

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230812

基于多种趋势分析方法的降水演变趋势分析

李昕阳^{1, 2}, 杜军凯², 胡新功³, 仇亚琴², 刘海滢²

(1. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046; 2. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038;
3. 伊犁水文勘测局, 新疆 伊犁 835000)

摘要: 为了解决现有降水趋势分析方法无法同时检测低、高值区雨量趋势的问题, 引入创新性趋势分析法 (ITA), 并与传统趋势分析方法联合应用。以 1961~2020 年伊犁河流域站点数据为例, 将 ITA 与 Mann-Kendall (MK) 系列、Theil-Sen 等 7 种方法进行对比分析。结果表明, 伊犁河流域站点年降水量整体呈增加趋势, 流域北部除霍城站和伊宁县站、南部除昭苏站外, 其余站点高值区雨量增加趋势显著; 北部霍尔果斯站与伊宁县站、南部巩留站与特克斯站极端降水强度大小呈集中趋势。ITA 与传统趋势分析方法相比, 可以体现雨量变化范围并检测低、中、高值区雨量的变化趋势, 因此将 ITA 与传统趋势方法联合, 对整体雨量与高低区雨量同时进行趋势分析, 有助于更全面地解析伊犁河流域降水变化规律。

关键词: Mann-Kendall 趋势检验; ITA 趋势分析; 降水趋势; 伊犁河流域

中图分类号: TV125; P333

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)10-0014-05

1 概况

伊犁河流域地处新疆西部的伊犁哈萨克自治州, 位于东经 $80^{\circ} 09' 42'' \sim 84^{\circ} 56' 50''$, 北纬 $42^{\circ} 14' 16'' \sim 44^{\circ} 53' 30''$ 之间, 流域面积 57 550.80 km²。流域内最高海拔 5 952 m, 最低海拔 532 m, 多种地貌类型并存(图 1)。年平均气温在 2.9~10.4 °C 左右, 年平均降水量变幅在 200~1 000 mm 之间。与国内其他地方相比, 降雨量在空间和时间上差异很大, 同时独特的地形地质及降雨量分布导致河流流量、洪水和干旱年际变化较大。因此, 分析伊犁河流域降水演变趋势具有重要意义。鉴于此, 本文融合 Theil-Sen、MK 系列、ITA 等

多种方法, 将研究区各站点数据序列从小到大排列, 并按取值大小平均分成三个区域(即低、中、高值区), 同时解析序列的整体与高、低值区的趋势变化, 旨在更全面地解析伊犁河流域降水变化规律。

2 研究数据与方法

2.1 数据选取

采用 1961~2020 年伊犁河流域霍尔果斯站、霍城站、察布查尔站等 10 个气象站点(图 1)逐日降水数据进行分析。

2.2 研究方法

目前的趋势分析方法通常以 Mann-Kendall (MK) 系列、Theil-Sen (Sen)^[1] 等为代表, 用于分析具有单调趋势的时间序列数据, 但其存在序列自相关的影响, 因此对传统 MK 法进行了前置移除、参数修正等改进, 见表 1。过度白化的非参数型趋势检验法 ITA^[2] 是一种直观的趋势检测方法, 若散点分布在 45° 线上方表示数据单调递增, 分布在该线附近则表示无趋势, 分布在该线下方表示单调递减; 散点离该线越远, 序列趋势越明

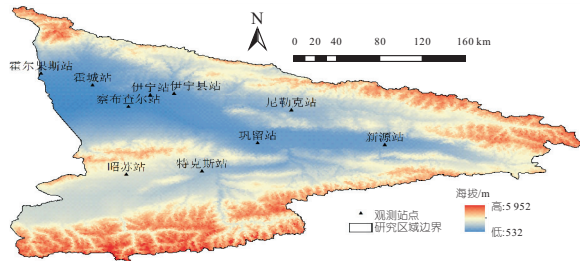


图 1 伊犁河流域研究区域

Fig. 1 Study area of the Yili River Basin

收稿日期: 2023-05-12, 修回日期: 2023-06-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52279030)

作者简介: 李昕阳(1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水资源评价, E-mail: xinyanglx. li@gmail. com

通讯作者: 杜军凯(1987-), 男, 博士、高级工程师, 研究方向为流域水资源循环及其伴生过程模拟, E-mail: du_djk@

表 1 MK 改进的方法及其优点

Tab. 1 MK improved method and its advantages

改进 MK 方法	优点	方法
PW-MK ^[1]	克服了由于时间序列正相关,而导致趋势显著性增加的问题	在趋势识别测试前对时间序列进行预置白化处理
TFPW-MK ^[3]	克服了在去除一阶自回归过程 AR(1)中导致改变现有趋势的问题	将趋势成分从数据中移除,在应用趋势检验前进行预白化修正方差去除时间序列的影响
MMK ^[4]	克服时间序列相关导致方差分布(S)离散度变化的问题	
BBS-MK ^[5]	基于计算机的统计推理方法,不需要依赖太多假设	将序列分为若干“块”,并以“块”为单位多次对数据块进行重新采样,从数据样本中观测到检验统计量 S 的显著性,来减轻数据集中心序列相关性的影响

显。Sen 方法与 MK 系列方法可检测序列的整体变化趋势,但不能同时解析高低值的变化特征,而 ITA 能够有效弥补这一缺陷。技术路线见图 2。

3 结果与分析

3.1 年降水量趋势分析

MK 及 Sen 方法得到的降水变化趋势分析结果见表 2。由表 2 可知,基于 Sen 方法所得研究区站点降水均呈增加趋势;MK、TFPW-MK、MMK、BBS-MK 趋势检测得到的检测结果一致,即除昭苏站外,其余站点降水量均在 99%置信区间内呈显著增加趋势;PW-MK 方法得到察布查尔站、昭苏站、特克斯站无显著增加趋势,伊宁站、巩留站、新源站在 95%的置信区间内呈显著增加趋势,剩余 4 个站在 99%置信区间内呈显著增加趋势。

ITA 方法得到的降水趋势如图 3,该方法得到的结果与表 2 中 MK 系列及 Sen 方法的结果

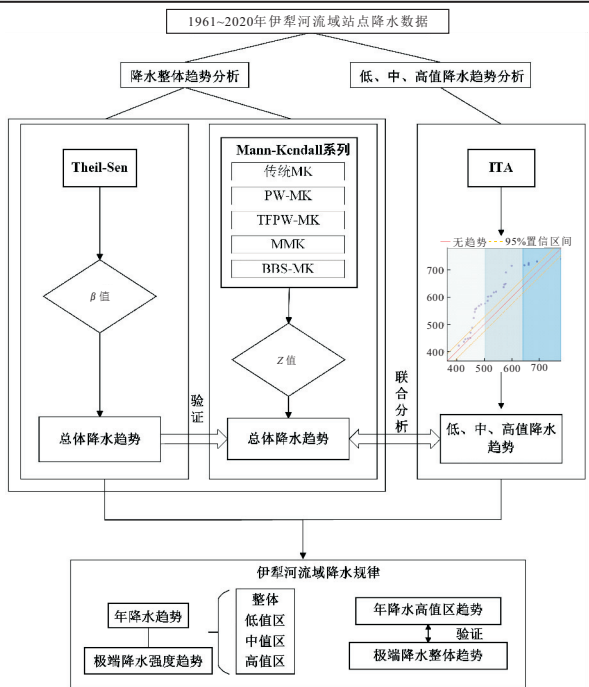


图 2 方法技术路线图

Fig. 2 Method technology roadmap

表 2 1961~2020 年降水量、极端降水量、极端降水强度趋势分析结果

Tab. 2 Analysis results of precipitation trend, extreme precipitation trend, and extreme precipitation intensity trend from 1961 to 2020

气象指标	站点	MK	PW-MK	TFPW-MK	MMK	BBS-MK	Sen	
降水量	霍尔果斯站	3.279(R)**↑	2.053(R)**↑	3.296(R)**↑	3.182(R)**↑	3.572(R)**↑	2.273↑	
	霍城站	3.391(R)**↑	1.857(A)↑	2.773(R)**↑	3.259(R)**↑	3.259(R)**↑	2.109↑	
	察布查尔站	3.609(R)**↑	2.145(R)**↑	3.322(R)**↑	4.840(R)**↑	3.623(R)**↑	1.781↑	
	伊宁站	3.983(R)**↑	2.682(R)**↑	3.963(R)**↑	3.935(R)**↑	3.935(R)**↑	2.921↑	
	尼勒克站	4.231(R)**↑	2.825(R)**↑	4.094(R)**↑	3.676(R)**↑	4.299(R)**↑	3.451↑	
	伊宁县站	2.769(R)**↑	2.393(R)**↑	2.838(R)**↑	2.647(R)**↑	2.647(R)**↑	2.081↑	
	巩留站	2.981(R)**↑	1.961(R)**↑	2.877(R)**↑	2.733(R)**↑	3.106(R)**↑	1.859↑	
	新源站	3.504(R)**↑	2.433(R)**↑	3.335(R)**↑	4.133(R)**↑	3.623(R)**↑	3.382↑	
	昭苏站	1.810(A)↑	1.138(A)↑	1.307(A)↑	1.55(A)↑	1.55(A)↑	1.325↑	
	特克斯站	3.516(R)**↑	1.870(A)↑	3.06(R)**↑	4.535(R)**↑	3.361(R)**↑	2.479↑	
	极端降水量	霍尔果斯站	2.430(R)**↑	1.818(A)↑	2.511(R)**↑	2.430(R)**↑	2.430(R)**↑	0.722↑
		霍城站	1.040(A)↑	0.719(A)↑	0.850(A)↑	1.658(A)↑	1.040(A)↑	0.331↑
察布查尔站		2.500(R)**↑	1.805(A)↑	2.341(R)**↑	2.500(R)**↑	2.500(R)**↑	0.643↑	
伊宁站		2.634(R)**↑	2.171(R)**↑	2.694(R)**↑	2.634(R)**↑	2.634(R)**↑	0.821↑	
尼勒克站		2.405(R)**↑	2.367(R)**↑	2.563(R)**↑	1.999(R)**↑	2.405(R)**↑	0.788↑	
伊宁县站		1.741(A)↑	1.583(A)↑	1.740(A)↑	1.741(A)↑	1.741(A)↑	0.594↑	
巩留站		3.310(R)**↑	2.485(R)**↑	3.100(R)**↑	3.310(R)**↑	3.310(R)**↑	0.816↑	
新源站		2.724(R)**↑	2.119(R)**↑	2.459(R)**↑	2.503(R)**↑	2.724(R)**↑	0.904↑	
昭苏站		0.453(A)↑	0.732(A)↑	0.706(A)↑	0.477(A)↑	0.453(A)↑	0.234↑	
特克斯站		1.894(A)↑	1.674(A)↑	1.988(R)**↑	2.644(R)**↑	1.894(A)↑	0.891↑	
极端降水强度		霍尔果斯站	1.397(A)↑	1.033(A)↑	1.243(A)↑	1.141(A)↑	1.397(A)↑	0.029↑
		霍城站	-0.281(A)↓	-0.353(A)↓	-0.366(A)↓	-0.308(A)↓	-0.281(A)↓	-0.004↓
	察布查尔站	1.212(A)↑	1.020(A)↑	1.046(A)↑	1.212(A)↑	1.212(A)↑	0.025↑	
	伊宁站	2.220(R)**↑	1.857(A)↑	2.080(R)**↑	2.331(R)**↑	2.220(R)**↑	0.047↑	
	尼勒克站	2.418(R)**↑	1.903(A)↑	2.302(R)**↑	2.418(R)**↑	2.418(R)**↑	0.059↑	
	伊宁县站	1.914(A)↑	1.138(A)↑	1.740(A)↑	1.914(A)↑	1.914(A)↑	0.047↑	
	巩留站	1.800(A)↑	1.478(A)↑	1.870(A)↑	2.296(R)**↑	1.800(A)↑	0.029↑	
	新源站	2.711(R)**↑	2.053(R)**↑	2.446(R)**↑	3.389(R)**↑	2.711(R)**↑	0.052↑	
	昭苏站	1.347(A)↑	0.994(A)↑	1.112(A)↑	1.676(A)↑	1.347(A)↑	0.018↑	
	特克斯站	1.640(A)↑	1.635(A)↑	1.609(A)↑	1.367(A)↑	1.640(A)↑	0.031↑	

注:R 为显著;A 为不显著;当 $|Z| < 1.96$ 时,表示没有显著趋势;如果 $|Z| \geq 1.96$,表明趋势在 0.05 的显著性水平上是显著的,记为 *;当 $|Z| \geq 2.58$,则表示趋势在 0.01 的显著性水平上是显著的,记为 **。

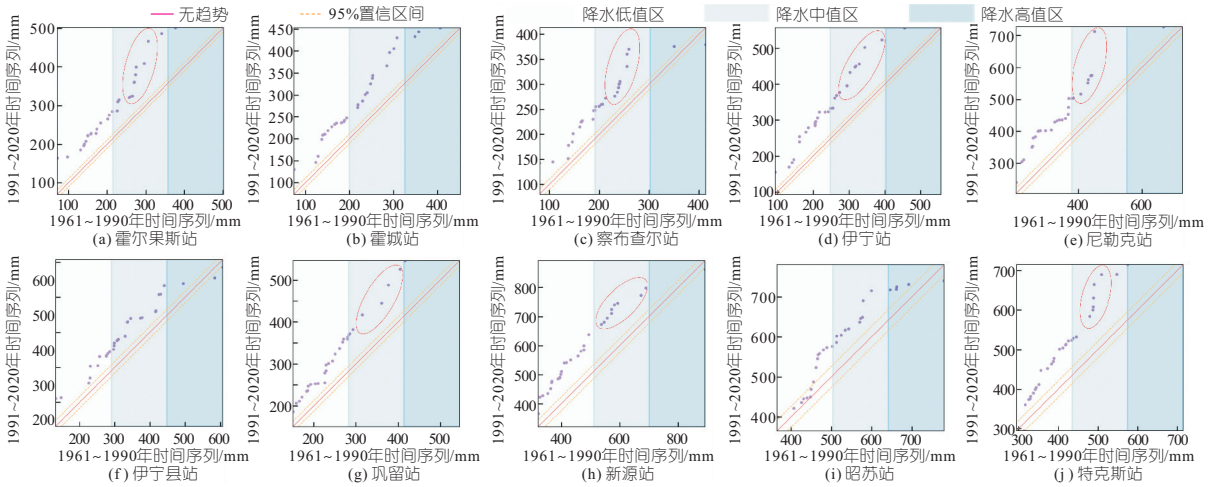


图 3 1961~2020 年伊犁河流域站点 ITA 降水趋势图

Fig. 3 ITA precipitation trend chart of Yili River Basin stations from 1961 to 2020

一致,站点的年降水量整体上位于上三角区域,即呈增加趋势。

由图 2 可知,ITA 法可以直观体现不同雨量的区域显著性趋势,且可以补充传统趋势分析结果,由表 2 数据可知,5 种 MK 分析法均得到昭苏站整体无显著趋势,但由 ITA 图可观测到昭苏站中、高值区仍存在显著增加趋势,将两类方法结合分析可使结果更严谨。图 3 中霍尔果斯站、察布查尔站、伊宁站、尼勒克站、巩留站、新源站、特克斯站降水量均分布在低、中雨量区,即前半时间序列的雨量值分布于全部时间序列雨量的低、中值区,说明近 30 年大雨量增加显著,为了验证 ITA 图分析结果的准确性,使用传统趋势分析方法分析站点极端降水的变化趋势。

3.2 极端降水趋势分析

将子样本的每日降水样本按升序排列,定义第 90 个百分位的日降水量为极端降水阈值,结果表明霍尔果斯站、霍城站、察布查尔站、伊宁站、尼勒克站、伊宁县站、巩留站、新源站、昭苏站、特克斯站极端降水阈值分别为 9.3、8.9、8.6、10.5、11.8、13.0、8.9、16.8、12.1、13.0 mm。其中霍尔果斯站、霍城站、察布查尔站、伊宁站、巩留站极端降水阈值小于 10.5 mm,尼勒克站、伊宁县站、新源站、昭苏站、特克斯站极端降水阈值高于 11.8 mm,该空间分布情况与研究区地形及水汽分布相关,由于强降水期间大西洋及红海均对研究区水汽供应有贡献,且天山海拔较高,因此在强西风的影响下,水汽平流输送减弱^[6],同时研究区处于水汽通量辐合区,向西开口的地形辐合和抬升,使汇聚的水汽产生向上的垂直运动,为局部地区产生极端降水提供了有利的动力辐合条件^[7]。

3.2.1 年极端降水量

年内累积日极端降水量在 1961~2020 年的变化趋势见表 2,Sen 估计得到研究区站点极端降水均呈增加趋势。5 种 MK 趋势法检验结果得到伊宁站、尼勒克站、巩留站、新源站极端降水有显著增加趋势,霍城站、伊宁县站、昭苏站极端降水无明显增加趋势;霍尔果斯站、察布查尔站除 PW-MK 方法未检测出明显增加趋势外,其他 4 种方法均得到明显增加趋势;特克斯站在 TFPW-MK、MMK 方法检测下呈明显增加趋势。由此可知,TFPW-MK、MMK 法检测结果与 ITA 年降水量图分析结果一致。

3.2.2 极端降水强度

极端降水强度为极端降水量与极端降水日的比值,其趋势结果见表 2。Sen 估计得到除霍城站极端降水强度有减少趋势,其余站点均为增加趋势。MK 检测结果与 Sen 估计结果一致,5 种方法均检测出霍城站极端降水强度有不显著下降趋势,新源站极端降水强度呈明显增加趋势;除 PW-MK 外,其他 4 种方法均检测出伊宁站及尼勒克站极端降水强度有显著增加趋势;巩留站极端降水强度除 MMK 方法检测出有明显增加趋势外,其他 4 种方法均未检测出明显趋势。

图 4 为 ITA 极端降水强度趋势图。由图 4 可知,伊宁站、尼勒克站、伊宁县站、新源站整体呈显著增加趋势,除伊宁县站外其余站的整体趋势分析结果与 MK 系列检测趋势结果一致,虽然 ITA 可以直观剖析更细节趋势变化,但在图 4 中结果均呈增加趋势的情况下,不能体现显著性大小及整体显著性趋势。因此,将 ITA 与 MK 系列结合分析表明,北部站点除霍尔果斯站极端降水强度中值区呈减少趋势外,其余站点中值区呈显

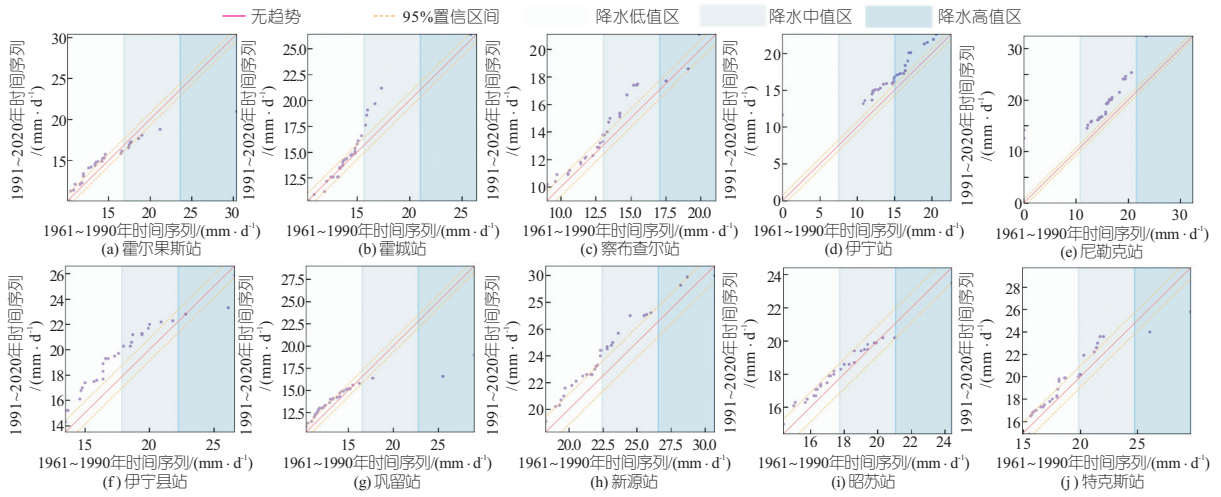


图 4 1961~2020 年伊犁河流域站点 ITA 极端降水强度趋势图

Fig. 4 ITA extreme precipitation intensity trend chart of Yili River Basin stations from 1961 to 2020

著增加趋势,霍城站的整体极端降水强度呈不显著下降趋势,伊宁站呈显著增加趋势,其余站点呈不显著增加趋势;南部尼勒克站和新源站极端降水强度整体呈显著增加趋势,其余站点无显著增加趋势,其中特克斯站中值区极端降水强度呈显著增加趋势。

北部霍尔果斯站与伊宁县站、南部巩留站与特克斯站高值区极端降水强度点在下三角区域,低值区的点在上三角区域,即极端降水强度的高值呈下降趋势,而较低值呈上升趋势,说明极端降水强度大小近年呈集中趋势,其中南部巩留站、北部霍尔果斯站、霍城站、察布查尔站、伊宁站极端降水强度稳定在 10~20 mm/d,北部尼勒克站、伊宁县站降水极端强度不同的原因可能与站点高程相关^[8]。

3.3 趋势检验方法适用性分析

统计 5 种 MK 方法检测到显著性变化的站点个数,各项趋势指标见表 3,站点年降水量与极端降水量均呈增加趋势;对于极端降水强度而言,除 BBS-MK 方法外,其他方法均检测出霍城站呈无显著减少趋势,其中 MK 与 TFPW-MK 检测显著性结果一致,PW-MK 检测出具有显著趋势的站点最少,站点间不存在包含关系。

表 3 各项趋势指标检验结果对比

Tab. 3 Comparison of test results of various

trend indicators

指标	MK		PW-MK		TFPW-MK		MMK		BBS-MK	
	增加	减少	增加	减少	增加	减少	增加	减少	增加	减少
年降水量	9/1	0/0	7/3	0/0	9/1	0/0	9/1	0/0	9/1	0/0
极端降水量	6/4	0/0	4/6	0/0	7/3	0/0	7/3	0/0	6/4	0/0
极端降水强度	3/6	0/1	1/8	0/1	3/6	0/1	4/5	0/1	3/7	0/0

注:表中格式为显著的个数/不显著的个数。

综上所述,不同 MK 方法得到的整体趋势结果一致,但显著性有所差异,这是由于站点的气象

数据存在某种趋势或自相关性,从而影响了趋势检验的结果。虽然 PW-MK 方法得到显著性趋势的站点最少,但其结果与 ITA 图观测结果差别较大,这恰恰验证了预白化后序列相关性虽降低,但有些趋势信息丢失^[9]的观点。ITA 图与 TFPW-MK、MMK 方法的检测结果高度一致,且 TFPW-MK 与 MMK 方法得到的显著性站点均可通过传统 MK 检验,TFPW-MK 相比 MMK 方法检测出显著性站点更少,更为严格,推荐使用 TFPW-MK 检测方法进行趋势检验。因此,在研究区使用 ITA 图直观观测低、中、高区域的趋势,并用 TFPW-MK 检验整体的趋势变化,融合了两种方法的优势,可使趋势检验分析更加严谨。

4 结论

a. 将 ITA 与 TFPW-MK 联合分析,可以得到整体及低、中、高值区的降水趋势变化,更适用于分析气候复杂的伊犁河流域。

b. 伊犁河流域降水整体呈增加趋势与已有结果基本一致,本文进一步分析得到,年降水量高值区除北部霍城、伊宁县站外其余站点增加显著;极端降水强度高值区在伊宁站、尼勒克站呈增加趋势,在霍尔果斯站、伊宁县站、巩留站、特克斯站呈下降趋势。

参考文献:

[1] 闫俊杰,闫敏,崔东,等.近 55 年新疆伊犁河谷气温和降水变化趋势分析[J].水电能源科学,2017,35(10):13-16,12.
 [2] ŞEN Z. Innovative trend analysis methodology[J]. Journal of hydrologic engineering, 2012, 17(9):

1042-1046.

[3] YUE S, WANG C Y. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test[J]. Water resources research, 2002,38(6):4-1-4-7.

[4] HAMED K H, RAO A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. Journal of hydrology, 1998, 204(1-4): 182-196.

[5] ÖNÖZ B, BAYAZIT M. Block bootstrap for Mann-Kendall trend test of serially dependent data[J]. Hydrological processes,2012,26(23):3552-3560.

[6] 王可丽,江灏,赵红岩. 中国西北地区水汽的平流输送和辐合输送[J]. 水科学进展,2006(2):164-169.

[7] 刘晶,周玉淑,杨莲梅,等. 伊犁河谷一次极端强降水事件水汽特征分析[J]. 大气科学,2019,43(5):959-974.

[8] 罗贤,许有鹏,徐光来. 基于遥测雨量数据的地形对降水特性的影响研究[J]. 水土保持通报,2012,32(2):90-95.

[9] DOUGLAS E M, VOGEL R M, KROLL C N. Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation[J]. Journal of hydrology, 2000, 240(1-2): 90-105.

Trend Analysis of Precipitation Evolution Based on Multiple Trend Analysis Methods

LI Xin-yang^{1,2}, DU Jun-kai², HU Xin-gong³, QIU Ya-qin², LIU Hai-ying²

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Yili Hydrological Survey Bureau, Yili 835000, China)

Abstract: In order to solve the problem that the current existing precipitation trend analysis methods cannot simultaneously detect precipitation trends in low and high value areas, this article introduces innovative trend analysis (ITA) and combines it with traditional trend analysis methods for analysis. Taking the station data of Yili River basin from 1961 to 2020 as an example, the ITA and Mann-Kendall (MK) series, Theil Sen and other seven methods are compared and analyzed. The results show that the annual precipitation of stations in Yili River basin, except Huocheng Station, Yining County Station and Zhaosu Station, increases significantly in other stations in high value areas, which is the same as the trend of annual extreme precipitation; The extreme precipitation intensity in the low and median areas of other stations shows an increasing trend, while the high value areas show a decreasing trend, and the overall trend is increasing; The ITA can reflect the range of rainfall changes and detect the trend changes of rainfall in low, medium, and high value areas. Therefore, the combination of ITA and traditional trend method to conduct trend analysis on the overall rainfall and rainfall in high and low regions simultaneously will help to more comprehensively analyze the precipitation change law of Yili River basin.

Key words: Mann-Kendall trend test; innovative trend analysis; precipitation trend; Yili River basin

(上接第 13 页)

Evolution Characteristics of Extreme Dry Events in China's Main Grain Production Areas Based on Analysis of Agricultural Drought Conditions

HUANG Jin, LIU Yi-bo, ZHANG Fang-min

(School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on the agricultural drought-affected rate of 13 major grain producing provinces in China from 1980 to 2019 and the daily rainfall data, the climate-causing loss intensity (CCLI) were extracted using H-P filtering, and its responses to dry-days indices (DDI) and large-scale atmospheric-ocean indices (LAOI) were explored. The correlation analysis between CCLI of each province and DDI in different months indicated that summer drought had the higher contribution to the disaster situation, especially the total number of dry days in July was identified as the primary drought-causing factors (PDCF) in 10 provinces. The PDCF in Henan, Jiangsu, Hubei, Inner Mongolia, Jilin, and Liaoning all showed a significant strengthening trends, indicating the intensification of drought risk in the key month of summer; The fluctuation of PDCF in each province had a main cycle of 2-3 years; At the time-lag of 0-12 months, circulation signals such as North Atlantic Oscillation, Pacific Warm Pool, and Arctic Oscillation had the significant impacts on the drought situation. This study can provide scientific basis for regional drought monitoring and early warning.

Key words: agricultural drought-affected rate; H-P filtering; dry-days indices; large-scale atmospheric-ocean indices