458(A)	0.063	2.871(R)***	0.020	0.785(A)

注: β 为倾斜度,当 β 为正时,呈增加趋势,当 β 为负时,呈减少趋势; Z_c 为统计量值,R:显著,A:不显著。当 $|Z_c|<1.64$ 时,表示没有显著趋势;如果 $|Z_c|\geq 1.64$,趋势在0.10的显著性水平上是显著的,记为*;如果 $|Z_c|\geq 1.96$,趋势在0.05的显著性水平上是显著的,记为**;当 $|Z_c|\geq 2.58$,则趋势在0.01的显著性水平上是显著的,记为***。 Z_c 为正表示该序列具有增加趋势,而 Z_c 为负表示该序列呈减少趋势。

Note: β is the inclination, when β is positive, it shows an increasing trend, and when β is negative, it shows a decreasing trend; Z_c is the statistical value, R: significant, A: insignificant. $|Z_c|<1.64$ means there is no significant trend; If $|Z_c|\geq 1.64$, the trend is significant at 0.10 level marked as *; If $|Z_c|\geq 1.96$, the trend is significant at 0.05 level, marked as **; When $|Z_c|\geq 2.58$, the trend is significant at 0.01 level, marked as ***. A positive Z_c indicates that the sequence has an increasing trend, while a negative Z_c indicates that the sequence has a decreasing trend.

3.2 Sen's 斜率估计法趋势分析结果

由表 1 可知,塔什库尔干站在 1—2 月、9 月、11—12 月 β 为 0,表明没有变化趋势;3 月、5—6 月、8 月和 10 月 β 为正值,表明降水量呈增加趋势;4 月和 7 月 β 为负值,表明降水量呈减少趋势。

吐尔尕特站在 1 月 β 为 0,表明没有变化趋势;2—12 月 β 为正值,表明降水量呈增加趋势。而乌恰站在 2 月和 11 月 β 为 0,表明没有变化趋势;3 月 β 为负值,呈减少趋势;1 月、4—12 月 β 为正值,表明呈增加趋势。总之,58 年来东帕米尔高原降水量变化趋势不明显。这与胡凡盛(2018)研究结果相似,东帕米尔高原 1976—2016 年降水量线性拟合系数低,整体呈缓慢增加趋势。

3.3 ITA 法趋势分析结果

图 2~图 4 显示 1:1(45°)线与数据点的位置关系,由图可知逐月降水量的变化趋势。由图 2 可知,塔什库尔干站 3 月的数据点均落在 1:1 线的上方(在增加区域),整体呈增加趋势;且数据点落在“低”组和“中”组的增加区域,就说明这 3 个月降水量的增加是在 0~20、0~40 和 0~60 mm 范围内增

加。在 1 月大部分数据点落在 1:1 线的下方(在减少区域),且数据点落在“低”组和“高”组的减少区域;说明 1 月降水量的减少是在 0~30 mm 范围内减少。

从图 2 可知,塔什库尔干站降水量在 2、3、5、6、8、11 和 12 月呈增加趋势,这些月的数据点落在 1:1 线上和 1:1 线的上方,落在“低”组和“中”组内,增加范围在 0~60 mm 内。1 月降水量呈显著减少趋势,通过了 0.10 的显著性水平检验,1 月在“低”组和“高”组减少趋势显著,减少范围在 0~30 mm。4 月大部分数据落在 1:1 线上,说明无变化趋势,但有些数据落在 1:1 线下的“低”组的减少区域,也有一些数据落在“中”组的增加区域。7、9 和 10 月部分数据落在 1:1 线的上方,部分数据落在 1:1 线的下方,上方是在“中”组的增加区域,下方是在“低”组的减少区域,这种情况就无法正确阅读出该月的降水量变化趋势,必须结合 ITA 指数进行分析。从表 3 可知,2、3、5、6、8、11 和 12 月,7 个月显著水平检验均通过了 0.10,降水量呈显著增加趋势。

如图 3 所示,吐尔尕特站点,1 月、3—6 月和 10—12 月这 8 个月均通过了 0.10 显著性水平检验,呈显著增加趋势。1 月一部分数据点落在“低”组的减少区域,但十分靠近 1:1 线,还有一部分数

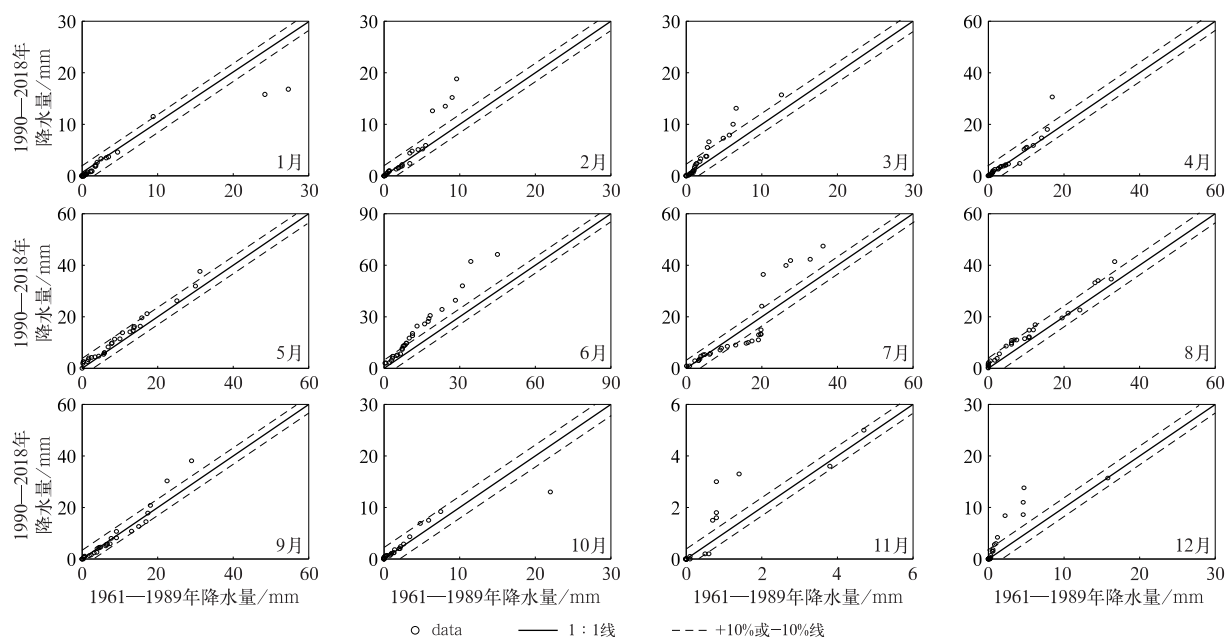


图 2 塔什库尔干 1961—2018 年 1—12 月 ITA 趋势分析结果

Fig. 2 ITA trend analysis results of Tashkurgan from January to December 1961–2018

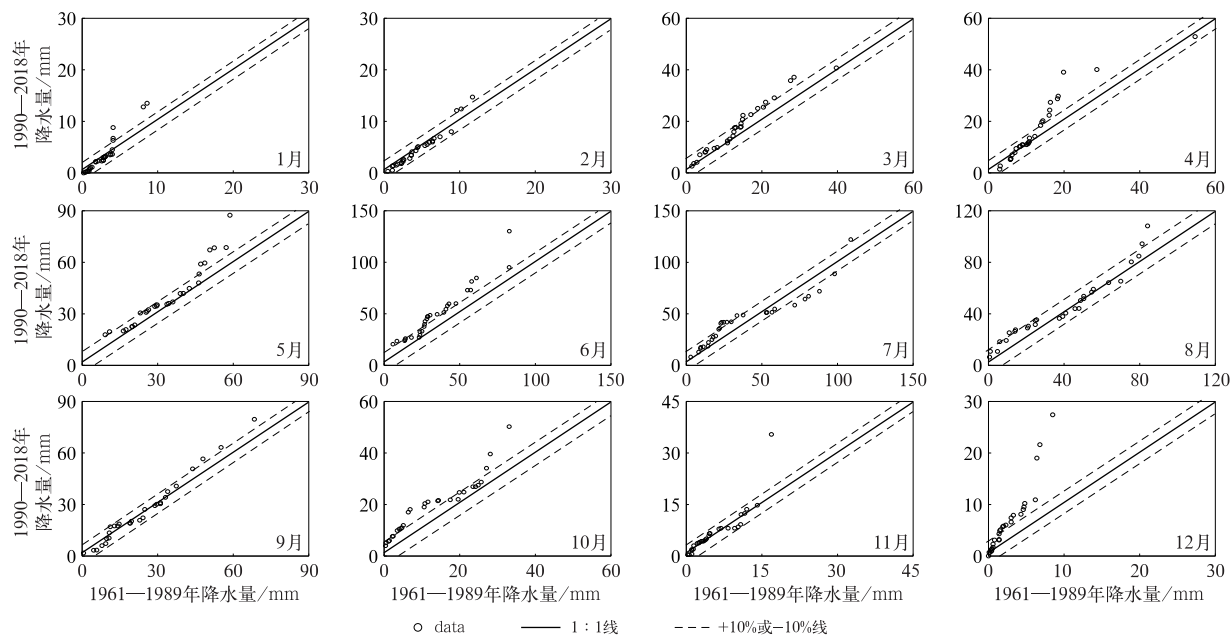


图 3 同图 2, 但为吐尔尕特

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for Turgat

据点落在“低”组的增加区域,但距离 1 : 1 线较远,且通过了 0.10 显著性水平检验,所以 1 月降水量是呈显著增加的。3—6 月和 10—12 月这 7 个月的数据点大部分都落在“低”组和“高”组的增加区域,所以这些月降水量是呈显著增加的。7 月的“低”组的增加区域和“中”组的减少区域,分别在 0~50 和 0~100 mm 内减少和增加。

如图 4 所示,乌恰站点 1 月、5—10 月和 12 月全部都通过了 0.10 显著性水平检验,呈显著增加趋势。5 月和 7—8 月数据点几乎全部都落在“低”组、“中”组和“高”组的增加区域内,分别在 0~90、0~120 和 0~150 mm 范围内增加。6、10 和 12 月的数据点大部分都落在“低”组的增加区域内,少部分数据点落在“中”组的增加区域内。9 月则是大部分

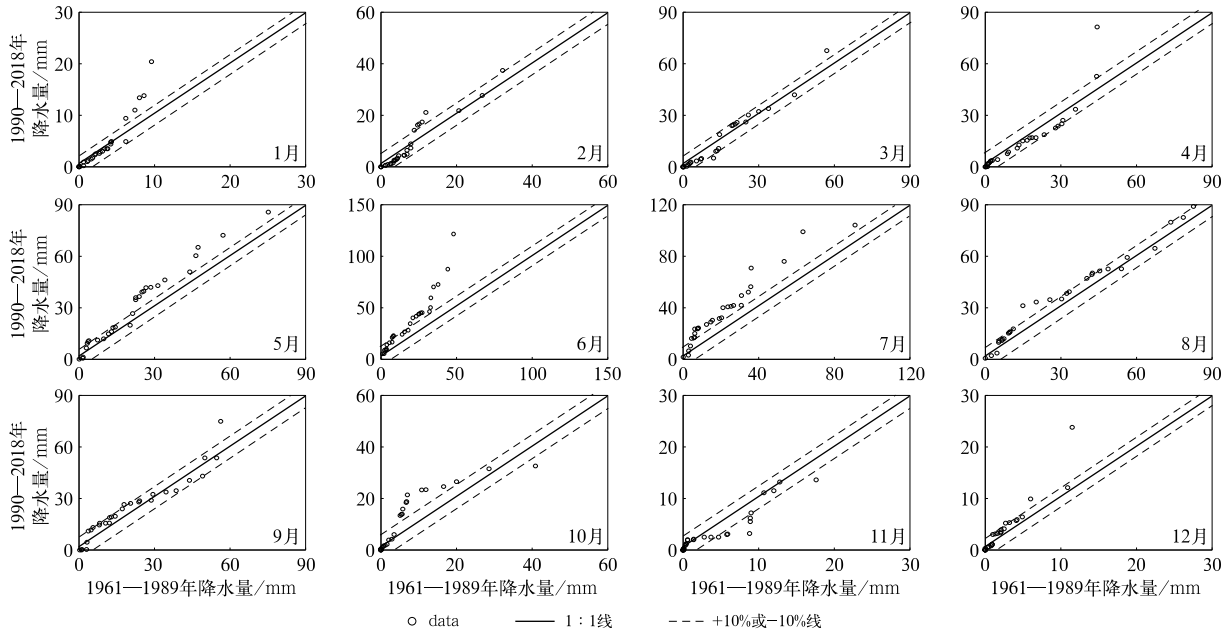


图 4 同图 2, 但为乌恰

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for Wuqia

数据点落在“低”组的增加区域内,少部分落在“中”组的减少区域内,但是通过了 0.10 显著性水平检验,所以也呈显著增加趋势。11 月大部分数据落在 1:1 线的下方,落在“低”组和“中”组的减少区域内,所以说该月呈显著减少趋势。

表 2 东帕米尔高原 3 个气象站的 ITA 指数
Table 2 ITA index of three weather stations
in eastern Pamirs

月份	塔什库尔干	吐尔尕特	乌恰
1 月	-1.895 *	2.082 *	3.103 ***
2 月	3.753 ***	0.343	1.115
3 月	5.089 ***	2.791 **	0.214
4 月	1.199	2.871 **	0.270
5 月	1.874 *	2.263 *	3.618 ***
6 月	6.164 ***	4.296 ***	9.513 ***
7 月	0.212	1.224	7.023 ***
8 月	2.425 *	1.580	1.730 *
9 月	0.278	0.802	1.676 *
10 月	0.017	5.042 ***	6.320 ***
11 月	4.196 ***	2.303 *	-1.716 *
12 月	9.241 ***	15.841 ***	6.118 ***

注: *、**、*** 表示 0.10(±1.64)、0.05(±1.96)和 0.01(±2.58) 的显著性水平。

Note: *, ** and *** represent the significance levels of 0.10 (±1.64), 0.05 (±1.96) and 0.01 (±2.58), respectively.

3.4 三种趋势分析法的比较

通过 ITA 和 M-K 法进行对比得出,3 个气象站在 36 个月(每个站点有 12 个月尺度降水量)的降水

量中变化显著的月份分别是 23 个月和 9 个月,其中 ITA 显著趋势为 64%,M-K 显著趋势为 25%。Sen's 斜率估计检验 36 个月的降水量,其中有 8 个月斜率为 0,表明无变化趋势,而剩余月份的斜率估计与 Z_c 值的正(负)变化情况一致,表明 Sen's 斜率估计检验和 M-K 法有较高的拟合度。通过 M-K 和 Sen's 斜率估计法与 ITA 法对比分析,塔什库尔干站除 6 月和 8 月之外所有月份的降水量没有显著变化趋势;而通过 ITA 方法,降水量在 2、3、5、6、8、11 和 12 月呈显著增加趋势。通过 M-K 和 Sen's 斜率估计检验法分析吐尔尕特气象站点 3、4、6、10 和 12 月的降水量呈显著增加趋势,而通过 ITA 分析法得知 1 月、3—6 月和 10—12 月的降水量均呈显著增加趋势;乌恰气象站点,通过 M-K 和 Sen's 斜率估计检验法得知 6 月和 7 月呈显著增加趋势,而其他 10 个月无显著趋势,通过 ITA 分析法得知 1 月、5—10 月和 12 月呈显著增加趋势,而 11 月呈显著减少趋势。

4 结 论

本文分别利用 M-K 检验法、Sen's 斜率估计和 ITA 法,针对东帕米尔高原 3 个代表气象站点,1961—2018 年逐月降水资料,分析得到东帕米尔高原的降水变化整体趋势。结果如下:

(1)1961—2018 年,三种方法均得出东帕米尔

高原年降水量呈现出显著的增加趋势,与尚华明等(2021)分析东帕米尔高原近几十年来降水增幅大结论一致。但显著性趋势最强的是 ITA 法,其次是 M-K 法,Sen's 斜率估计表现较为一般。ITA 法分析了不同月份不同级别降水量趋势,能够对一些月份的隐藏趋势做出回答,比较系统全面分析出了各个阶段的变化趋势;M-K 与 ITA 趋势变化大体一致,3 个站点的多年降水量均呈现出增加趋势,尤其是显著月份与 ITA 高度拟合;Sen's 斜率估计与两种方法得出结论有一定差异性,线性拟合系数低,原因可能是 Sen's 斜率估计法是在众多斜率中寻找中值,而中值斜率的正负不能很好地评估时间序列的增减趋势,而且 Sen's 斜率估计法不能很好地排除异常值的影响,但分析得出整体呈缓慢增加趋势。

(2)季节特征上,夏季(6—8月)降水增强幅度最大,6月和8月最为显著,与王宝灵(1997)分析1961—1990中国西北地区30年间6月降水量递增的结果吻合;冬季(12月、次年1月和2月)为其次,1月增强幅度最小;春季(3—5月)增强幅度最小,一年中夏季降水量贡献最大,春季最小。原因可能是冰川加速消融(IPCC,2007)导致的径流增加,潜在植被变化(Jiang,2008)导致的土壤水分平衡过程变化等。

(3)ITA 的优势在于,它能够根据图形非常直观地观察出降水量在不同阶段的变化趋势,弥补了 M-K 和 Sen's 斜率估计法只能检验单调变化趋势的不足,不需要假设,保证了对趋势存在性的直观检查可能性,能够确定最小值隐藏的趋势,弥补了 M-K 和 Sen's 斜率估计法对短时间序列分析的低精确性。

参考文献

- 艾雅雯,孙建奇,韩双泽,等,2020.1961—2016年中国春季极端低温事件的时空特征分析[J].大气科学,44(6):1305-1319. Ai Y W, Sun J Q, Han S Z, et al, 2020. Spatial and temporal features of spring extreme low temperature events in China during 1961-2016[J]. Chin J Atmos Sci, 44(6): 1305-1319(in Chinese).
- 陈冬冬,戴永久,2009.近五十年中国西北地区夏季降水场变化特征及影响因素分析[J].大气科学,33(6):1247-1258. Chen D D, Dai Y J, 2009. Characteristics and analysis of typical anomalous summer rainfall patterns in Northwest China over the last 50 years[J]. Chin J Atmos Sci, 33(6): 1247-1258(in Chinese).
- 崔彩霞,2001.新疆近40年气候变化与沙尘暴趋势分析[J].气象,27(12):38-41. Cui C X, 2001. Analysis of climate and sandstorms in Xinjiang in recent 40 years[J]. Meteor Mon, 27(12): 38-41(in Chinese).
- 丁一汇,2008.人类活动与全球气候变化及其对水资源的影响[J].中国水利, (2): 20-27. Ding Y H, 2008. Human activity and the global climate change and its impact on water resources[J]. China Water Resour, (2): 20-27(in Chinese).
- 丁一汇,戴晓苏,1994.中国近百年来温度变化[J].气象,20(12): 19-26. Ding Y H, Dai X S, 1994. Temperature variation in China during the last 100 years[J]. Meteor Mon, 20(12): 19-26(in Chinese).
- 胡凡盛,2018.1976—2016年东帕米尔-西昆仑地区冰川变化遥感监测[D].兰州:兰州大学. Hu F S, 2018. Remote sensing monitoring of glacier changes between eastern Pamirs Plateau and western Kunlun Mountains from 1976 to 2016 [D]. Lanzhou: Lanzhou University(in Chinese).
- 黄丹,刘再斌,蒋勤明,2018.应用非参数的MK和ITA方法分析地下水水质参数变化特征——以新三矿含水层为例[J].水资源与水工程学报,29(3):7-13. Huang D, Liu Z B, Jiang Q M, 2018. Application of non-parametric Mann-Kendall and innovative trend method analysis to groundwater quality parameters variation; a case study from aquifers in Xinsankuang Coal Mine[J]. J Water Resour Water Eng, 29(3): 7-13(in Chinese).
- 黄小燕,王圣杰,王小平,2018.1960—2015年中国西北地区大气可降水量变化特征[J].气象,44(9):1191-1199. Huang X Y, Wang S J, Wang X P, 2018. Variations of precipitable water in Northwest China during 1960—2015[J]. Meteor Mon, 44(9): 1191-1199(in Chinese).
- IPCC, 2014. 政府间气候变化专门委员会第五次评估报告[R]. IPCC, 2014. IPCC Fifth Assessment Report[R](in Chinese).
- 姜大膀,苏明峰,魏荣庆,等,2009.新疆气候的干湿变化及其趋势预估[J].大气科学,33(1):90-98. Jiang D B, Su M F, Wei R Q, et al, 2009. Variation and projection of drought and wet conditions in Xinjiang[J]. Chin J Atmos Sci, 33(1): 90-98(in Chinese).
- 李红梅,周天军,宇如聪,2008.近四十年我国东部盛夏日降水特性变化分析[J].大气科学,32(2):358-370. Li H M, Zhou T J, Yu R C, 2008. Analysis of July—August daily precipitation characteristics variation in eastern China during 1958-2000[J]. Chin J Atmos Sci, 32(2): 358-370(in Chinese).
- 马柱国,符淙斌,2005.中国干旱和半干旱带的10年际演变特征[J].地球物理学报,48(3):519-525. Ma Z G, Fu C B, 2005. Decadal variations of arid and semi-arid boundary in China[J]. Chin J Geophys, 48(3): 519-525(in Chinese).
- 毛炜峰,孙本国,王铁,等,2006.近50年来喀什噶尔河流域气温、降水及径流的变化趋势[J].干旱区研究,23(4):531-538. Mao W Y, Sun B G, Wang T, et al, 2006. Change trends of temperature, precipitation and runoff volume in the Kaxgar River Basin since recent 50 years[J]. Arid Zone Res, 23(4): 531-538(in Chinese).
- 毛炜峰,姚俊强,陈静,等,2019.1961—2017年东帕米尔高原极端升温过程气候变化特征[J].干旱区研究,36(6):1368-1378. Mao W Y, Yao J Q, Chen J, et al, 2019. Change characteristics of extreme temperature-rising process in the East Pamirs during 1961—2017[J]. Arid Zone Res, 36(6): 1368-1378(in Chinese).
- 努尔帕提曼·买买提热依木,帕尔哈提·阿不都拉,2015.帕米尔高原塔什库尔干县1960—2014年气温及降水变化[J].沙漠与绿洲气象,9(增刊):54-58. Maimaitieyimu N, Abudula P, 2015.

- Temperature and precipitation changes in Tashkurgan County of Pamir Plateau from 1960 to 2014[J]. *Desert Oasis Meteor*, 9 (Supplement): 54-58(in Chinese).
- 热孜宛古丽·麦麦提依明, 杨建军, 刘永强, 等, 2016. 新疆近 54 年气温和降水变化特征[J]. *水土保持研究*, 23(2): 128-133. Maimaitiyiming R, Yang J J, Liu Y Q, et al, 2016. Characteristics of changes in temperature and precipitation in Xinjiang in recent 54 years[J]. *Res Soil Water Conserv*, 23(2): 128-133(in Chinese).
- 尚华明, 范煜婷, 张瑞波, 等, 2021. 帕米尔高原东部径流量变化及其对气候变化的响应[J]. *气候变化研究进展*, 17(3): 352-360. Shang H M, Fan Y T, Zhang R B, et al, 2021. Streamflow variation in the eastern Pamirs and its response to climate change[J]. *Climate Change Res*, 17(3): 352-360(in Chinese).
- 王宝灵, 1997. 中国西北地区 6 月降水量最近 30 年明显递增[J]. *气象*, 23(6): 37-39. Wang B L, 1997. A distinct increase of rainfall amount in June in Northwest China in recent 30 years[J]. *Meteor Mon*, 23(6): 37-39(in Chinese).
- 王澄海, 张晟宇, 李课臣, 等, 2021. 1961—2018 年西北地区降水的变化特征[J]. *大气科学*, 45(4): 713-724. Wang C H, Zhang S N, Li K C, et al, 2021. Change characteristics of precipitation in Northwest China from 1961 to 2018[J]. *Chin J Atmos Sci*, 45(4): 713-724(in Chinese).
- 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等, 2004. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析[J]. *气象学报*, 62(2): 228-236. Wang Z Y, Ding Y H, He J H, et al, 2004. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years[J]. *Acta Meteor Sin*, 62(2): 228-236(in Chinese).
- 魏凤英, 2007. 现代气候统计诊断与预测技术: 第 2 版[M]. 北京: 气象出版社: 63-64. Wei F Y, 2007. *Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technique* 2nd Ed[M]. Beijing: China Meteorological Press: 63-64(in Chinese).
- 严中伟, 丁一汇, 翟盘茂, 等, 2020. 近百年中国气候变暖趋势之再评估[J]. *气象学报*, 78(3): 370-378. Yan Z W, Ding Y H, Zhai P M, et al, 2020. Re-assessing climatic warming in China since the last century[J]. *Acta Meteor Sin*, 78(3): 370-378(in Chinese).
- 杨金虎, 杨启国, 姚玉璧, 等, 2006. 西北东部夏季干湿演变及环流特征[J]. *气象*, 32(10): 94-101. Yang J H, Yang Q G, Yao Y B, et al, 2006. Analysis of drought and moist evolution and circulation features over the east of Northwest China in summer[J]. *Meteor Mon*, 32(10): 94-101(in Chinese).
- 杨维西, 2008. 全球变化中的中国干旱区——响应与趋势[J]. *林业科学*, 44(8): 124-130. Yang W X, 2008. China's arid regions in the global change: response and trend[J]. *Sci Silv Sin*, 44(8): 124-130(in Chinese).
- 魏世博, 姜大膀, 范广洲, 2017. 中国降水的季节性[J]. *大气科学*, 41(6): 1191-1203. Yao S B, Jiang D B, Fan G Z, 2017. Seasonality of precipitation over China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 41(6): 1191-1203(in Chinese).
- 玉苏甫·阿布都拉, 马宏武, 买买提·阿布都拉, 等, 2006. 和田河流域气候变化特征分析[J]. *气象*, 32(4): 97-100. Abudula Y, Ma H W, Abudula M, et al, 2006. Analysis of climatic changes in Hetian River Valley[J]. *Meteor Mon*, 32(4): 97-100(in Chinese).
- 曾磊, 2012. 基于 RS 和 GIS 的东帕米尔高原冰川近 40 年来的变化研究[D]. 兰州: 兰州大学. Zeng L, 2012. The glacier variations research in the eastern Pamirs Plateau during the last 40 years [D]. Lanzhou: Lanzhou University(in Chinese).
- 曾磊, 杨太保, 田洪阵, 2013. 近 40 年东帕米尔高原冰川变化及其对气候的响应[J]. *干旱区资源与环境*, 27(5): 144-150. Zeng L, Yang T B, Tian H Z, 2013. Response of glacier variations in the eastern Pamirs Plateau to climate change, during the last 40 years[J]. *J Arid Land Resour Environ*, 27(5): 144-150(in Chinese).
- 张先恭, 李小泉, 1982. 本世纪我国气温变化的某些特征[J]. *气象学报*, 40(2): 198-208. Zhang X G, Li X Q, 1982. Some characteristics of temperature variation in China in the present century[J]. *Acta Meteor Sin*, 40(2): 198-208(in Chinese).
- 左洪超, 吕世华, 胡隐樵, 2004. 中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析[J]. *高原气象*, 23(2): 238-244. Zuo H C, Lv S H, Hu Y Q, 2004. Variations trend of yearly mean air temperature and precipitation in China in the last 50 years[J]. *Plateau Meteor*, 23(2): 238-244(in Chinese).
- Alifujiang Y, Abuduwalli J, Ge Y X, 2021. Trend analysis of annual and seasonal river runoff by using innovative trend analysis with significant test[J]. *Water*, 13(1): 95.
- Alifujiang Y, Abuduwalli J, Maihemuti B, et al, 2020. Innovative trend analysis of precipitation in the Lake Issyk-Kul Basin, Kyrgyzstan[J]. *Atmosphere*, 11(4): 332.
- Caloiero T, Coscarelli R, Ferrari E, 2018. Application of the innovative trend analysis method for the trend analysis of rainfall anomalies in southern Italy[J]. *Water Resour Manag*, 32(15): 4971-4983.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [C]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Jiang D B, 2008. Projected potential vegetation change in China under the SRES A2 and B2 scenarios[J]. *Adv Atmos Sci*, 25(1): 126-138.
- Kendall M G, 1938. A new measure of rank correlation[J]. *Biometrika*, 30(1-2): 81-93.
- Mann H B, 1945. Nonparametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 13(3): 245-259.
- Şen Z, 2012. Innovative trend analysis methodology [J]. *J Hydrol Eng*, 17(9): 1042-1046.
- Şen Z, 2014. Trend identification simulation and application [J]. *J Hydrol Eng*, 19(3): 635-642.
- Şen Z, 2017. Innovative trend significance test and applications [J]. *Theor Appl Climatol*, 127(3): 939-947.

(本文责编:俞卫平)