

基于 TRMM 降水订正数据的祁连山地区 最大降水高度带研究

孙美平^{1,2}, 张海瑜¹, 巩宁刚¹, 闫露霞¹, 赵琳林¹

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究所, 兰州 730000)

摘要: 采用 TRMM 卫星反演月降水数据和气象台站实测降水数据, 通过误差评估等数理统计方法验证数据, 并结合 Kriging 法对 TRMM 降水数据进行订正, 以此研究了祁连山地区最大降水高度带的时空变化。结果表明: (1) TRMM 降水数据在祁连山地区的整体适用性较好。其中 TRMM 降水数据与台站实测值的年均降水量相关系数达 0.94; 季节平均降水量的相关系数分别为春季(0.87)、夏季(0.89)、秋季(0.88)、冬季(0.70)。(2) 祁连山地区 27 个气象台站实测值与 TRMM 降水数据的相关性较好, 但在个别台站误差较大且存在低值高估、高值低估的现象。(3) 祁连山地区年均降水量自东向西呈减少趋势。东、中、西三段最大降水高度带分别为 4100 m、4500 m、4700 m, 年均降水量的垂直变化率分别为 16.6 mm/100 m、10.8 mm/100 m、9.8 mm/100 m。(4) 1998-2016 年祁连山地区东、中、西三段降水量均呈波动增加, 最大降水高度带也呈波动上升趋势, 祁连山地区年内各季节最大降水高度带按夏、春、秋、冬的次序降低。

关键词: TRMM 降水; 最大降水高度带; 时空分布; 祁连山地区

大气降水是全球水汽循环与能量转换过程中最重要的环节, 是全球生态系统维持稳定的物质基础^[1]。因此进行降水的监测与预报对于区域气候分析、水资源评价以及水文过程模拟等研究都具有重要意义。而山区降水因其受地形、山脉走向、坡度和水汽来源方向等多种因素的影响, 使降水的垂直分布较复杂, 从而导致山区生态系统形成了复杂的垂直带性分异。针对山区降水的垂直分布规律诸多学者开展了研究, 并取得一定成果。李岩瑛等^[2]分析了祁连山地区不同降水强度的时空分布特征及其与海拔的关系, 发现小雨日数与海拔较为密切, 呈线性增长; 中雨以上与坡向、地理位置有关。赵成义等^[3]利用降水分区模型将新疆分为 6 个亚区, 以此分析新疆降水随海拔的变化特征, 研究发现: 在海拔低于 2500 m 的亚区, 降水随海拔近似呈线性分布型, 最大降水高度带在山顶; 海拔高于 2500 m 的亚区, 降水随海拔分布近似呈二次曲线型, 最大降水高度在山腰。王宁练等^[4]在祁连山北坡进行实地研究, 发现祁连山中段北坡最大降水高度带在 4500~4700 m 之间, 其最大降水量为 485 mm。众所周知祁连山地区以其特有的自然地理环境成为中国西北地区重要的生态屏障, 同时也是河西走廊等地区重要的水源补给区。在全球气候变暖的背景下, 研究其降水的垂直变化对于祁连山生态环境保护、水源涵养林建设和河西走廊社会经济发展具有极其重要的意义。

收稿日期: 2018-09-29; 修订日期: 2018-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41561016); 中国博士后科学基金项目 (2015M572619); 西北师范大学创新团队项目 (NWNNU-LKQN-14-4)

作者简介: 孙美平 (1982-), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 副教授, 主要从事寒区旱区气候变化及水文过程方面研究。

E-mail: sunmeiping1982@163.com

然而, 祁连山地区气象台站和雨量测点多分布于河谷等低海拔地区^[5-6], 山区和高海拔地区分布较少, 利用这样的台站数据来研究降水与海拔的关系存在一定的弊端^[7-8], 难以准确反映其分布规律。近年来随着卫星反演技术的发展, 利用卫星反演降水的技术也日渐成熟, 为研究降水提供了一种新的手段和更为稳定的平台。TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission) 于1997年11月在日本发射升空, 是由美国NASA (National Aeronautical and Spatial Administration) 与日本NASDA (National Space Development Agency) 共同开发的测雨实验卫星^[9], 自发射以来, 利用自身搭载的测雨雷达、红外扫描仪、微波成像仪等传感器向地球传回了大量高分辨率探测数据, 为与降水有关的研究提供了有力的数据保障^[10]。

相关研究表明, TRMM降水数据存在高值高估、低值低估的现象^[11], 在小尺度上则能够重现基于地面观测的降雨过程^[12], 资料整体在中纬度地区具有可用性^[13], 但存在一定误差^[14-16]。结合前人有关TRMM降水数据的研究不难发现, 在中国西部地区气象台站相对较少的情况下, 利用TRMM降水数据开展的降水研究已经趋于成熟。本文在结合前人研究的基础上利用相关性分析、误差评估等方法, 验证TRMM降水数据在祁连山地区的精度, 同时利用克里金插值方法校准TRMM降水数据, 探讨祁连山地区最大降水高度带时空变化特征, 以此为祁连山地区生态环境保护与资源开发利用提供必要的科学依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

祁连山位于青藏高原东北部, 处于青藏、内蒙古、黄土三大高原的交汇地带, 南北宽200~350 km, 东西长1200 km, 地理位置介于36°30'~39°30'N, 93°30'~103°E之间, 北连河西走廊, 南临柴达木盆地, 西与阿尔金山相接, 东至黄河谷地与秦岭、六盘山相连^[17]。祁连山由一系列NW走向的山脉和谷地组成(图1), 大部分山脉的海拔在4000 m以上, 最高峰疏勒南山的团结峰海拔为5826.8 m。因祁连山相对高差较大, 故形成了复杂的地貌形态, 如高山、积雪、冰川、山谷、盆地等, 以青海湖和哈拉湖为界将祁连山地区分为东(武威—拉脊山)、中(酒泉—德令哈)、西(鹰咀山—大柴旦)三段^[18]。祁连山气候具有明显大陆性气候与高山气候特征, 年均温5℃, 年均降水量约250 mm, 多集中在夏季, 且年降水量由东向西递减, 同时受地形影响, 祁连山地区多地形雨, 降水量随海拔的升高在一定高度内呈增加趋势^[2]。祁连山是石羊河、黑河、疏勒河三大内流河的主要水源补给区, 山区分布的大量现代冰川以及森林草原等为河流提供了充足的水源补给, 为河西走廊绿洲农业的发展提供了必要的水资源。

1.2 数据来源

本文选用数据包括气象台站降水实测值、TRMM降水数据以及研究区DEM高程数据。(1) 气象台站降水实测值来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>) (图1), 考虑到研究时间与空间的连续性, 选用27个气象台站的地面月值数据集, 使用与TRMM数据同时间序列的降水数据(1998-2016年)。(2) TRMM降水数据由美国NASA的God-dar数据分享中心提供(<https://mir-dor.gsfc.nasa.gov/cgi-bin>)。本文中选用TRMM卫星3B43V7版本的月降水数据, 时段为1998-2016年, 该数据空间分辨率为0.25°×0.25°, 时间分辨率为月, 空间范围为50°S~50°N、180°W~180°E, 数据时间跨度为1998年1月1日

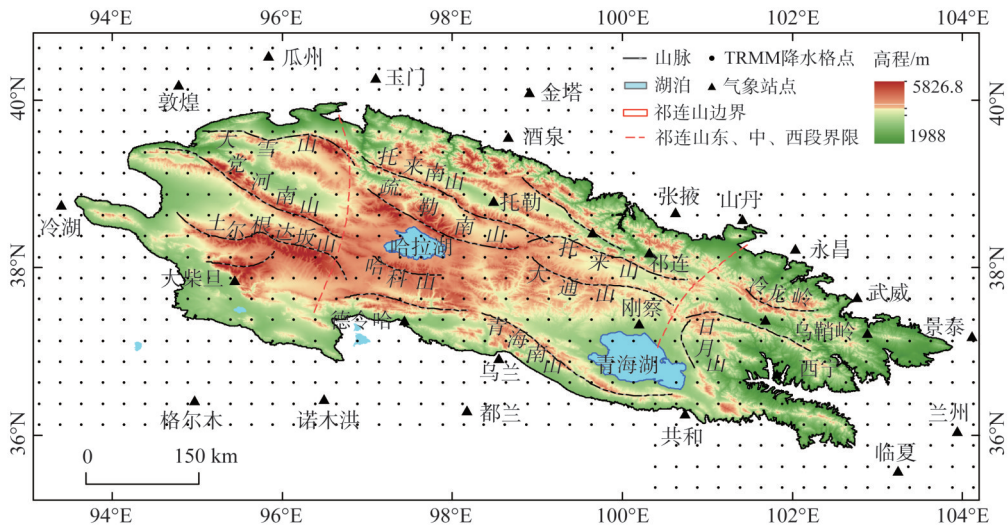


图1 祁连山地区及其台站位置

Fig. 1 General situation and station location of the Qilian Mountains

至2017年2月28日^[19-21]。(3) 研究区使用的DEM高程数据来自地理空间数据云 (<http://srtm.csi.cgiar.org/>)。

1.3 研究方法

1.3.1 基本方法

(1) 相关系数 R 。分析与验证TRMM降水数据与台站实测值两者的相关性, R 的取值范围为 $(-1, 1)$,当 R 值越接近1时,表示两组数据的相关性越好^[22-23]。(2) 平均误差 ME 。验证TRMM降水数据与台站实测值的偏差,取值范围为 $(-\infty, +\infty)$,最优值为0。正值为正偏差,表示TRMM降水数据高于台站实测值;负值为负偏差,表示TRMM降水数据低于台站实测值^[24]。(3) 均方根误差 $RMSE$ 。 $RMSE$ 反映TRMM降水数据与台站实测值的偏离程度,取值范围为 $[0, +\infty]$,最优值为0^[25]。

1.3.2 基本方法流程

(1) 利用MATLAB软件提取研究区范围内NetCDF格式的TRMM降水数据,并通过数理统计软件将其处理为年和月数据。(2) 在SURFER 12软件下将研究区范围内TRMM降水数据生成shapefile格式文件,进而将与气象台站对应位置的TRMM降水数据选取出来。(3) 对气象台站与对应TRMM降水格点的季节、年均降水数据进行对比分析,以此验证TRMM数据的精度。(4) 通过对应格点降水数据的精度检验获得TRMM降水数据在研究区内的误差分布数据,从而对研究区范围内的TRMM降水数据进行校准。(5) 利用TRMM降水订正数据与DEM高程数据开展祁连山最大降水高度带的时空分布研究。

2 结果分析

2.1 数据评估与订正

2.1.1 台站评估

降水的形成受地形、海拔、海陆分布等诸多因素影响。TRMM降水数据作为卫星反演降水产品与台站实测值相比存在一定误差^[22]。为验证TRMM降水数据的精度,本文计

算了祁连山地区 27 个气象台站实测值与 TRMM 降水数据的 R (相关系数)、 ME (平均误差) 和 $RMSE$ (均方根误差) (表 1)。得出各台站实测值与其对应 TRMM 降水数据相关性较高, 整体相关系数在 0.8 左右, 说明台站实测值与 TRMM 降水数据有较好的一致性。其中, 兰州站降水实测值与 TRMM 降水数据的 R 值最高, 达 0.93, 说明 TRMM 降水数据与台站实测值适用性最好。与之相对武威站台站实测值与对应 TRMM 降水数据的 R 值为 0.15, 说明 TRMM 降水数据在武威站的适用性较差。台站实测值与 TRMM 降水数据平均误差 (ME) 在德令哈、刚察、都兰、乌鞘岭等为负值, 表明 TRMM 降水数据在这些台站出现低估现象, 其中低估最严重的是临夏站, 约 61 mm。其余台站 TRMM 降水数据与台站实测值相比都有不同程度的高估, 其中张掖站高估最大, 达 172 mm。通过均方根误差的分析发现, TRMM 降水数据对瓜州、玉门、永昌、冷湖的预测较为准确, 与台站实测值相比误差在 25 mm 以内, 对张掖、大柴旦的预测误差最大, 均超过 100 mm。总体来看, TRMM 降水数据与台站实测值一致性较好, 但个别台站误差较大, 需进行数据精度订正。

表 1 祁连山地区 1998-2016 年 TRMM 降水与台站实测降水精度评价

Table 1 Precision evaluation of TRMM precipitation and measured data in Qilian Mountains during 1998-2016

| 编号 | 站名 | 海拔/m | R | ME/mm | $RMSE/mm$ | 编号 | 站名 | 海拔/m | R | ME/mm | $RMSE/mm$ |
|----|-----|--------|------|---------|-----------|----|-----|--------|------|---------|-----------|
| 1 | 敦煌 | 1118.5 | 0.86 | 2.9 | 9.6 | 15 | 大柴旦 | 3173.2 | 0.71 | 25.0 | 36.4 |
| 2 | 瓜州 | 1170.9 | 0.78 | 5.8 | 14.9 | 16 | 德令哈 | 2981.5 | 0.93 | -13.5 | 25.6 |
| 3 | 玉门 | 1526.0 | 0.92 | 8.8 | 17.6 | 17 | 刚察 | 3301.5 | 0.78 | -6.4 | 41.4 |
| 4 | 金塔 | 1249.5 | 0.71 | 33.9 | 40.1 | 18 | 门源 | 2850.0 | 0.89 | 19.1 | 35.4 |
| 5 | 酒泉 | 1477.1 | 0.84 | 58.6 | 61.1 | 19 | 格尔木 | 2807.6 | 0.82 | 64.9 | 68.1 |
| 6 | 张掖 | 1482.7 | 0.58 | 172.4 | 175.9 | 20 | 诺木洪 | 2790.4 | 0.73 | 53.7 | 58.1 |
| 7 | 山丹 | 1364.6 | 0.81 | 14.3 | 27.5 | 21 | 都兰 | 3191.1 | 0.80 | -24.2 | 42.9 |
| 8 | 武威 | 1531.5 | 0.15 | 85.1 | 102.2 | 22 | 共和 | 2835.0 | 0.68 | 15.9 | 38.7 |
| 9 | 临夏 | 1517.2 | 0.76 | -61.8 | 86.9 | 23 | 西宁 | 2295.2 | 0.95 | -2.9 | 18.9 |
| 10 | 乌鞘岭 | 3045.1 | 0.81 | -15.6 | 40.0 | 24 | 永昌 | 1926.9 | 0.88 | 4.9 | 18.9 |
| 11 | 景泰 | 1631.0 | 0.64 | 36.6 | 61.0 | 25 | 兰州 | 1630.9 | 0.93 | -5.4 | 54.1 |
| 12 | 冷湖 | 2770.0 | 0.71 | 11.9 | 14.2 | 26 | 乌兰 | 3087.6 | 0.49 | -40.8 | 68.4 |
| 13 | 托勒 | 3367.0 | 0.76 | 3.1 | 28.6 | 27 | 祁连 | 2787.4 | 0.69 | 38.4 | 70.8 |
| 14 | 野牛沟 | 3320.0 | 0.85 | -2.5 | 36.9 | | | | | | |

2.1.2 时间序列评估

祁连山地区降水季节分配不均^[26-27], 多集中在夏、秋季节, 5-10月降水量占全年降水量的 80%, 冬季降水最少, 仅 5%。由于祁连山地区降水的季节变化明显, 因此必须对 TRMM 年际、季节降水数据的精度进行验证。以 19 年的 TRMM 降水数据为自变量, 对应的台站实测值为因变量做一元线性回归分析 (图 2)。结果显示两套数据的相关系数 $R=0.94$, 通过了 0.01 显著性检验, 说明 TRMM 降水数据与台站实测值之间显著相关, 具有较好的一致性。通过观察发现当降水量 < 300 mm 时, 多数散点的降水实测值大于 TRMM 降水数据, 而降水量 > 300 mm 时, 多数散点的 TRMM 降水数据大于台站实测值。

祁连山地区气象台站的累年季节降水数据与对应的 TRMM 降水数据的线性拟合结果如图 3, TRMM 季节降水量与对应台站实测值相关性较好, 表明 TRMM 降水数据在各季

节具有较好的适用性。其中,夏季相关系数最高(0.89),其次是秋季(0.88)、春季(0.87),冬季相关性最低(0.70)。这可能由于春、夏、秋三个季节降水多以液态降水为主,而冬季为固态降水,导致卫星在反演过程中产生误差,使冬季降水的相关性降低^[16]。同时观察散点图1:1等量线分布可以看出,80 mm为春季台站实测值与TRMM降水数据的临界值,降水量<80 mm台站值大于TRMM值,降水量>80 mm后二者趋于一致,在秋季与冬季也出现了临界值,分别是70 mm与10 mm,说明在春、秋、冬三个季节TRMM降水数据出现了不同程度的低估,特别是降水量较低时。夏季多数散点沿1:1等量线分布,说明夏季TRMM降水数据与台站实测值最为接近。

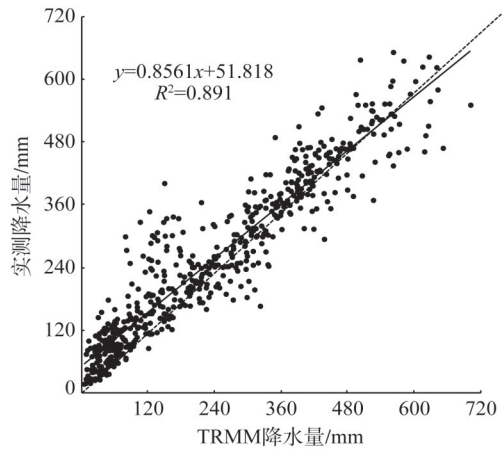


图2 祁连山地区台站降水与TRMM降水数据的拟合关系

Fig. 2 The fitting relationship between station precipitation data and TRMM precipitation data in Qilian Mountains

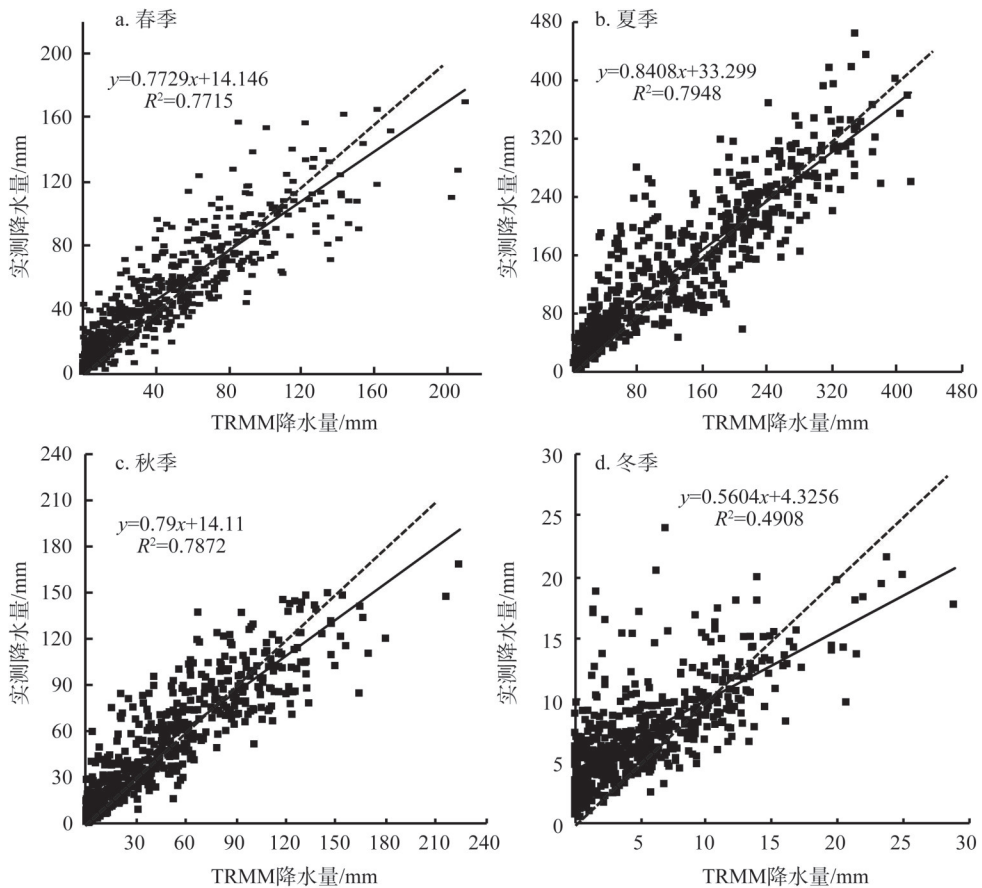


图3 台站降水与TRMM降水数据的季节拟合关系

Fig. 3 Seasonal fitting relationship between station precipitation data and TRMM precipitation data

2.1.3 数据订正

通过 TRMM 降水数据和台站实测值在时间(年均、季节)和空间梯度上的精度评估,发现二者相关性较好,但在部分台站以及冬季误差较大、相关性较低。以祁连山地区 27 个气象台站实测值为参照,选取对应地理位置的 TRMM 降水数据并计算二者的降水差值(图 4)。通过图 4 发现柴达木盆地与河西走廊降水低值区的差值为正,说明在这一区域 TRMM 降水数据出现了高估,相反,东南部季风区与祁连山内部降水高值区的误差为负值,说明在这些区域 TRMM 降水数据出现了低估。相较于低估,高估数值明显较大。

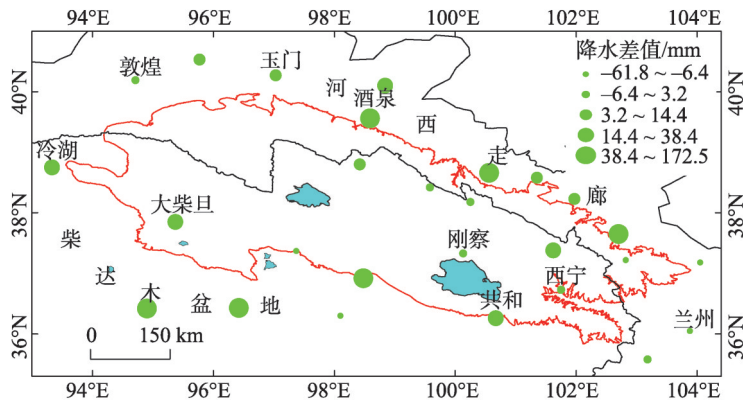


图 4 祁连山地区 TRMM 降水数据与气象台站实测值的降水差值空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the difference between TRMM precipitation and observed data of Qilian meteorological stations

为更好地获得准确的研究结果,需对 TRMM 降水数据进行订正。齐文文等^[28]基于 TRMM 降水数据在青藏高原的降水研究中利用差值、叠加方法准确校准了 TRMM 降水数据。因此,本文在对比多种插值方法后(表 2),选用普通 Kriging 法对降水实测值与 TRMM 降水数据的差额(图 5)进行插值。使用 SURFER 12 软件提取了祁连山及周围地区的差值格点数据,并与 TRMM 降水数据进行叠加,准确订正由 TRMM 反演的祁连山地区年平均降水量与季节降水量。

2.2 TRMM 订正数据在祁连山地区最大降水高度带分析

2.2.1 祁连山地区最大降水高度带的空间分布

1998-2016 年 TRMM 降水数据总体呈自东南向西北递减趋势,东、中段年均降水量分别为 309.8 mm、243.7 mm,而西段年均降水量仅为 50.3 mm。年均降水量除存在自东南向西北递减趋势外,也存在坡向差异,位于东段的冷龙岭南侧门源年均降水量超过 400 mm,而北侧永昌仅 200 mm,中段走廊南山南、北两侧的祁连与张掖降水量分别为 435.3 mm、131.3 mm,西段大雪

表 2 不同插值方法在祁连山地区降水误差精度评价
Table 2 Precision evaluation of precipitation in Qilian Mountains with different interpolation methods

| 插值方法 | <i>R</i> | <i>ME</i> /mm | <i>RMSE</i> /mm |
|-------|----------|---------------|-----------------|
| 普通克里金 | 0.996 | 4.9 | 15.4 |
| 反距离加权 | 0.995 | 7.7 | 17.5 |
| 最小曲率 | 0.992 | 5.1 | 20.1 |
| 移动平均 | 0.961 | 7.4 | 45.3 |

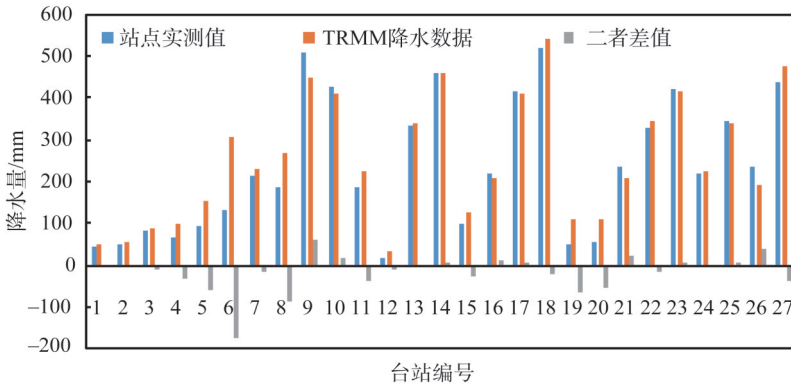


图5 TRMM降水数据、台站实测值及二者差额分布

Fig. 5 TRMM precipitation data, station measurements data and the difference between them

山南、北两侧同一高度南侧降水量均大于北侧 (图6)。

祁连山地区最大降水高度带分布存在南、北坡差异, 最大降水高度带均在山脉南侧。东段最大降水高度带出现在门源以北的冷龙岭南坡, 海拔为4100~4200 m, 降水量为592.1 mm; 中段最大降水高度带出现在走廊南山南坡的4500~4600 m, 降水量为533.6 mm; 西段在雪山南坡形成最大降水高度带, 海拔为4700~4800 m, 降水量为373.5 mm。TRMM降水数据在祁连山东、中、西三段的海拔变化 (图7), 通过计算发现祁连山东段海拔2700~4300 m (最大降水高度带) 范围内降水量增加了266.8 mm, 降水的垂直变化率为16.6 mm/100 m。相比东段, 中段和西段的降水垂直变化率只有10.76 mm/100 m和9.8 mm/100 m, 说明随着海拔的升高, 东段降水变化速率明显高于中段与西段。出现最大降水高度带后, 降水量随海拔的增加呈下降趋势, 东、中、西三段降水变化率分别为8.23 mm/100 m、12.25 mm/100 m和20.25 mm/100 m。

2.2.2 祁连山地区最大降水高度带的年际变化

1998-2016年TRMM降水数据在祁连山地区最大降水量与最大降水高度年际变化如图8, 发现祁连山东段 (图8a) 最大降水高度带在1998-2016年呈上升趋势, 最大海拔超过了4500 m, 并逐渐稳定在4100 m左右; 而东段降水量的年际变化较大, 1998-2007年

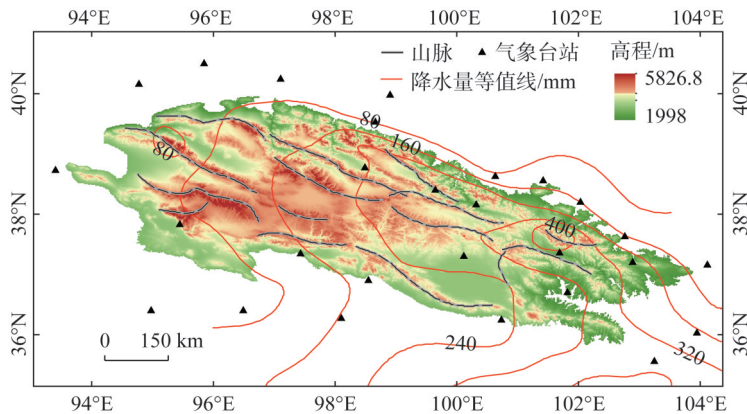


图6 1998-2016年TRMM年均降水量空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of average annual TRMM precipitation during 1998-2016

呈现上升趋势, 2007年之后波动较大, 但逐渐稳定在700 mm左右。从图8b可以看出, 祁连山中段最大降水高度带在波动中上升, 降水量有所增加。与东、中段相比, 西段(图8c)最大降水高度带变化较为稳定, 最大降水高度带稳定在4700 m左右, 降水量约300 mm。

2.2.3 祁连山地区最大降水高度带的季节分布

图9为1998-2016年祁连山地区四季降水量分布。如图所示, 祁连山地区春季(图9a)降水量普遍较低, 最大值出现在东段的门源北部山区(172.9 mm), 最大降水高度带在4100 m左右; 与祁连山东段相比, 中段与西段降水量较少, 中段在100 mm左右, 西段为47.7 mm, 其最大降水高度带分别为3500 m和4500 m。夏季(图9b)祁连山地区东段最大降水高度带大致海拔4100 m, 降水量368.1 mm; 中段最大降水高度带海拔在4200 m左右, 降水量为320.1 mm; 西段最大降水高度带海拔在4700 m上下, 降水量为198.8 mm, 夏季降水量都明显增加, 最大高度带海拔也明显升高。秋季(图9c)祁连山地区整体降水量显著下降, 区内最大降水高度带仍出现在门源一带, 大致海拔高度为3800 m, 降水量为148.5 mm; 中段与西段最大降水高度带海拔分别出现在3800 m、4600 m, 降水量分别为113.7 mm、57.6 mm。与其他季节相比冬季(图9d)降水量最少, 整个祁连山地区平均降水量仅7.1 mm, 最大降水量为9.6 mm, 出现在冷龙岭南侧3700 m左右。通过对祁连山地区四季最大降水高度带分析可以看出, 祁

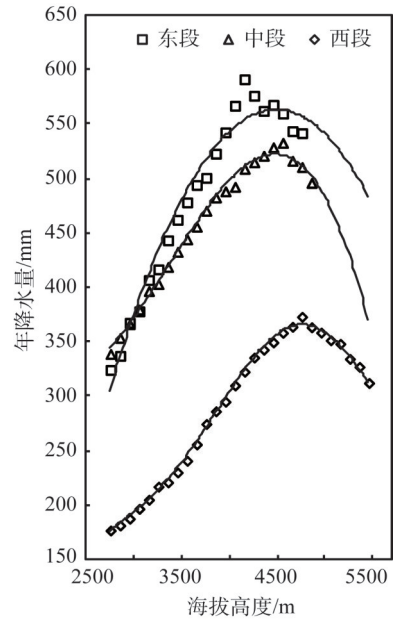


图7 TRMM降水在祁连山东、中、西三段海拔变化

Fig. 7 Altitudinal variations of TRMM precipitation in east, middle and west of the Qilian Mountains

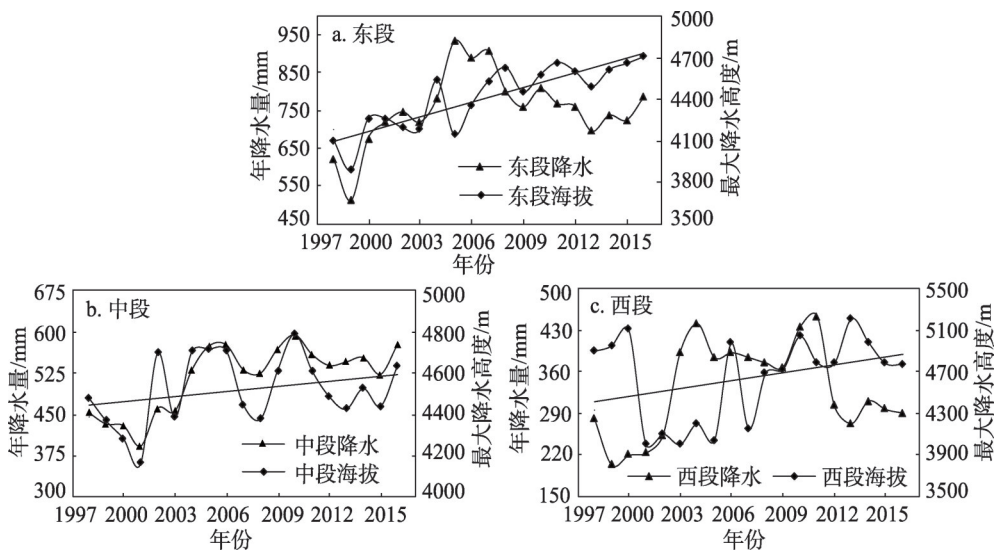


图8 1998-2016年祁连山东、中、西三段最大降水高度带及最大降水量变化

Fig. 8 Variations of maximum precipitation height zone and maximum precipitation in east, middle and west of Qilian Mountains during 1998-2016

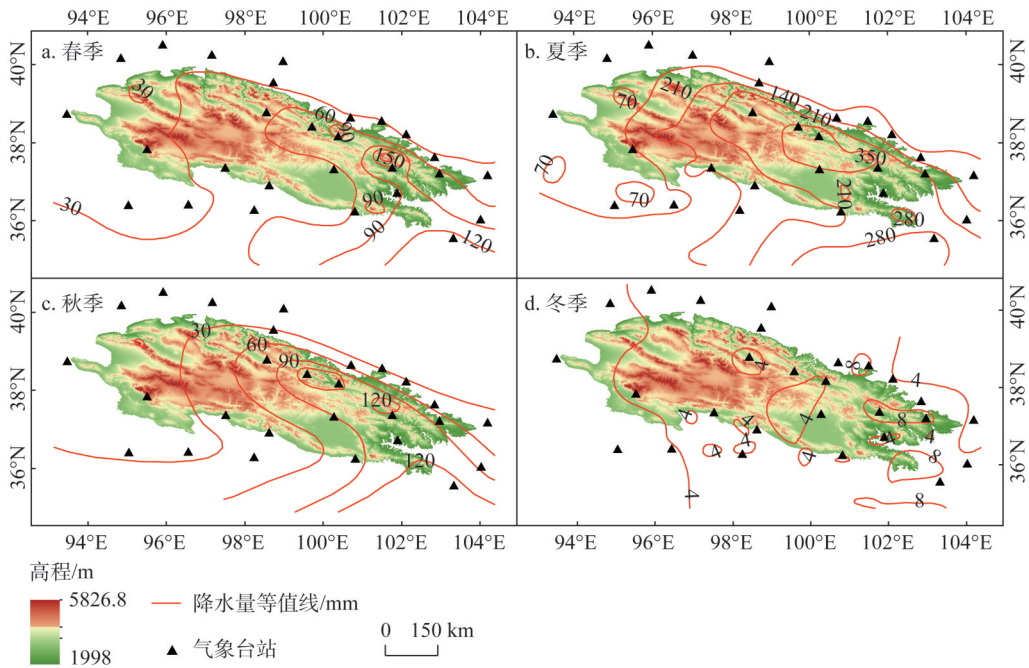


图9 祁连山地区各季节降水量空间分布

Fig. 9 Spatial variations of seasonal precipitation in Qilian Mountains

连山最大降水高度带在东、中、西三段都有明显的季节变化，其中夏季最大降水高度带海拔最高，其次是秋季、春季，冬季最低。

3 结论

本文通过对TRMM降水数据在祁连山地区的数据验证与精度订正，研究了基于订正后TRMM降水数据在祁连山地区最大降水高度带的时空变化，得到以下结论：

(1) TRMM降水数据在祁连山地区的验证表明，TRMM降水数据与台站实测值除少数台站误差较大外，总体相关性较好，时间梯度（年均、季节）的台站实测值与TRMM降水数据相关性较好。

(2) 通过对祁连山地区最大降水高度带的空间分布研究表明，东、中、西三段最大降水高度带分别为4100 m、4500 m和4700 m，降水量分别为592.1 mm、533.6 mm和373.5 mm。

(3) 祁连山地区降水量随海拔变化存在明显的变化规律。随海拔增加，东、中、西三段降水量变化率分别为16.6 mm/100 m、10.7 mm/100 m、9.8 mm/100 m，出现最大降水高度带后降水量开始减少，东、中、西三段降水变化率分别为8.2 mm/100 m、12.3 mm/100 m和20.3 mm/100 m。

(4) 近19年来祁连山地区年降水量呈增加趋势，同时最大降水高度带也有所升高。最大降水高度带的季节变化呈现出随降水量增加而升高的趋势，且与年均最大降水高度带空间分布规律一致。

祁连山地区作为我国西北重要的生态屏障，具有特殊的降水环境，这决定了祁连山

在我国西北地区的重要性, 祁连山地区降水量的变化将直接影响西北地区的生态水文过程。本文基于 TRMM 降水数据, 通过数据验证与精度订正, 对祁连山地区最大降水高度带时空分布进行了研究。由于祁连山地区气象台站分布较少, 且 TRMM 降水数据的订正方法上还存在一定缺陷, 导致降水数据存在一定的误差, 因此祁连山地区 TRMM 降水数据的高精度校正工作有待进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 沈彬, 李新功. 塔里木河流域 TRMM 降水数据精度评估. 干旱区地理, 2015, 38(4): 703-712. [SHEN B, LI X G. Accuracy assessment of TRMM3B43 data in Tarim River Basin. *Arid Land Geography*, 2015, 38(4): 703-712.]
- [2] 李岩瑛, 张强, 许霞, 等. 祁连山及周边地区降水与地形的关系. 冰川冻土, 2010, 32(1): 52-61. [LI Y Y, ZHANG Q, XU X, et al. Relationship between precipitation and terrain over the Qilian Mountains and their ambient areas. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(1): 52-61.]
- [3] 赵成义, 施枫芝, 盛钰, 等. 近 50 a 来新疆降水随海拔变化的区域分异特征. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1203-1213. [ZHAO C Y, SHI F Z, SHENG Y, et al. Regional differentiation characteristics of precipitation changing with altitude in Xinjiang region in recent 50 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(6): 1203-1213.]
- [4] 王宁练, 贺建桥, 蒋熹, 等. 祁连山中段北坡最大降水高度带观测与研究. 冰川冻土, 2009, 31(3): 395-403. [WANG N L, HE J Q, JIANG X, et al. Study on the zone of maximum precipitation in the north slopes of the central Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(3): 395-403.]
- [5] 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. 地理科学进展, 2014, 33(10): 1375-1386. [JI T, YAGN H, LIU R, et al. Applicability analysis of the TRMM precipitation data in the Sichuan-Chongqing region. *Progress in Geography*, 2014, 33(10): 1375-1386.]
- [6] 范科科, 段利民, 张强, 等. 基于多种高分辨率卫星数据的 TRMM 降水数据降尺度研究: 以内蒙古地区为例. 地理科学, 2017, 39(9): 1411-1421. [FAN K K, DUAN L M, ZHANG Q, et al. Downscaling analysis of TRMM precipitation based on multiple high-resolution satellite data in the Inner Mongolia, China. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 39(9): 1411-1421.]
- [7] 吕洋, 杨胜天, 蔡明勇, 等. TRMM 卫星降水数据在雅鲁藏布江流域的适用性分析. 自然资源学报, 2013, 28(8): 1414-1425. [LYU Y, YANG S T, CAI M Y, et al. The applicability analysis of TRMM precipitation data in the Yarlung Zangbo River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(8): 1414-1425.]
- [8] 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. 冰川冻土, 2013, 35(2): 310-319. [WU X J, YANG M X, WU H B, et al. Verifying and applying the TRMM TMPA in Heihe River Basin. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(2): 310-319.]
- [9] 张涛, 李宝林, 何元庆, 等. 基于 TRMM 订正数据的横断山区降水时空分布特征. 自然资源学报, 2015, 30(2): 260-270. [ZHANG T, LI B L, HE Y Q, et al. Spatial and temporal distribution of precipitation based on corrected TRMM data in Hengduan Mountains. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(2): 260-270.]
- [10] 季漩, 罗毅. TRMM 降水数据在中天山区域的精度评估分析. 干旱区地理, 2013, 36(2): 253-262. [JI X, LUO Y. Quality assessment of the TRMM precipitation data in Mid Tianshan Mountains. *Arid Land Geography*, 2013, 36(2): 253-262.]
- [11] 李琼, 杨梅学, 万国宁, 等. TRMM 3B43 降水数据在黄河源区的适用性评价. 冰川冻土, 2016, 38(3): 620-633. [LI Q, YANG M X, WAN G N, et al. Analysis of the accuracy of TRMM 3B43 precipitation data in the source region of the Yellow River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(3): 620-633.]
- [12] HUFFMAN G J, ADLER R F, BOLVIN D T, et al. The TRMM multi satellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydro Meteorology*, 2006, 8: 38-54.
- [13] 白爱娟, 刘长海, 刘晓东. TRMM 多卫星降水分析资料揭示的青藏高原及其周边地区夏季降水日变化. 地球物理学, 2008, 51(3): 704-714. [BAI A J, LIU C H, LIU X D. Diurnal variation of summer rainfall over the Tibetan Plateau and its neighboring regions revealed by TRMM multi-satellite precipitation analysis. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(3): 704-714.]
- [14] 阚宝云, 苏凤阁, 童凯, 等. 四套降水资料在喀喇昆仑山叶尔羌河上游流域的适用性分析. 冰川冻土, 2013, 35(3):

- 710-722. [KAN B Y, SU F G, TONG K, et al. Analysis of the applicability of four precipitation datasets in the upper reaches of the Yarkant River, the Karakorum. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 710-722.]
- [15] 穆振侠, 姜卉芳. 基于 TRMM/TMI 的天山西部山区降水垂直分布规律的研究. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(10): 66-71. [MU Z X, JIANG H F. The vertical distribution law of precipitation in the Western Tianshan Mountain based on T-RMM/TMI. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(10): 66-71.]
- [16] 刘俊峰, 陈仁升, 卿文武, 等. 基于 TRMM 降水数据的山区降水垂直分布特征. *水科学进展*, 2011, 22(4): 447-454. [LIU J F, CHEN R S, QING W W, et al. Study on the vertical distribution of precipitation in mountainous region using T-RMM data. *Advances in Water Science*, 2011, 22(4): 447-454.]
- [17] 巩宁刚, 孙美平, 闫露霞, 等. 1979-2016 年祁连山地区大气水汽含量时空特征及其与降水的关系. *干旱区地理*, 2017, 40(4): 762-771. [GONG N G, SUN M P, YAN L X, et al. Temporal and spatial characteristics of atmospheric water vapor and its relationship with precipitation in Qilian Mountains during 1979-2016. *Arid Land Geography*, 2017, 40(4): 762-771.]
- [18] 孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 近 50 年来祁连山冰川变化: 基于中国第一、二次冰川编目数据. *地理学报*, 2015, 70(9): 1402-1414. [SUN M P, LIU S Y, YAO X J, et al. Glacier changes in the Qilian Mountains in the past half century: Based on the revised First and Second Chinese Glacier Inventory. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1402-1414.]
- [19] ANDERMANN C, BONNET S, GLOAGUEN R. Evaluation of precipitation data sets along the Himalayan front. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2011, 12(7): Q07023, doi:10.1029/2011GC003513.
- [20] PIPUNIC R C, RYU D, COSTELLOE J F, et al. An evaluation and regional error modeling methodology for near-real-time satellite rainfall data over Australia. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2015, 120(3): 10764-10783.
- [21] SAVTCHENKO A K, HUFFMAN G, VOLLMER B. Assessment of precipitation anomalies in California using TRMM and MERRA data. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2015, 120(16): 8206-8215.
- [22] 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. *干旱区地理*, 2013, 36(3): 371-382. [YANG Y F, LUO Y. Evaluation on detective ability of TRMM remote sensing precipitation in arid region of Northwest China. *Arid Land Geography*, 2013, 36(3): 371-382.]
- [23] 刘小婵, 赵建军, 张洪岩, 等. TRMM 降水数据在东北地区的精度验证与应用. *自然资源学报*, 2015, 30(6): 1047-1056. [LIU X C, ZHAO J J, ZHANG H Y, et al. Accuracy validation and application of TRMM precipitation data in Northeast China. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(6): 1047-1056.]
- [24] DARAND M, AMANOLLAHI J, ZANDKARIMI S. Evaluation of the performance of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) estimation over Iran. *Atmospheric Research*, 2017, 190: 121-127.
- [25] 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. *地理科学进展*, 2013, 32(9): 1423-1432. [MA J H, QU C, ZHANG H X, et al. Spatial downscaling of TRMM precipitation data based on DEM in the up-stream of Shiyang River Basin during 2001-2010. *Progress in Geography*, 2013, 32(9): 1423-1432.]
- [26] 陈少勇, 任燕, 乔立, 等. 中国西北地区大雨以上降水日数的时空分布特征. *资源科学*, 2011, 33(5): 958-965. [CHEN S Y, REN Y, QIAO L, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of days with above heavy rainfall over Northwestern China. *Resources Science*, 2011, 33(5): 958-965.]
- [27] 贾文雄. 祁连山气候的空间差异与地理位置和地形的关系. *干旱区研究*, 2010, 27(4): 607-615. [JIA W X, Study on the relationships between regional climatic difference, geographical location and terrain in the Qilian Mountains. *Arid Zone Research*, 2010, 27(4): 607-615.]
- [28] 齐文文, 张百平, 庞宇, 等. 基于 TRMM 数据的青藏高原降水的空间和季节分布特征. *地理科学*, 2013, 33(8): 999-1005. [QI W W, ZHANG B P, PANG Y, et al. TRMM-data-based spatial and seasonal patterns of precipitation in the Qinghai-Tibet Plateau. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(8): 999-1005.]

Study on maximum precipitation height zone in Qilian Mountains area based on TRMM precipitation data

SUN Mei-ping^{1,2}, ZHANG Hai-yu¹, GONG Ning-gang¹, YAN Lu-xia¹, ZHAO Lin-lin¹

(1. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Atmospheric precipitation is the most important link in the process of global water vapor cycle and energy conversion, and it is the material basis for the global ecosystem to maintain stability. Therefore, it is increasingly important to monitor and forecast precipitation for regional climate analysis, water resources evaluation and hydrological process simulation. As an important ecological barrier, the Qilian Mountains plays a critical role in maintaining the natural environment and social development in Northwest China. Thus, it is of great significance to examine the distribution and variation of precipitation in the Qilian Mountains. However, there are relatively few studies on precipitation in mountainous areas due to some factors, such as insufficient measured data, complicated precipitation environment and so on, which limits the further study to some extent. In recent years, with the development of satellite inversion technology, the application of satellite to precipitation retrieval is becoming more and more mature, which provides data support for the study of precipitation in mountainous areas. Therefore, this paper uses the data of TRMM monthly precipitation and ground meteorological station precipitation, combined with the error evaluation and other mathematical statistics and Kriging interpolation method, to calibrate TRMM precipitation, so as to examine the spatiotemporal variations of the zone of the maximum precipitation in the study area. The results show that: (1) The overall performance of TRMM precipitation is good in the Qilian Mountains. The measured annual precipitation of 31 meteorological stations has a high correlation (0.94) with the TRMM data, and the correlation coefficients of the seasonal average precipitation are 0.87 (spring), 0.89 (summer), 0.88 (autumn) and 0.7 (winter). (2) The errors of some stations are large and the low values are overestimated and the high values are underestimated. (3) Annual average precipitation shows a decreasing trend from east to west in the region, and zones of the maximum precipitation in the eastern, central and western parts appear at 4100 m, 4500 m and 4700 m, respectively. The vertical variation rates of the average annual precipitation are 16.6 mm/100 m, 10.8 mm/100 m, 9.8 mm/100 m, respectively. (4) The precipitation fluctuated and increased in the eastern, central and western parts of the study area from 1998 to 2016. The zone of the maximum precipitation also shows a fluctuating upward trend. The maximum precipitation height in each season decreases in the order of summer, spring, autumn and winter.

Keywords: TRMM precipitation; maximum precipitation height zone; spatial and temporal distribution; Qilian Mountains area