

基于 TRMM 数据的祁连山大气降水时空分布特征

薛 健^{1,2}, 李宗省¹, 李宗杰¹, 桂 娟^{1,2}

(1.中国科学院 西北生态环境资源研究院 高寒山区同位素生态水文与环境保护观测研究站/
甘肃省祁连山生态环境研究中心/内陆河流域生态水文重点实验室,兰州 730000; 2.中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:根据 TRMM3B43 卫星检测的大气降水数据信息,同时结合祁连山地区气象站点实测数据信息,分析两者相关系数和误差等指标进行 TRMM 降水数据的精度检验,并结合 Mann-Kendall 突变检验分析祁连山大气降水的变化特征。最后检验结果表明:(1) TRMM3B43 数据在该地区整体上精度较高,适用性良好,其中 TRMM 降水数据同该地区气象站点的测量数据在年尺度下相关系数为 0.79,在月尺度下的相关系数为 0.74,季尺度下的整体精度略低,在冬季的相关系数仅为 0.44,有明显的低值高估现象;(2) 祁连山地区降水的空间分布大致上呈自东向西递减的趋势且年内季节分配不均;(3) 通过 Mann-Kendall 突变检验,发现近 21 年内研究区的年均降水量和季均降水量均变化复杂,并在近几年呈现上升的趋势。

关键词:TRMM; 时空变化; 精度检验; 降水量; 祁连山

中图分类号:P426.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)01-0204-07

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Precipitation in Qilian Mountains Based on TRMM Data

XUE Jian^{1,2}, LI Zongsheng¹, LI Zongjie¹, GUI Juan^{1,2}

(1.Observation and Research Station of Eco-Hydrology and Environmental Protection by Stable Isotope Tracing in High and Cold Mountainous Areas /Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin/
Gansu Qilian Mountains Ecology Research Center, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract:Based on the atmospheric precipitation data of TRMM3B43 satellite and the measured data of meteorological station, the accuracy test of TRMM precipitation data was carried out by analyzing the correlation coefficient, error and other indicators. The variation characteristics of atmospheric precipitation in Qilian mountains were analyzed with the Mann-Kendall mutation test. The results show that: (1) TRMM3B43 precipitation data in Qilian mountains area has high overall precision, good applicability, including TRMM precipitation data from stations on the measured data in yearly scales and monthly scales of the correlation coefficient of 0.79 and 0.74, respectively, the overall precision of seasonal scales is slightly low, the correlation coefficient is only 0.44 in winter, there is obvious low overestimate phenomenon; (2) the spatial distribution of precipitation in Qilian Mountains is generally decreasing from east to west, and the seasonal distribution is uneven; (3) through the Mann-Kendall mutation test, it was found that both the annual average precipitation and the seasonal average precipitation in the study area in the past 21 years had changed in a complex way, and had shown the upward trend in recent years.

Keywords:TRMM; Spatial and temporal change; Accuracy test; Precipitation; Qilian mountains

收稿日期:2020-01-15

修回日期:2020-03-19

资助项目:国家“万人计划”青年拔尖人才项目;第二次青藏高原综合科学考察研究项目“生态安全屏障功能与优化体系”(2019QZKK0405);中国科学院青年创新促进会优秀会员项目(2013274);中科院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金和黄土与第四纪地质国家重点实验室项目(SKLLQG1814)

第一作者:薛健(1996—),男,陕西榆林人,硕士研究生,主要从事寒区水文水资源研究。E-mail:627476950@qq.com

通信作者:李宗省(1984—),男,甘肃白银人,副研究员,博士,主要从事寒区同位素水文与气候变化研究。E-mail:627476950@qq.com

大气降水作为全球水循环的重要环节,是维持全球生态系统稳定的物质基础^[1],也是气象气候等研究领域的重要研究对象。因此,获取高精度的降水资料对于认识和了解陆地表面过程以及制定相应水利管理措施具有重要意义^[2]。目前国内已有不少学者利用 TRMM 3B43 降水数据在我国高寒山区开展了相关研究,齐文文等^[3]研究表明了青藏高原降水自东南向西减少的分布规律;王晓杰等^[4]研究表明 TRMM 数据在天山及周边地区具有很好的适用性;吴雪娇等^[5]分析验证了 TRMM 多卫星数据在黑河流域的适用性。祁连山位于西北内陆地区,海拔较高,对气候变化的响应非常明显。国内学者对于祁连山地区降水的研究主要集中在时空分布以及结合同位素分析降水的化学与环境意义方面,例如,虞敏等^[6]研究分析了近 30 a 祁连山南坡降水量年内分配与汛期降水量的变化特征;马兴刚等^[7]结合大气降水中的稳定同位素研究分析了祁连山的水汽来源及输送过程,而关于降水数据精度检验和变化趋势方面的研究较少^[8]。祁连山作为西北地区不可或缺的生态屏障,验证该区域降水数据精度并分析其时空分布特征,对该地区的气候监测及分析、生态系统保护和区域可持续发展具有重要意义^[9],以期为祁连山等高寒地区的生态环境保护和资源开发等提供必要的气象理论支持。

1 研究区概况

祁连山(36°30'—39°30'N, 93°30'—103°E)位于我国西北青海与甘肃两省的交界地带,东西绵延约 1 000 km,南北宽 200~400 km,西端在当金山口与阿尔金山脉相接,东至黄河谷地与秦岭、六盘山相连,北抵河西走廊,南至柴达木盆地。祁连山地区有三分之一的山脉海拔高于 4 000 m,祁连山最高峰为团结峰,海拔 5 828.6 m^[10]。祁连山以青海湖和哈拉湖为界被分为东、中、西三段。祁连山区具有大陆性气候与高山气候的特征,年均降水量 300~700 mm 左右,是一座天然“高山水塔”,同时也是我国河西内陆水系、青海内陆水系以及黄河上游水系的发源地^[11-12]。祁连山区分布有大量现代冰川及森林草原,是河西走廊绿洲灌溉的主要水源,因此,祁连山地区的气候变化会对当地社会经济发展产生重要影响^[13]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文的数据来源为 TRMM(Tropical Rainfall Measurement Mission)3B43 卫星检测的大气降水数据信息以及祁连山地区气象站点实测数据信息。本

研究选用了 1998—2018 年 TRMM3B43 V7 月尺度降水数据,其空间分辨率高达 0.25°×0.25°,有效监测范围为南北纬 50°之间。气象台站实测降水数据来自于中国气象科学数据共享服务网站,包括 1998—2018 年研究区内 20 个气象台站各月降水数据,时间尺度与遥感数据相一致,台站分布情况如图 1 所示。

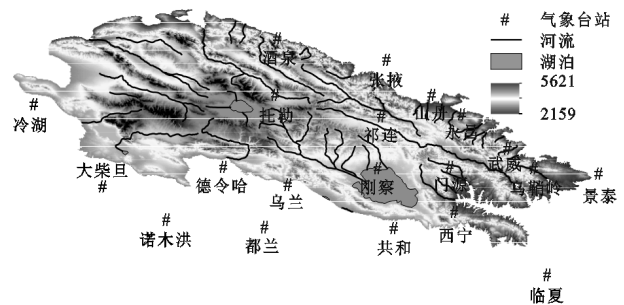


图 1 研究区范围及气象台站分布

2.2 研究方法

2.2.1 TRMM 降水数据预处理 本研究下载的原数据格式为 NetCDF,首先在 ArcGIS 软件中将其转换为栅格格式的 TIF 文件,然后按照研究区进行裁剪,由于 TRMM3B43V7 原始月降水数据为降水强度(mm/h),所以应该先按照各月天数累加,最终得到逐月降水量,转换公式如下^[14]:

$$P_i = T_i \times d_i \times 24$$

式中: P_i 为第 i 月降水量(mm); T_i 为降水强度(mm/h); d_i 为第 i 月的天数。

2.2.2 精度检验 本文使用相关系数(R)、相对误差(ME)、均方根误差(RMSE)和相对误差(BIAS)等指标来对该卫星降水精度进行检测。 R 的范围为 $[-1, 1]$ 用来表明 TRMM 降水数据和台站实测降水数据的相关程度^[15];ME 用于验证 TRMM 降水数据与台站实测数据的偏差,取值范围为 $(-\infty, +\infty)$,0 为最优值^[16]。相对误差指标可反映卫星和气象站点所测得的数据偏离程度,其值越小则说明 TRMM 所测数据越准确^[17];均方根误差所反映的是 TRMM 和气象站点所测数据之间的整体偏差情况,其值越小则说明两者所测的数据之间越接近^[18]。

2.2.3 Sen's 斜率估计与 Mann-Kendall 突变检验 本研究采用 Sen's 斜率估计方法,在一定显著性水平 α 下完成统计量检验,得到变化率的范围,根据其值大小来完成时间序列变化趋势判断。Sen 公式为^[19]:

$$\text{Sen}_{ij} = \text{MEDIAN} \frac{(x_j - x_i)}{(j - i)}$$

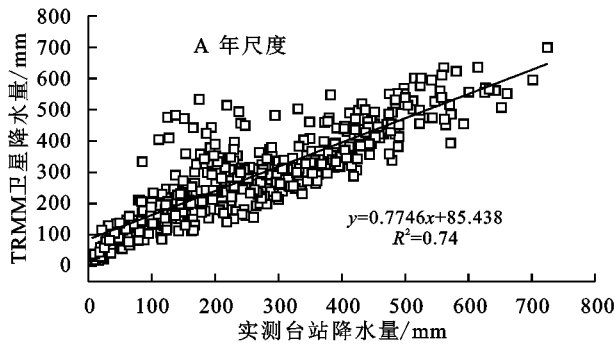
式中: Sen_{ij} 中 Sen 为斜率; x_i 和 x_j 分别为第 i 和第 j 时刻的序列值, $1 < i < j < n$, n 为序列长度。若斜率 > 0 ,表示呈上升趋势;若斜率 < 0 ,表示呈下降趋势。

Mann-Kendall 检验法是由学者 Mann 等人提出的一种非参数检验方法,在该方法提出之后,气象领域诸多学者开始利用此方法来对降水量等环境要素时间序列变化趋势进行分析和研究^[20]。MK 突变检验检测结果受干扰较小,可较为精确的表示时间序列的变化趋势^[21-22]。

3 结果与分析

3.1 TRMM 降水数据时间尺度评估

首先,将祁连山范围内 20 个气象站点从 1998 年



1 月—2018 年 12 月的所有气象站点的实测月降水数据作为自变量,相应的 TRMM 降水数据作为因变量进行一元线性回归分析,得到相关关系如图 2 所示,并计算其相关系数和相对误差^[23]。由计算可知,TRMM 和气象站点所测降水数据在年尺度上相关系数为 $R^2=0.79$ 和相对误差 $\text{Bias}=9.24\%$ 。该相关系数可以说明两者之间具有较为显著的相关性,而通过相对误差结果体现出了 TRMM 降水量值大于气象站点实测降水量值,即存在高估现象。

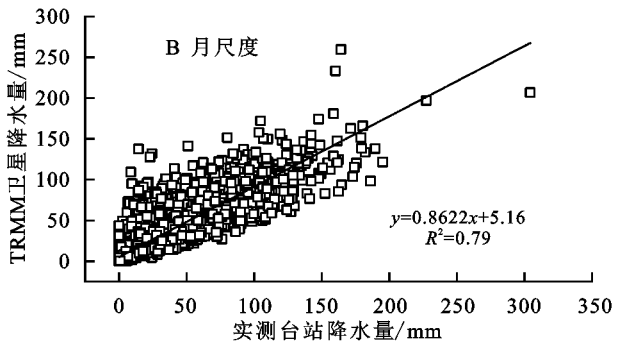


图 2 年尺度与月尺度散点图

其次,利用上述内容中研究区内 20 个站点 1998—2018 年的气象站点实测数据和 TRMM 降水数据,按季节累加可得到季尺度降水数据(春季 3 月、4 月、5 月;夏季 6 月、7 月、8 月;秋季 9 月、10 月、11 月;冬季 12 月、翌年 1 月、2 月)。从计算结果可以得知(图 3),春、夏两个季度的相关系数 R^2 均为 0.69,秋季的相关系数为 0.7,与其较为接近;而冬季的相关系数 R^2 较低仅有 0.44,春、夏、秋 3 个季度的

TRMM 降水数据与实测站点数据相关性较为良好,而在降水较少的冬季,TRMM 降水数据与实测站点数据的相关性较差。各季度的相对误差分别为春季 9.8%、夏季 7.79%、秋季 7.85%和冬季 31.3%。从上述结果可以看出,除冬季之外的 3 个季度,TRMM 降水数据与实测站点降水数据相比均存在轻微的高估现象;而冬季 TRMM 和气象站点所测降水数据误差较大,说明 TRMM 降水数据在冬季存在严重的高估现象。

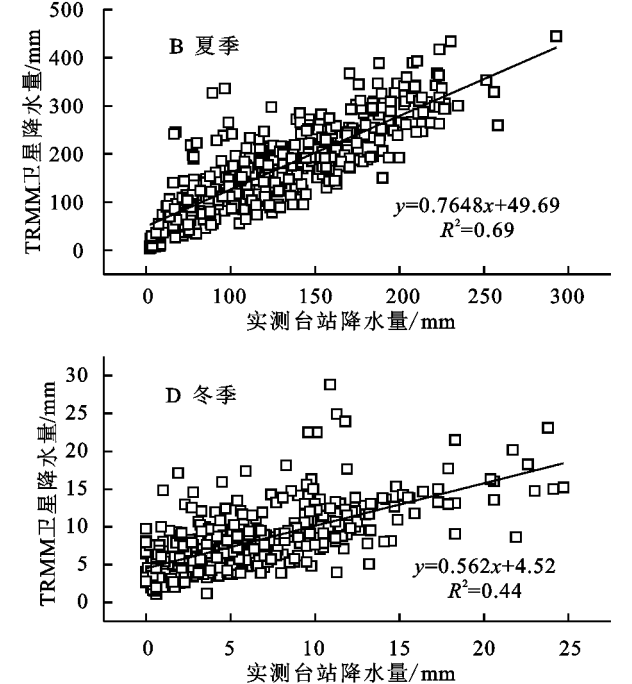
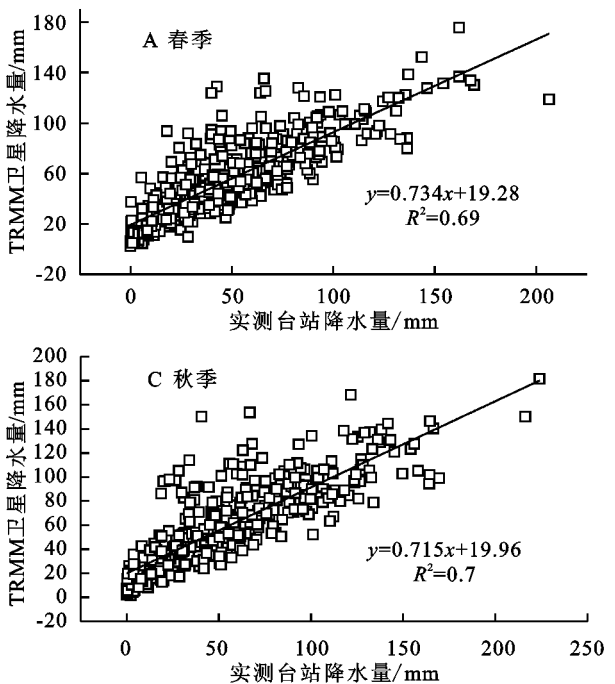


图 3 季尺度散点图

将月尺度的 TRMM 降水数据和实测站点降水数据按年份进行累加,可以得到分别得到 1998—2018 年的逐年 TRMM 和气象站点所测降水数据。分析可知年尺度下两者的相关系数为 0.74,略低于月尺度,但仍具有较高的相关性。而相对误差 Bias 值为 9.32%,与月尺度下的误差较为接近,也反映了高估的现象。

就整体而言,TRMM3B43 降水数据在时间尺度上的验证精度较为良好,还需进一步就空间尺度进行检验。

3.2 TRMM 降水数据空间尺度评估

本文计算了研究区范围内 20 个气象站点实测数据与 TRMM 降水数据的相关系数(R)、平均误差(ME)和均方根误差(RMSE)。根据检测结果可知(表 1),TRMM 和气象站点所测降水数据在整体上相关性良好,除武威、冷湖和诺木洪之外,其余台站的相关系数 R 均在 0.8 以上。台站实测数据与 TRMM 降水数据的平均误差在托勒、刚察、西宁、乌鞘岭、共和、临夏和德令哈出现了负值,说明 TRMM 降水数据存在被站点低估的现象,而在其他站点则存在一定高估现象,其中对 TRMM 降水数据高估最严重的站点为武威,两者之间误差为 21.1 mm。除此之外对 RMSE 分析发现,除武威、永昌之外,其余台站的均方根误差均在 30 mm 以内,说明整体上各个台站 TRMM 降水数据与实测数据的一致性较为良好,偏离程度较低。

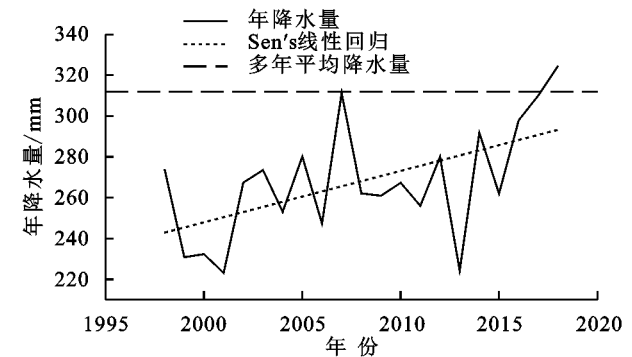


图 4 年降水量及其距平/年际变化

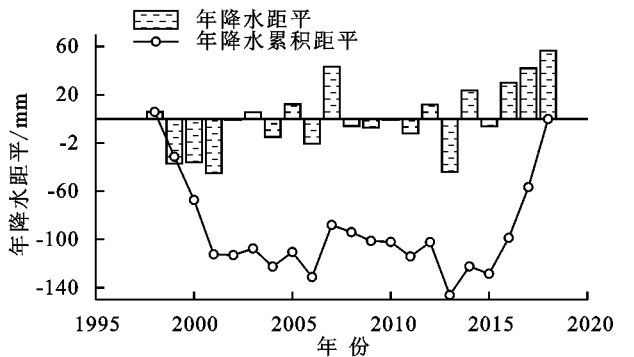
祁连山地区的降水具有季节分配不均的特征,春、夏、秋、冬四季的平均降水量分别为 48.36 mm, 158.77 mm, 54.92 mm 和 5.97 mm,分别占年均降水总量的 18.03%, 59.22%, 20.48% 和 2.22%。由此可以看出,祁连山地区夏季降水量占全年降水比重最大,春季和秋季的降水较为接近,冬季的降水量最低。由图 5 可以看出,祁连山地区年内降水变化明显,5—9 月是全年降水的集中阶段,各月降水均在 30 mm 以上,占到了年降水总量的 85.63%,其中,降水最多

3.3 时空特征

3.3.1 时间分布特征 经计算,研究区的多年平均降水量为 268.08 mm,通过 Sen's 斜率分析和距平可知,近 21 a 的降水量呈现出波动上升的趋势,上升速率为 3.05 mm/(10 a)($p<0.05$)(图 4)。这也与孙美平等^[24]的研究结果相一致。

表 1 1998—2018 年 TRMM 降水与实测台站降水精度评估

编号	站点	海拔	R	ME/mm	RMSE/mm
1	大柴旦	3173.2	0.87	0.06	6.7
2	托勒	3367.0	0.90	-2.60	14.6
3	祁连	2787.4	0.92	2.90	24.3
4	刚察	3301.5	0.96	-2.80	18.9
5	门源	2850.0	0.92	0.95	15.2
6	永昌	1926.9	0.87	10.50	37.5
7	武威	1513.5	0.73	21.10	74.4
8	西宁	2770.0	0.95	-2.20	12.8
9	乌鞘岭	3043.9	0.92	-6.20	24.4
10	冷湖	2770.0	0.75	1.50	5.6
11	酒泉	1477.2	0.81	5.90	20.9
12	张掖	1461.4	0.83	6.50	24.9
13	乌兰	2951.0	0.90	1.10	13.3
14	都兰	3189.0	0.94	4.50	17.8
15	山丹	1764.6	0.88	4.80	18.2
16	景泰	1630.9	0.81	5.40	24.0
17	临夏	1917.2	0.90	-1.40	17.3
18	诺木洪	2790.4	0.77	5.70	20.3
19	共和	2835.0	0.91	-0.80	13.1
20	德令哈	2981.5	0.91	-1.90	15.5



的月份是 7 月,达到了 58.22 mm。总体而言,祁连山各月降水大致是以 7 月为中心呈对称分布。

3.3.2 空间分布特征 祁连山大致呈西北东南走向,由于受到地形和大气环流的影响,降水量空间分布不均,整体上由西北向东南递增。因为祁连山东部处于季风作用区,在夏季受到东南季风的影响,有大量水汽进入,山脉对气流产生阻挡,迫使气流抬升形成降水,降水量相对较大;而祁连山西部地区由于地形原因,降水较少,气候较为干旱^[25-26]。

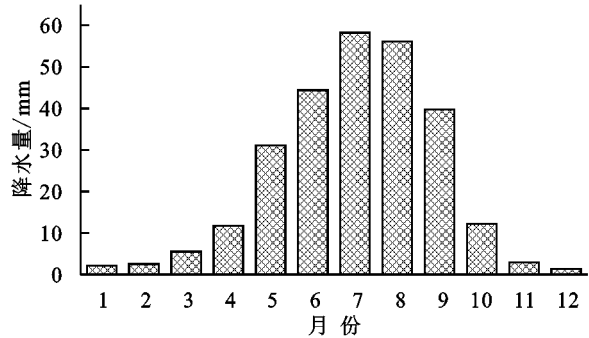


图 5 月均降水量分布

祁连山地区各个季节的降水空间分布具有一定差异。春季降水量的最大值出现在门源、西宁附近地区, 大约为 115 mm, 中西部降水稀少; 与春季相比, 夏季祁连山地区降水的高值范围扩大, 有向西移动的趋势, 最大降水高度带的海拔也明显上升, 主要集中在门源、西宁、刚察和祁连等地区, 最大值达到了 287 mm, 而西部地区降水依然较少; 秋季降水的空间分布几乎与春季一致, 区别为低值范围扩大, 高值范围减少, 降水依然主要集中于门源、西宁一带, 降水最大值为 114 mm, 基本与春季持平; 冬季的降水量最少, 最大值也仅为 12 mm 左右, 出现在东部的乌鞘岭与西部的德令哈附近, 中部地区降水最为稀少, 略低于西部地区。

3.4 突变检验

为了更加清楚地了解祁连山地区近 21 a 来降水量的变化规律, 本文对研究区 20 个气象台站的年尺度与季尺度降水进行了 Mann-Kendall 突变检验。

从分析结果发现(图 6), 祁连山地区年降水量的 UF 值在 1998—2001 年小于 0, 从 2002—2018 年 UF 值一直保持稳步上升, 甚至在 2017 年超过了临界值, 说明降水量有明显上升趋势。就季尺度而言, 春季与冬季降水的 UF 值整体较为平稳, 多年来围绕 0 值波动变化; 而夏季降水的 UF 值在经历了短暂的下降之后逐渐上升, 秋季降水的 UF 值在 21 a 来均大于 0。就突变情况而言, 年尺度下的降水量在 2016 年出现了一次突变, 突变后呈明显的上升趋势。春季降水量在 2001 年发生了第一次突变, 但之后的变化趋势不明显; 第二次突变出现在 2015 年, 之后呈现上升趋势但未超过临界值。夏季降水量突变从 2016 年开始, 一直呈上升趋势。秋季降水量从 1999 年起, 先呈上升趋势之后逐渐平稳; 在 2011 年发生第二次突变, 此次突变之后先有短暂下降趋势之后逐渐平稳。冬季降水量波动变化最为显著, 但未出现显著的上升或下降趋势。整体看来, 研究区范围内降水量体现出在 20 世纪末经过一段下降之后一直呈现上升的趋势。

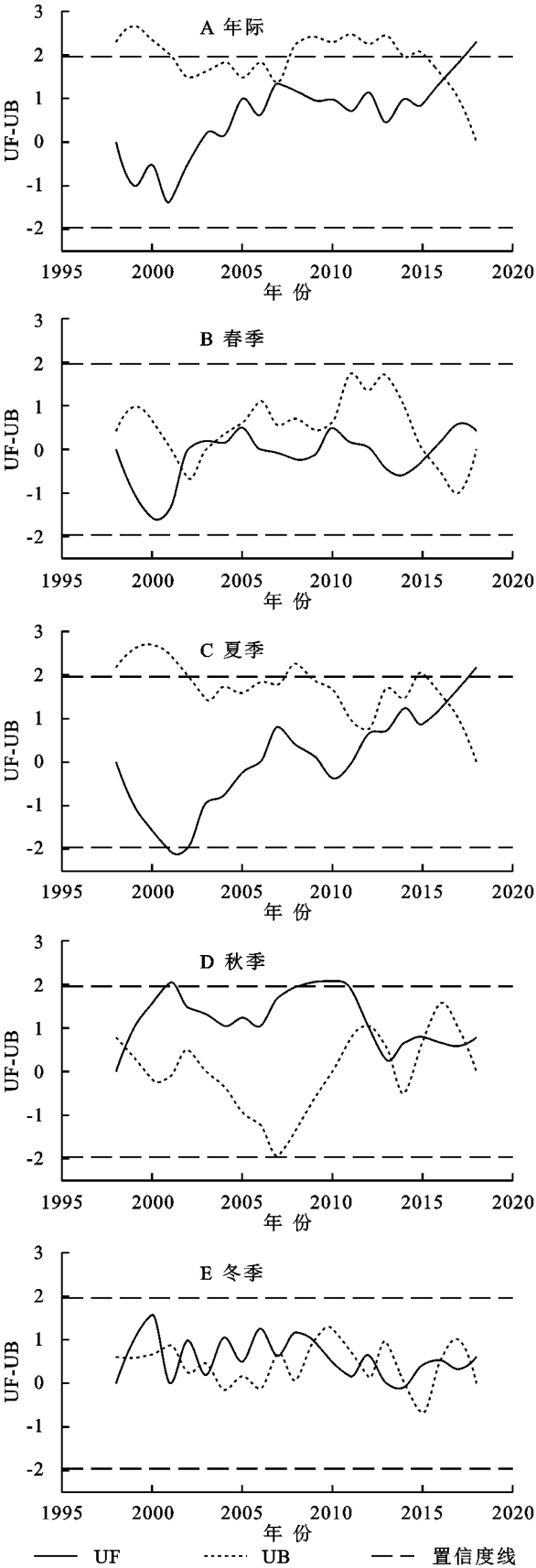


图 6 Mann-Kendall 突变检验

4 讨论

本文利用了 TRMM 3B43 卫星降水数据并结合祁

连山地区 1998—2018 年台站降水数据进行了精度检验,并对其时空分布特征与降水突变情况进行了研究。精度检验结果表明 TRMM 数据在祁连山地区适用性较好,在年尺度与月尺度上均与实测台站有较高的相关性,这与孙美平等^[24]关于祁连山最大降水高度带的研究结果基本相同。就整体而言,TRMM 数据在祁连山地区表现出了一定程度的高估现象,其中在冬季高估现象最为明显。另外,发现在这一时期内降水量整体上有波动上升的趋势,该研究结论与虞敏等^[6]和陈志昆等^[8]对祁连山降水研究的结论大致相同。而本文关于祁连山降水季节分布的研究结论也与王海军等^[27]利用 GIS 研究祁连山区降水时空变化的结论基本一致。目前,TRMM 卫星资料在低纬度地区的研究已经取得了一系列进展,例如嵇涛等^[28]验证了 TRMM 数据在川渝地区的精度;史婷婷等^[29]利用 TRMM 数据对于福建省降水进行了时空格局分析;Su 等^[30]结合 TRMM 资料,在南美洲拉普拉塔河流域帮助进行了水文模拟。而在较高纬度的高原地区,由于气候条件复杂、人迹罕至,气象站点的稀缺和损耗给精度验证带来了一定困难,还需要更多的研究结果来加以论证,因此在高原地区还需要投入更多的观测设备与研究精力来加深卫星对其探测效果的认知。总体而言,TRMM 卫星在中低纬度的探测结果较为准确,精度较高,有着良好的应用前景,在研究手段日益多元化的今天,可以考虑将 TRMM 数据的利用从小范围推至大尺度,从而能够对区域降水有更加全面与宏观的把握;而对于高原复杂地形区,可以考虑结合降尺度等一系列方法来进一步提高其精度^[31],为今后高原地带 TRMM 数据适用性研究提供更加准确的参考。

本文利用 TRMM 降水数据与实测台站数据进行了精度验证,但由于祁连山地区海拔较高、地形复杂,气象台站并未均匀分布在研究区内,对于缺少台站的部分区域,难以对其插值结果进行评估。因此,今后还需展开进一步深入的研究来加以验证。

祁连山地区降水呈现空间分布差异是由于东南暖湿气流提供大量水汽,而祁连山西段由于受到地形影响,导致降水量东西差异明显。从时间变化的角度来看,祁连山降水增加趋势的背后,实际上也是对全球气候变暖的响应,产生这一变化的原因可能是近年来祁连山地区局地农业开发导致灌溉面积扩大以及祁连山地区的植被覆盖情况呈现好转的趋势推动了当地“绿洲化”的过程,使得陆面实际蒸发和低层大气水含量增加,由此削弱了干燥区域雨滴降落时的蒸发效应,增强了临近区域降水频次^[32-33]。结合西北地区水资源总量缺乏的背景,降水量的增加推动了祁连山

地区的农业生产建设,但也要警惕并防范降水增加后可能带来的一系列地质灾害,因此,相关部门需要加强对气候变化的监测和灾害预警,减缓雪灾、洪涝等极端事件带来的危害。

5 结 论

(1) TRMM 卫星降水数据在祁连山地区整体精度良好,适用性较强,与实测台站数据的相关系数在年尺度和月尺度下分别为 0.74,0.79,在季尺度下的相关系数略低于年尺度和月尺度,其中在降水最少的冬季最低,仅为 0.44,相对误差达到了 31.3%,存在明显的低值高估现象。

(2) 从时空分布来看,祁连山地区降水量整体处于波动上升的变化趋势,一年中夏季降水所占比重最大,5—9 月的降水量占据了全年降水量的 80%以上;多年平均降水量分布由于受到地形和大气环流的影响呈现自东向西递减的趋势。

(3) 从 Mann-Kendall 突变检验分析来看,祁连山地区降水量在年尺度与季尺度上均表现出了一定的上升趋势,并出现了几次明显的突变增加,说明近 21 a 来祁连山地区降水整体在经历波动变化之后有增加的趋势。

参考文献:

- [1] 沈彬,李新功.塔里木河流域 TRMM 降水数据精度评估[J].干旱区地理,2015,38(4):703-712.
- [2] 金彩平. TRMM 卫星降雨数据空间降尺度校准及应用研究[D].南宁:广西大学,2018.
- [3] 齐文文,张百平,庞宇.基于 TRMM 数据的青藏高原降水的空间和季节分布特征[J].地理科学,2013,33(8):999-1005.
- [4] 王晓杰,刘海隆,包安明. TRMM 降水产品在天山及周边地区的适用性研究[J].水文,2014,34(1):58-64.
- [5] 吴雪娇,杨梅学,吴洪波,等. TRMM 多卫星降水数据在黑河流域的验证与应用[J].冰川冻土,2013,35(2):310-319.
- [6] 虞敏,曹广超,曹生奎,等.近 30 年祁连山南坡降水量变化特征分析[J].水土保持研究,2019,26(2):241-248.
- [7] 马兴刚,贾文雄,丁丹,等.祁连山东部大气降水 $\delta^{17}\text{O}$ 变化特征及水汽输送[J].干旱区地理,2019,42(3):517-525.
- [8] 陈志昆,张书余,雒佳丽,等.祁连山区降水气候特征分析[J].干旱区研究,2012,29(5):847-853.
- [9] 王万瑞.基于 TRMM 数据的中国西北降水时空变化研究[D].兰州:兰州大学,2018.
- [10] 贾文雄,李宗省.祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究[J].环境科学,2016,37(9):3322-3332.
- [11] 刘雪梅,张明军,王圣杰,等.2008—2014 年祁连山区夏季降水的日变化特征及其影响因素[J].地理学报,2016,71(5):754-767.

- [12] 郑勤,陈仁升,韩春坛,等.祁连山 TRwS204 与中国标准雨量筒降水观测对比研究[J].高原气象,2018,37(3):747-756.
- [13] 田洪阵.祁连山区现代冰川面积变化研究[D].兰州:兰州大学,2013.
- [14] 常远勇,侯西勇,毋亭,等.1998—2010 年全球中低纬度降水时空特征分析[J].水科学进展,2012,23(4):475-484.
- [15] 杨艳芬,罗毅.中国西北干旱区 TRMM 遥感降水探测能力初步评价[J].干旱区地理,2013,36(3):371-382.
- [16] Darand M, Amanollahi J, Zandkarimi S. Evaluation of the performance of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) estimation over Iran[J]. Atmospheric Research, 2017,190:121-127.
- [17] 李燕,周游游,胡宝清,等.基于 TRMM 数据的广西西江流域降水时空分布特征[J].亚热带资源与环境学报,2017,12(1):75-82.
- [18] 马金辉,屈创,张海筱,等.2001—2010 年石羊河流域上游 TRMM 降水资料的降尺度研究[J].地理科学进展,2013,32(9):1423-1432.
- [19] 李常斌,王帅兵,杨林山,等.1951—2010 年洮河流域水文气象要素变化的时空特征[J].冰川冻土,2013,35(5):1259-1266.
- [20] Kendall M G. Rank correlation methods[J]. British Journal of Psychology, 1990,25(1):86-91.
- [21] 黄秋霞,赵勇,何清.阿拉木图与乌鲁木齐夏季降水变化趋势对比分析[J].沙漠与绿洲气象,2013,7(2):34-38.
- [22] 刘闻,曹明明,宋进喜,等.陕西年降水量变化特征及周期分析[J].干旱区地理,2013,36(5):865-874.
- [23] 杨汪洋,贺炳彦,尚雨.基于 TRMM 降水数据的陕西省干旱分析[J].河南科学,2019,37(5):814-820.
- [24] 孙美平,张海瑜,巩宁刚,等.基于 TRMM 降水订正数据的祁连山地区最大降水高度带研究[J].自然资源学报,2019,34(3):646-657.
- [25] 李岩璞.祁连山地区降水气候特征及其成因分析研究[D].兰州:兰州大学,2008.
- [26] 贾文雄,何元庆,李宗省,等.祁连山及河西走廊气候变化的时空分布特征[J].中国沙漠,2008,28(6):1151-1155,1215.
- [27] 王海军,张勃,靳晓华.基于 GIS 的祁连山区气温和降水的时空变化分析[J].中国沙漠,2009,29(6):1196-1202.
- [28] 嵇涛,杨华,刘睿,等. TRMM 卫星降水数据在川渝地区的适用性分析[J].地理科学进展,2014,33(10):1375-1386.
- [29] 史婷婷,杨晓梅,张涛,等.基于 TRMM 数据的福建省降水时空格局 BME 插值分析[J].地球信息科学学报,2014,16(3):470-481.
- [30] Su F, Hong Y, Lettenmaier D P. Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis(TMPA)and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin[J]. Journal of Hydrometeorology, 2008,9(4):622-640.
- [31] 向朔育,李跃清.高原低涡研究和 TRMM 卫星资料应用的相关进展[J].高原山地气象研究,2011,31(1):74-78.
- [32] 任国玉,袁玉江,柳艳菊,等.我国西北干旱区降水变化规律[J].干旱区研究,2016,33(1):1-19.
- [33] 蒋友严,杜文涛,黄进,等.2000—2015 年祁连山植被变化分析[J].冰川冻土,2017,39(5):1130-1136.

~~~~~  
(上接第 203 页)

- [10] 朱金峰,周艺,王世新,等.1975—2018 年白洋淀湿地变化分析[J].遥感学报,2019,23(5):971-986.
- [11] 沈占锋,李均力,于新菊.基于协同计算的白洋淀湿地时序水体信息提取[J].地球信息科学学报,2016,18(5):690-698.
- [12] 中华人民共和国国土资源部. GB/T21010—2007,土地利用现状分类[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [13] 王秀兰,包玉海.土地利用动态变化研究方法探讨[J].地理科学进展,1999,18(1):83-89.
- [14] 刘瑞,朱道林.基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨[J].资源科学,2010,32(8):1544-1550.
- [15] 邬建国.景观生态学:概念与理论[J].生态学杂志,2000,19(1):42-52.
- [16] 邬建国.景观生态学:格局、过程、尺度与等级[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [17] 卢明龙.海河流域土地利用变化特征及趋势分析[D].天津:天津大学,2010.
- [18] 何鹏,张会儒.常用景观指数的因子分析和筛选方法研究[J].林业科学研究,2009,22(4):470-474.
- [19] 李边疆.土地利用与生态环境关系研究[D].南京:南京农业大学,2007.
- [20] 朱会义,何书金,张明.环渤海地区土地利用变化的驱动力分析[J].地理研究,2001,20(6):669-678.
- [21] 刘永强,龙花楼,黄淮海平原农区土地利用转型及其动力机制[J].地理学报,2016,71(4):666-679.
- [22] 薄文广,陈飞.京津冀协同发展:挑战与困境[J].南开学报:哲学社会科学版,2015(1):110-118.
- [23] 曾宪芷,杨跃军,张国红,等.对太行山绿化工程建设的思考[J].林业经济,2010(7):52-54,94.
- [24] 翟文侠,黄贤金.我国耕地保护政策运行效果分析[J].中国土地科学,2003,17(2):8-13.
- [25] 赵小汎,代力民,陈文波,等.耕地与建设用地变化驱动力比较分析[J].地理科学,2008,28(2):214-218.