

引用格式: 韩春坛, 王磊, 陈仁升, 等. 祁连山高寒山区降水观测网络及数据应用[J]. 资源科学, 2020, 42(10): 1987-1997. [Han C T, Wang L, Chen R S, et al. Precipitation observation network and its data application in the alpine region of Qilian Mountains[J]. Resources Science, 2020, 42(10): 1987-1997.] DOI: 10.18402/resci.2020.10.15

祁连山高寒山区降水观测网络及其数据应用

韩春坛^{1,2}, 王磊³, 陈仁升¹, 刘章文¹, 刘俊峰¹, 阳勇¹, 吕汉秦⁴

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 内陆河流域生态水文重点实验室 黑河上游生态-水文试验研究站, 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 山东师范大学 地理与环境学院, 济南 250358; 4. 中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心, 呼和浩特 010010)

摘要: 降水是地表及地下水资源的根本补给源, 直接影响水资源的时空分布格局以及山地冰冻圈的分布和发育。祁连山高寒山区是降水和产流高值区, 降水特征受地形影响较大, 但现有的降水观测网络还无法合理反映降水特征在地形垂直梯度上的变化。为了确定降水变化如何影响高寒山区的水文和生态过程, 需要从流域垂直梯度观测降水形态和降水量的变化。本文概述了由T-200BM3组成的祁连山高山区降水格网化、梯度化、自动化观测网络, 并在八一冰川冰缘区建立高寒山区降水标准校正场, 采用世界气象组织(WMO)推荐的降水/降雪观测标准(DFIR)校正八一冰川区域降水量。在八一冰川区域对地面降水数据产品作初步分析, 并利用高海拔站点数据评估了GPM和TRMM降水数据产品在祁连山区的适用性。该降水观测网络的建设对进一步认识高寒山区不同海拔雨雪和水汽变化规律, 精细化评估高寒山区降水资源具有重要意义, 并可为全国的降水资源综合观测和评估提供方法和降水数据产品。

关键词: 降水观测网络; 雨雪量计; 祁连山; 高寒山区; 八一冰川; TRMM; GPM; 数据应用

DOI: 10.18402/resci.2020.10.15

1 引言

降水在全球水循环中起着重要的作用, 是流域水量平衡、水分循环、区域水资源评价、分布式水文模型的重要变量^[1]。高寒山区降水数据是寒区相关研究最重要的驱动数据^[2], 准确获取降水量对于生态环境、农业生产和气候变化中水资源量的评估和管理具有重要的意义^[3], 高时空分辨率降水数据对水文预报和水资源管理至关重要^[4-6]。山区降水数据的匮乏, 是制约径流变化及其影响研究的重要瓶颈。中国西北干旱区径流的主要来源是山区降水, 但复杂的山区地形和局地小气候形成了迥异多变

的降水时空分布格局^[7]。特别是在地形和气候复杂的高海拔山区, 雨雪量计分布稀疏的地区, 获取准确的降水数据仍然是一项艰巨的任务^[8,9], 是一个亟待解决的科学问题^[10,11]。目前, 中国的降水观测网络缺乏对高海拔山区降水的观测站点, 而遥感降水产品大多在山区的精度较低, 远不能满足高寒区水文、生态以及冰冻圈等研究的需要^[12]。因此, 目前急需提高山区降水的观测与模拟能力, 深入认识山区降水的复杂性及其变化规律^[13]。

祁连山作为中国西部重要的生态安全屏障, 是黄河流域和河西内陆河流域重要水源产流地^[14,15],

收稿日期: 2020-06-03, 修订日期: 2020-08-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0507404; 2019YFC1510502); 国家自然科学基金项目(41971041); 自然资源要素综合观测数据集成与应用服务项目(DD20208067)。

作者简介: 韩春坛, 男, 宁夏固原人, 高级工程师, 主要从事寒区降水和凝结水过程观测研究。E-mail: hancht@lzb.ac.cn

通信作者: 陈仁升, 男, 山东沂水人, 研究员, 主要从事寒区水文观测与模拟研究。E-mail: crs2008@lzb.ac.cn

包括疏勒河流域、黑河流域、石羊河流域、柴达木盆地、青海湖流域、大通河—湟水流域共六大流域。祁连山孕育了冰川、寒漠、冻原、草甸、森林、草原、农田、水域、荒漠等九大类型在内的复合生态系统。祁连山总面积22.41万 km^2 ^[16]。中国第二次冰川编目表明,2005—2010年间,祁连山共有冰川2684条,面积0.16万 km^2 ,冰储量约84.48 km^3 ^[17],多年冻土面积8.04万 km^2 ^[16]。祁连山区水源涵养功能显著、生物多样性丰富、生态系统敏感而脆弱,是中国重要的生态屏障区、水源涵养战略区,也是阻挡巴丹吉林、腾格里两大沙漠南侵的防线、保卫“中华水塔”三江源生态安全的屏障,在维护中国西部生态安全方面有着不可替代的作用。《2017年祁连山国家公园青海片区生态气象监测公报》显示,祁连山国家公园青海片区气象条件向暖湿化发展。研究表明,随着海拔的升高,这种暖湿化有可能被进一步放大^[18-20],进而加速水循环过程^[21,22]和冰冻圈萎缩^[23-27]。

针对高寒山区降水观测缺乏、遥感数据反演精度偏低的情况,本文概述了在祁连山建立的高寒山区降水观测网络组成和站点分布,以祁连山区八一冰川地区为例,分析了降水量-海拔关系;同时考虑到高寒山区风速较大、风扰动引起降水动力损失显著,在八一冰川冰缘区建立降水校正观测场,校准风扰动造成的动力观测误差;并结合国家气象站和祁连山高寒山区降水观测网络,评估TRMM和GPM卫星降水数据在祁连山高寒山区的数据精度,旨在进一步精细化评估高寒山区降水资源。祁连山高寒山区降水观测网络对认识高寒山区不同海拔雨雪比、局地降水的海拔依赖性、冰川冰缘区的“冷湿岛”效应具有重要作用,并有望为全国的降水资源综合观测和评估提供方法和降水数据产品。

2 祁连山高寒山区降水观测网络

在过去几十年中,流域尺度的系统观测得到了长足发展。美国国家科学基金会资助了“地球关键带”观测计划;欧洲水文观测站网主要包括3个水文观测计划:德国TERENO陆地环境观测流域^[28,29],丹麦HOBE水文观测网络^[30],以及奥地利HOAL野外水文实验室^[31];还有在寒区建立的一些流域观测系

统,例如美国和俄罗斯联合建立的南森和阿蒙森盆地观测系统(NABOS-II)^[32],加拿大的寒区变化环境观测网络(CCRN)^[33]和邦迪角北极流域观测站(CBAWO)^[34],以及中国的黑河流域生态-水文过程综合遥感观测联合试验(HiWATER)^[35,36]。上述大多数综合流域观测系统都集中在高山和寒冷地区(High-Mountain and Cold Regions, HiMACs)。由于这些地区条件艰苦、观测稀疏,理解这些地区的降水和冰冻圈要素变化仍面临着重大挑战^[23]。随着全球气候变暖,HiMACs的水文过程将继续发生巨大变化,已有研究表明,在垂直海拔梯度上,从雪到雨的转变正朝着海拔更高的山区发展。IPCC研究表明,山区降水过程复杂且具有海拔依赖性,这些变化可以改变坡面径流的时间^[37],因此需要可靠而准确的降水观测^[38]。而且,在降水的观测过程中仍然存在明显的偏差和误差^[39,40]。为了确定降水变化如何影响高寒山区的水文和生态过程,需要从流域垂直海拔梯度观测降水形态和降水量的变化。目前,地面观测是获取降水数据的最准确、最简单的方法,观测数据通常用于验证和校准从遥感反演和模型模拟获得的降水数据集。但是,降水的地面观测点通常位于低海拔地区,并且其站点分布仅能满足国家气象部门的实际要求,而不是满足特定的科学研究需求^[41]。在高海拔、高纬度地区,观测的极大困难导致寒区观测数据匮乏,数据精度较差,成为了制约当前全球变化、水循环/水资源和气候模式(GCMs)等研究领域的主要瓶颈之一。

为获取祁连山高寒山区精确降水数据,针对不同研究目标、分不同区域,按“一横三纵观测剖面(一横为拖来南山—拖来山—冷龙岭,三纵分别为八一冰川地区(西)、柯柯里—野牛沟(中)、石头沟—葫芦沟(东)剖面,图1中黑色虚线)、典型区域加密布设、空间和海拔兼顾”的原则,在祁连山高寒山区安装了23套称重式雨雪量计(配备单层温湿风)和1套天气现象仪(激光相位多普勒),实现了高寒山区降水的格网化、梯度化、自动化观测(图1)。以现有定位站、半定位站为依托,在黑河、疏勒河和石羊河源区选取平坦无遮挡位置布设了称重式雨雪量计,并配备温湿风传感器和数据远程传输功能。

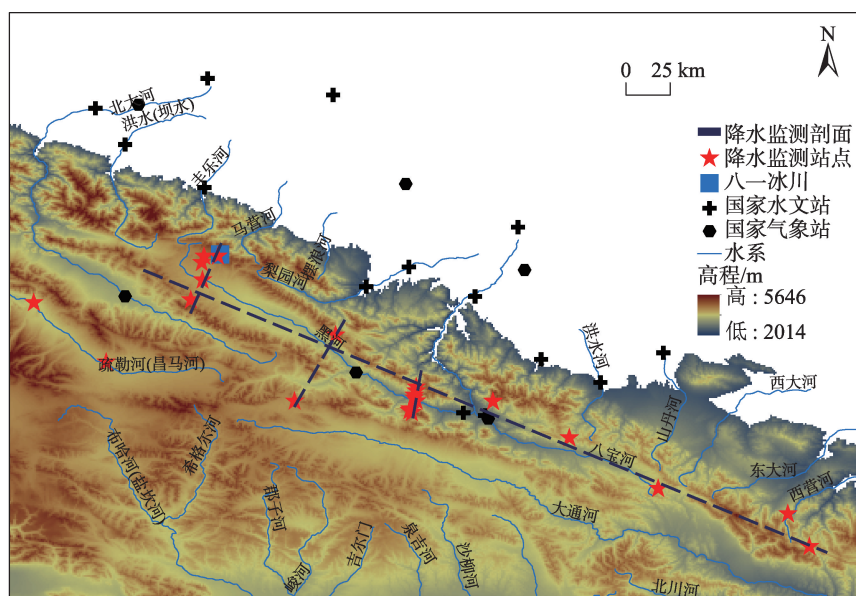


图1 祁连山高寒山区降水观测网络

Figure 1 Precipitation observation network in the alpine region of the Qilian Mountains

结合国家气象站和TRMM卫星降水数据格点,矩阵网格化布设,在祁连山区形成包含降水误差校正、不同海拔梯度和高时间分辨率的降水观测网络,并可应用于卫星数据评估、动力降尺度和降水校正的地面-空间立体降水观测网。目前野外观测要素、涵盖下垫面类型达到了推动寒区水文学发展的要求,其观测方法和经验可由祁连山逐步推广到其他高寒山区。

降水观测网络选用 T-200BM3 (Geonor, Norway) 雨雪量计,可测量高寒山区任何类型的降雨和任何固态/液态及混合降水;尤其适合进行固态降水和混合降水测量。相比于传统的雨量计(如翻斗式雨量计),T-200BM3具有以下优点:①量程为 1000 mm,能保证长时间强降水测量。②世界气象组织(WMO)推荐,雨量筒外部配备面积 200 cm² 的承水口;内部配备 3 个弦振传感器,当一个传感器出现故障,另外的传感器仍能正常工作,不影响整个测量系统。③降水收集在雨雪量计容器内,通过弦振传感器称重输出一个频率,并以方波信号的形式被记录,直接换算成降水量,降低了系统误差。④ T-200BM3 通过防冻液而不是加热器来保证传感器在低温环境下正常工作,既可以防止水分蒸发对测量数据产生的影响,亦可降低功耗。⑤ Alter 型风挡

和单层温湿风传感器用于降水校正,以保证测量的准确性和可靠性。

受风和温度波动的影响,高山区固态降水的平均动力损失可达 35%^[42,43]。为了获取高寒山区准确的降水数据,在八一冰川冰缘区构建高寒山区降水标准校正场(图 2),采用 WMO 推荐的降水/降雪观测标准(Double Fence Intercomparison Reference, DFIR),获取不同降水类型在不同天气、风速条件下的降水观测误差,精细化地评估高寒山区的降水量。降水校正观测系统主要包括 DFIR 双层防风栅栏(WMO 固态降水观测标准)、Alter 风挡和 PWS100 当前天气现象仪,共同组成集雨滴尺寸、速度测量和固液态降水分离的降水校正观测系统。

PWS100 当前天气现象仪采用激光相位多普勒效应可直接分析当前空气中的降水粒子粒径及运动速度,还提供了标准的粒子类型分类级别,可测小雨、雨、雨加雪、雪粒、米雪、冰雹等降水类型。并以此根据 WMO 的天气分类直接输出天气代码,精确确定降水类型。结合八一冰川地形剖面的称重式雨雪量计,对降水估测、灾害性天气的监测和预警等有很好的指导意义。

3 八一冰川区域降水数据应用

八一冰川(冰川编目编号为 5Y425L2)又称小



图2 八一冰川地区布设的DFIR双层防风栅栏(a)和PWS100天气现象仪(b)

Figure 2 Double Fence Intercomparison Reference (DFIR) (a) and Present Weather Sensor (PWS) 100 (b) at the Aug_one Glacier

沙龙冰川,位于祁连山中段走廊南山的南坡小沙龙沟脑(39°00'30"N—39°01'45"N, 98°52'30"E—98°54'30"),是中国第二大内陆河黑河的源头,属于平顶冰川,是山地冰川的特殊类型。八一冰川是黑河干流河源区最大的冰川,长度 1.85 km,周长 6.8 km,面积 2.48 km²,冰川末端海拔 4520 m,最高点海拔为 4828 m。小沙龙沟源自八一冰川东南角,南流 12 km 许注入黑河。大清水沟从其西南角冰舌下流出,先向西南而后南弯成弧形注入黑河。冰川尾部后壁有马营河沟脑;马营河向北切割走廊南山流入河西走廊地带。按地区称呼为“小沙龙”冰川,以科考命名为“八一”冰川,因中国科学院高山冰雪利用研究队第四分队在 1958 年 8 月 1 日初次在“小沙龙”冰川展开考察工作而得名。

2018 年 6 月笔者在八一冰川地区安装 4 套 T-200BM3 雨雪量计,形成不同海拔梯度降水观测剖面(表 1),该剖面上冰川区年降水量最大,超过 800 mm,且存在显著的季节变化和日变化,主要集中在 6—9 月,占全年降水量的 70% 以上(图 3)。

海拔是影响降水分布的重要因素。理论认为,同一坡向上降水和海拔存在显著的统计关系,因此在不同时间尺度上讨论了降水与海拔的线性统计关系,如表 2 所示。根据降水与海拔的回归分析,八一冰川附近降水与海拔统计关系在不同时间尺度上存在差异,但是并不显著,其显著性没有随着时

间尺度增加而显著。在全年、春季和秋季中,通过 $p < 0.05$ 检验的比例有所增加,但并不明显;通过 $p <$

表 1 祁连山高寒山区降水观测网络的位置站点信息

Table 1 Site information of precipitation observation network in the alpine region of the Qilian Mountains

站名	经度/°E	纬度/°N	海拔/m	位置描述
BYDFIR	98.88	39.01	4650	八一冰川 DFIR
BY1	98.88	39.01	4650	八一冰川 1
BY2	98.82	39.01	4450	八一冰川 2
BY3	98.80	38.97	4145	八一冰川 3
BY4	98.81	38.89	3850	八一冰川 4
HCH	101.76	37.71	3565	皇城
HLGX1	99.85	38.24	3725	葫芦沟西 1
HLGX2	99.85	38.23	4055	葫芦沟西 2
HLGX3	99.86	38.22	4315	葫芦沟西 3
STG1	99.89	38.28	3190	石头沟 1
STG2	99.88	38.29	3510	石头沟 2
STG3	99.88	38.30	3840	石头沟 3
STG4	99.89	38.33	4070	石头沟 4
STG5	99.89	38.35	4400	石头沟 5
JYL	101.11	37.84	3845	景阳岭
KKL	99.27	38.28	4160	柯柯里
NCYK	101.87	37.54	4050	宁缠埡口
SULI1	98.32	38.47	3890	苏里
SULI2	97.96	38.77	3635	苏里
SNYK	99.48	38.61	4200	肃南埡口
YL	98.75	38.79	4155	央隆
ARYK	100.66	38.09	4020	宁缠埡口
BYG	100.27	38.27	3895	白杨沟

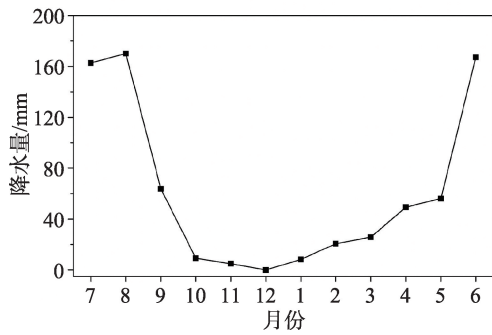


图3 八一冰川BY1站不同月份降水量变化 (2018年7月—2019年6月)

Figure 3 Change of monthly total precipitation at the BY1 Station of the Aug_one Glacier, July 2018-June 2019

0.01 检验的比例几乎没有变化。夏季和冬季通过 $p < 0.01$ 和 $p < 0.05$ 检验比例都没有明显变化, 通过检验的比例并没有随着时间尺度增加而增加(表2)。

在不同月份和年尺度的4个降水观测点的降水海拔关系也不显著, BY4海拔较低, 但是降水量高于海拔较高的BY3(图1、表1、图4), 造成这种降水-海拔关系不显著的一个重要因素是局地地形引起的降水。在夏季, 白天太阳辐射很强, 地表受热不均, 蒸发强烈; 晚上没有太阳短波辐射, 地表冷却较快, 水汽冷却形成降水。早上, 水汽受到谷风的影响上升到山坡上; 下午到傍晚, 受到压缩和冷却的水汽在山坡上形成降水; 晚上水汽受到山风的影响

下降到谷底, 在谷底冷却形成降水。所以白天局地降水多发生在山顶, 晚上局地降水多发生在山谷。另外, 在夏季, 研究区附近被黑河低压控制, 盛行上升气流。当西风、高原季风、夏季风带来的水汽沿黑河峡谷进入该区域, 汇集流域内蒸散的水汽继续向上爬升, 到达一定海拔高度后, 水汽达到饱和状态形成第一次局地降水; 剩余水汽继续上升, 到达冰川区附近时, 由于冰川的冷却效应, 凝结形成第二次局地降水; 因此该区的局地降水过程形成了并不显著的降水-海拔关系(图4、图5)。

尽管在过去的50多年里, 祁连山区的降水有所增加^[44-46], 但降水量的增加量对于冰川的补给作用远小于气温快速升高, 尤其是夏季升温 and 冰面强降雨事件加速冰川融化, 消融期冰面黑化严重, 冰面河密度增加, 造成近年来八一冰川面积和体积加速萎缩。

4 GPM 和 TRMM 降水数据地面验证应用

事实证明, 卫星遥感数据同化方法的发展在估计全球网格化降水(GPM, TRMM 和 ERA-Interim 等)方面很有帮助, 尤其是对于地面降水量稀少且传统插值方法效果不佳的高海拔山区^[11,47,48]。但是, 与这些卫星降水产品相关的估计误差是由多源因

表2 八一冰川剖面不同时间尺度通过显著性检验的样本量

Table 2 Percentage of samples of the Aug_one Glacier profile that passed the test at different temporal scales

		3 h	6 h	12 h	1 d	2 d	5 d	10 d	15 d	1 m
总样本	样本量	980	574	335	199	126	61	34	23	12
	$p < 0.01$ 样本占比/%	0.20	0.70	0.60	1.01	0.79	1.64	0	0	0
	$p < 0.05$ 样本占比/%	6.43	6.45	5.97	6.03	6.35	3.28	11.76	13.04	16.67
春季	样本量	274	152	86	53	34	16	8	6	3
	$p < 0.01$ 样本占比/%	0.36	0.66	1.16	1.89	2.94	6.25	0	0	0
	$p < 0.05$ 样本占比/%	6.57	6.58	3.49	9.43	5.88	6.25	12.50	33.33	33.33
夏季	样本量	420	244	144	81	43	17	6	6	3
	$p < 0.01$ 样本占比/%	0.24	0.82	0	0	0	0	0	0	0
	$p < 0.05$ 样本占比/%	5.71	4.92	6.25	4.94	6.98	5.88	0	0	0
秋季	样本量	180	107	63	40	28	16	10	6	3
	$p < 0.01$ 样本占比/%	0	0.93	0	0	0	0	0	0	0
	$p < 0.05$ 样本占比/%	6.67	7.48	11.11	7.50	10.71	12.50	10.00	16.67	33.33
冬季	样本量	106	71	40	25	19	12	10	6	3
	$p < 0.01$ 样本占比/%	0	0	2.50	4.00	0	0	0	0	0
	$p < 0.05$ 样本占比/%	0	9.86	2.50	0	5.26	0	20.00	0	0

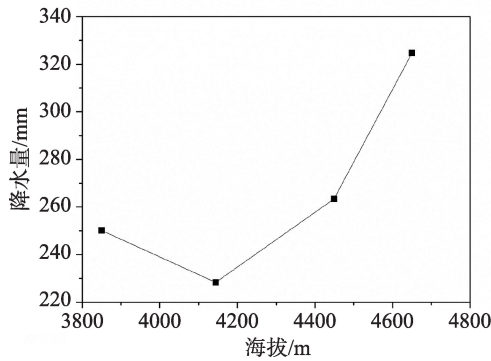


图4 八一冰川区不同观测点降水量-海拔关系 (2018年7—9月)

Figure 4 Relationship between precipitation and elevation at different stations in the Aug_ one Glacier region, July-September 2018

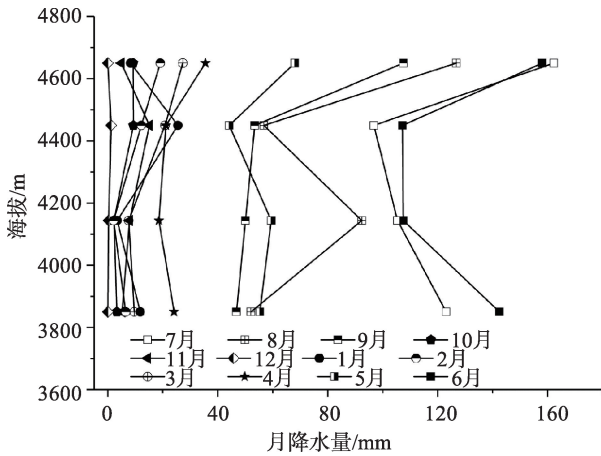


图5 八一冰川区不同月份的海拔-降水量关系

Figure 5 Relationship between precipitation and elevation in different months in the Aug_ one Glacier region

子引起的,导致遥感产品反演原始降水精度较差,使得普适性降水产品的发展受到阻碍,特别是在高寒山区地面观测站数量较少的区域。近年来,一些学者利用遥感获取的像元尺度降水量(日、月和年尺度)与喜马拉雅山脉^[41]、祁连山^[49]、天山山脉^[50]、阿尔卑斯山^[51]和安第斯山脉^[52,53]等不同山区的地面观测数据进行比较来评估降水遥感产品的精度。研究表明:遥感产品在中低纬度山区的表现要好于中高纬度山区,在低海拔平原的表现要好于高海拔山区^[48,54]。但上述研究无法有效评估高海拔山区的降水量,特别是4000 m海拔以上区域不同降水产品的适用性^[2,49]。此外,短期的强降水经常发生在高海拔山区,导致降水空间分布的高度可变性和月尺度降

水估算误差增大^[55]。

本文利用祁连山高寒山区降水观测网络,并加入周边的国家气象站点的观测数据,以评估不同时间分辨率(每小时—每月)和降水量(从0.1 mm开始)下的TRMM和GPM数据(mm/day)的精度和适用性。结果表明,在祁连山区,降水呈现出显著的季节变化,80%以上降水发生在雨季。根据国家气象站2006—2018年和T-200BM3称重式雨雪量计2018年7月—2019年6月数据,祁连山面降水量约为280.81 mm,增加同时期称重式雨雪量计观测数据后,祁连山面降水量提高到387.26 mm。同时分析了对应时段的TRMM和GPM卫星降水数据。图6展示了研究区国家气象站和T-200BM3称重式雨雪量计,分别与TRMM和GPM反演的月降水量关系:TRMM和GPM两种降水产品都能有效地捕捉到月降水量的时间变化,但是存在一定程度误差。与海拔较低的国家站相比,两种卫星降水产品高估了5—11月的降水量;与高海拔处地面观测降水相比,GPM产品普遍高估逐月降水,而TRMM产品则存在不同程度的低估。作为TRMM的替代产品,GPM卫星能够探测到TRMM无法探测到的微量降水和固态降水。因此,GPM反演的降水量通常大于TRMM的反演值。但是,GPM在提高微量降水、固态降水的探测能力的同时,也增加了降水的误判率,导致在部分区域的适用性不好^[56]。

5 仪器和数据共享

由于野外观测设备部署比较偏远,故采用远距离无线传输技术,实现野外观测设备联网。针对高寒山区特殊环境,降水观测网络数据传输利用Zig-Bee网络技术和移动DTU技术的远距离传输模块集成使用,以实现降水观测数据的远程传输和观测设备自组网和网络互连,自动加入监测系统,实现从传感器—传输—数据平台中心远程监控和管理。数据中心采用基于中间件的异构大数据存储与检索技术,保证了各类野外观测要素的实时在线监测和远程存储。这解决了低温环境中的高精度实时采集数据的问题。

本文通过目视检查每个变量记录,仔细检查每个振荡传感器产生的异常数据,并对降水观测网络

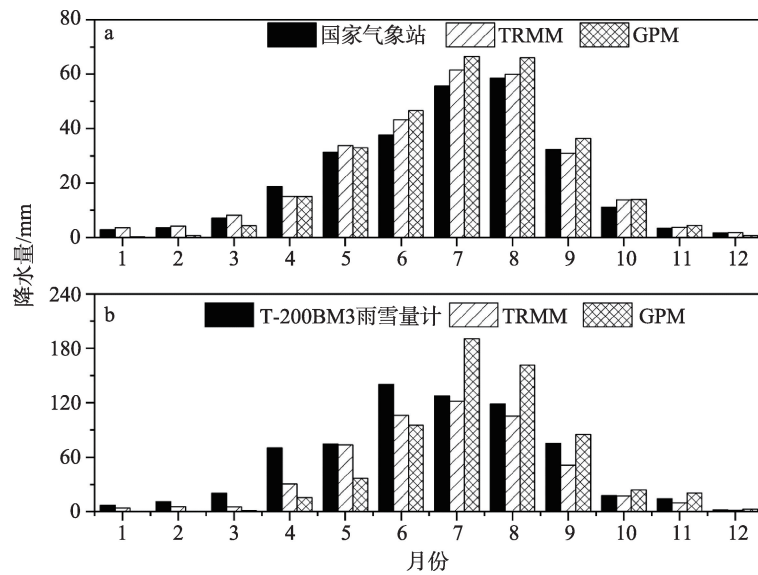


图6 国家气象站(a)和T-200BM3雨雪量计(b)与TRMM、GPM反演的月降水量关系图

Figure 6 Relationship between the National Weather Station observations (a) and T-200BM3 precipitation gauge observations (b) and monthly inversion precipitation by TRMM and GPM

获取的站点降水数据进行数据质量控制,以剔除野值、异常值、恒定值和极端跳变。对于单个站点的短期异常值进行剔除,并通过相邻站点建立插值函数,缺失值由对应点求出的函数值近似代替来订正原序列,同时,在观测场,数据处理、数据集生成和数据发布期间,采取一系列质量控制措施,将降水数据分为3个数据级别:原始数据、质量控制数据和后插补数据^[10],形成均一化数据集产品。

祁连山高寒山区降水观测网络数据主要通过黑河上游生态-水文试验研究站网站(<http://hhsy.casnw.net/>)共享,网站包含从祁连山高寒山区降水观测网络获取的所有数据集。其数据共享政策包括以下规定:①完全共享,这表明该数据集可以完全共享;②有数据保护期的共享,这表明该数据集存在一段时间的数据保护期,之后可以对数据集进行完全共享;③签署数据使用协议,数据申请人必须与数据生产者签署协议才能使用该数据集。

6 结论、讨论和展望

6.1 结论

本文主要基于祁连山高寒山区降水观测网络数据和国家气象站的数据,对祁连山八一冰川地区降水的时空变化特征及卫星数据在山区应用进行研究讨论。主要获得如下结论:

(1)根据国家站2018年7月—2019年6月观测数据,祁连山面降水量约为280.81 mm,增加同时期称重式雨雪量计观测数据后,祁连山面降水量提高到387.26 mm,因此,增加高海拔观测点是获取山区降水量的最佳方法。

(2)降水量-海拔关系的显著性与统计时间尺度有关。在日、月尺度上,八一冰川剖面降水量-海拔关系均不显著;但在月尺度上,70%以上的月份可以通过 $p < 0.05$ 的显著性检验,而且集中在春、夏和秋季的月份,冬季各月降水量-海拔统计关系不显著。

(3)增加高寒山区降水观测站点和周边国家气象站点的降水数据来校正同期两种不同卫星降水产品,精度有明显提高。与海拔较低的国家站相比,两种卫星降水产品高估了5—11月的降水量;与高海拔处地面观测降水相比,GPM产品普遍高估逐月降水,而TRMM产品则存在不同程度的低估。

6.2 讨论

高寒山区降水的时空分布格局复杂多变,在祁连山高寒山区布设系统的降水观测网络,既可满足寒区水文、生态水文及冰冻圈等精细研究的需要,又能了解研究区气象要素的时空分布规律,丰富中国西部高寒区气象数据库。祁连山高寒山区降水

观测网络以观测试验、机理研究和模型集成为手段,分析变化环境下寒区气象-水文-生态及其相互作用关系和变化,为高寒山区流域观测和试验示范提供平台。虽然研究取得了一定科研成果,但仍存在一些不足,具体如下:

(1)地面观测数据时间跨度短。国家气象站观测时间长,但是限于海拔因素,无法为高山区降水研究提供基础数据。称重式雨雪量计安装海拔高,但是观测时间较短,目前没有长时间序列数据。在获取长时间序列数据后,需要对祁连山高山区降水作进一步研究。

(2)缺乏大区域水汽来源研究。地面观测能获得准确数据,但是无法获取水汽来源信息。同位素分析法和区域大气模式综合运用,可以在理论上获取区域尺度研究区水汽源信息,为今后降水变化研究提供理论基础。

(3)对小尺度大气物理过程认识不足。山区地形复杂,小尺度大气物理过程是造成山区降水空间差异性大的重要因素,在今后研究中应着重讨论小尺度大气物理过程。

6.3 展望

针对以上不足之处,在今后高寒山区降水观测工作中,应注重以下工作:

(1)保证高山区观测数据连续准确。对站点定期维护和校准,保证数据质量可靠,试验表明高山区观测数据是获取精确降水量的最优方法。

(2)认识局地尺度降水的物理机制,这是提高大气数值模式降水模拟精度的关键。

(3)获取特殊地形、环境的水汽变化规律,有效提高卫星数据产品在复杂地形高寒山区的适用性。

对高寒山区降水精度提高,深入认识高寒山区雨雪比和水汽变化规律,精细化评估高寒山区降水资源十分有益。通过该降水观测网络的建设,与中国气象局基准站和中国科学院定位站合为一体,成为中国西部冰冻圈监测网,为西部冰冻圈变化及其影响集成研究积累降水数据,为提出山区降水资源评估和生态环境变化的适应性对策提供理论和技术支持,为出山径流预报和未来气候变化下水资源预估提供科学依据,也为国家“丝绸之路经济带”建

设提供精准降水数据产品服务。

参考文献(References):

- [1] Tuo Y, Duan Z, Disse M, et al. Evaluation of precipitation input for SWAT modeling in alpine catchment: A case study in the Adige River Basin (Italy)[J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 573: 66-82.
- [2] Chen R S, Wang G, Yang Y, et al. Effects of cryospheric change on alpine hydrology: Combining a model with observations in the upper reaches of the Hei River, China[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2018, 123(1): 3414-3442.
- [3] Schneider U, Ziese M, Meyer-Christoffer A, et al. The new portfolio of global precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre suitable to assess and quantify the global water cycle and resources[J]. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2016, 374: 29-34.
- [4] Sorooshian S, Lawford R, Try P, et al. Water and energy cycles: Investigating the links[J]. *World Meteorological Organization Bulletin*, 2005, 54(2): 58-64.
- [5] Yong B, Ren L L, Hong Y, et al. Hydrologic evaluation of multisatellite precipitation analysis standard precipitation products in basins beyond its inclined latitude band: A case study in Laohahe Basin, China[J]. *Water Resources Research*, 2010, DOI: 10.1029/2009WR008965.
- [6] 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.
- [7] 王磊,陈仁升,宋耀选.基于 Γ 函数的祁连山葫芦沟流域湿季小时降水统计特征[J].*地球科学进展*, 2016, 31(8): 840-848. [Wang L, Chen R S, Song Y X. Study of statistical characteristics of wet season hourly rainfall at Hulu Watershed with Γ function in Qilian Mountains[J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(8): 840-848.]
- [8] Bhatt B C, Nakamura K. Characteristics of monsoon rainfall around the Himalayas revealed by TRMM precipitation radar[J]. *Monthly Weather Review*, 2005, 133(1): 149-165.
- [9] Yuan F, Zhang L, Win K W W, et al. Assessment of GPM and TRMM multi-satellite precipitation products in streamflow simulations in a data-sparse mountainous watershed in Myanmar[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 302-302.
- [10] Han C T, Chen R S, Liu Z W, et al. Cryospheric hydrometeorology observation in the Hulu Catchment (CHOICE), Qilian mountains, China[J]. *Vadose Zone Journal*, 2018, DOI: 10.2136/vzj2018.03.0058.
- [11] Wang L, Chen R S, Han C T, et al. An improved spatial-temporal

2020年10月

- downscaling method for TRMM precipitation datasets in alpine regions: A case study in Northwestern China's Qilian Mountains[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(7): 870–870.
- [12] 陈仁升, 康尔泗, 丁永建. 中国高寒区水文学中的一些认识和参数[J]. *水科学进展*, 2014, 25(3): 307–317. [Chen R S, Kang E S, Ding Y J. Some knowledge on and parameters of China's alpine hydrology[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(3): 307–317.]
- [13] 汤秋鸿, 兰措, 苏凤阁, 等. 青藏高原河川径流变化及其影响研究进展[J]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2807–2821. [Tang Q H, Lan C, Su F G, et al. Streamflow change on the Qinghai–Tibet Plateau and its impacts[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2807–2821.]
- [14] 国家林业和草原局. 祁连山国家公园总体规划(征求意见稿)[EB/OL]. (2019–02–15) [2020–06–03]. <http://www.forestry.gov.cn/main/198/20190215/091344699121299.html>. [State Forestry and Grassland Administration. Master Plan of Qilian Mountain National Park (Draft for Comments)[EB/OL]. (2019–02–15) [2020–06–03]. <http://www.forestry.gov.cn/main/198/20190215/091344699121299.html>.]
- [15] 曹广民, 林丽, 张法伟, 等. 长期生态学研究 and 试验示范 为高寒草地的适应性管理提供理论与技术支撑[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(10): 1115–1126. [Cao G M, Lin L, Zhang F W, et al. Long-term ecological research and experimental demonstration provide theoretical and technical support for adaptive management of alpine grassland[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(10): 1115–1126.]
- [16] 李新, 勾晓华, 王宁练, 等. 祁连山绿色发展: 从生态治理到生态恢复[J]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2928–2937. [Li X, Gou X H, Wang N L, et al. Tightening ecological management facilitates green development in the Qilian Mountains[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2928–2937.]
- [17] 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[J]. *地理学报*, 2015, 70(9): 1402–1414. [Sun M P, Lin 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[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1402–1414.]
- [18] Ohumra A. Enhanced temperature variability in high-altitude climate change[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012, 110(4): 499–508.
- [19] Yang K, Wu H, Qin J, et al. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: A review [J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 112: 79–91.
- [20] Pepin N, Bradley R S, Diaz H F, et al. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5: 424–430.
- [21] Euskirchen E, Turetsky M, O'donnell J, et al. Snow, permafrost, ice cover, and climate change[J]. *Global Environmental Change*, 2014, DOI: 10.1007/978–94–007–5784–4_110.
- [22] Ficht C G, Kaiser K, Hooker S B, et al. Pan-Arctic distributions of continental runoff in the Arctic Ocean[J]. *Scientific Reports*, 2013, (3): 1053–1053.
- [23] Qiu Y B, Massimo M, Li X, et al. Observing and understanding high mountain and cold regions using big earth data[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(Z1): 82–94.
- [24] Guo D L, Wang H J. CMIP5 permafrost degradation projection: A comparison among different regions[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(9): 4499–4517.
- [25] Huang X D, Deng J, Wang W, et al. Impact of climate and elevation on snow cover using integrated remote sensing snow products in Tibetan Plateau[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 274–288.
- [26] IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, Cambridge, 2013.
- [27] Qin D H, Xiao C D. *Global Climate Change and Cryospheric Evolution in China*[C]. Grenoble: European Research Course on Atmospheres, 2008.
- [28] Zacharias S, Bogena H, Samaniego L, et al. A network of terrestrial environmental observatories in Germany[J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10(3): 955–973.
- [29] Bogena H R, Bol R, Borchard N, et al. A terrestrial observatory approach to the integrated investigation of the effects of deforestation on water, energy, and matter fluxes[J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(1): 61–75.
- [30] Jensen K H, Illangasekare T H. HOBE: A hydrological observatory [J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10(1): 1–7.
- [31] Blöschl G, Blaschke A P, Broer M, et al. The Hydrological Open Air Laboratory (HOAL) in Petzenkirchen: A hypothesis-driven observatory[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(1): 227–255.
- [32] Ivanov V V, Timokhov L A. Atlantic water in the arctic circulation transpolar system[J]. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2019, 44(4): 238–249.
- [33] Debeer C M, Wheeler H S, Quinton W L, et al. The changing cold regions network: Observation, diagnosis and prediction of environmental change in the Saskatchewan and Mackenzie River Basins, Canada[J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(1): 46–60.
- [34] Lamoureux S F, Lafrenière M J. More than just snowmelt: Integrated watershed science for changing climate and permafrost at the cape bounty arctic watershed observatory[J]. *Wiley Interdisciplin-*

- ary Reviews: Water, 2017, DOI: 10.1002/wat2.1255.
- [35] Li X, Cheng G D, Liu S Y, et al. Heihe Watershed allied telemetry experimental research (HiWATER): Scientific objectives and experimental design[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(8): 1145–1160.
- [36] Cheng G D, Li X. Integrated research methods in watershed science[J]. Science China Earth Sciences, 2015, 58(7): 1159–1168.
- [37] Godsey S E, Marks D, Kormos P R, et al. Eleven years of mountain weather, snow, soil moisture and stream flow data from the rain-snow transition zone: The Johnston Draw Catchment, Reynolds Creek Experimental Watershed and Critical Zone Observatory, USA[J]. Earth System Science Data Discussions, 2017, DOI: 10.5194/essd-2017-112.
- [38] Trenberth K E. Changes in precipitation with climate change[J]. Climate Research, 2011, 47(1): 123–138.
- [39] Yang D Q, Kane D L, Zhang Z P, et al. Bias corrections of long-term (1973–2004) daily precipitation data over the northern regions[J]. Geophysical Research Letters, 2005, DOI: 10.1029/2005GL024057.
- [40] Scaff L, Yang D Q, Li Y, et al. Inconsistency in precipitation measurements across the Alaska–Yukon border[J]. The Cryosphere Discussions, 2015, 9(4): 3709–3739.
- [41] Sevruk B, Ondras M, Chhila B. The WMO precipitation measurement intercomparisons[J]. Atmospheric Research, 2009, 92(3): 376–380.
- [42] Chen R S, Liu J, Kang E, et al. Precipitation measurement intercomparison in the Qilian Mountains, north-eastern Tibetan Plateau[J]. The Cryosphere, 2015, 9(5): 1994–2008.
- [43] 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. [Zheng Q, Chen R S, Han C T, et al. Intercomparison study on precipitation observations of TRWS204 and Chinese standard precipitation gauge in the Qilian Mountains[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(3): 747–756.]
- [44] 刘启航, 黄昌. 西北内陆区水量平衡要素时空分析[J]. 资源科学, 2020, 42(6): 1175–1187. [Liu Q H, Huang C. Spatiotemporal change of water balance components in the inland region of Northwest China, 1998–2017[J]. Resources Science, 2020, 42(6): 1175–1187.]
- [45] 贾文雄. 近50年来祁连山及河西走廊降水的时空变化[J]. 地理学报, 2012, 67(5): 631–644. [Jia W X. Temporal and spatial changes of precipitation in Qilian Mountains and Hexi Corridor during 1960–2009[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(5): 631–644.]
- [46] 韩国军, 王玉兰, 房世波. 近50年青藏高原气候变化及其对农牧业的影响[J]. 资源科学, 2011, 33(10): 1969–1975. [Han G, Wang Y, Fang S. Climate change over the Qinghai–Tibet Plateau and its impacts on local agriculture and animal husbandry in the last 50 years[J]. Resources Science, 2011, 33: 1969–1975.]
- [47] Xu R, Tian F Q, Yang L, et al. Ground validation of GPM IMERG and TRMM 3B42V7 rainfall products over southern Tibetan Plateau based on a high-density rain gauge network[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2017, 122(2): 910–924.
- [48] Su J B, Lü H S, Zhu Y H, et al. Evaluating the hydrological utility of latest IMERG products over the upper Huaihe River Basin, China[J]. Atmospheric research, 2019, 225: 17–29.
- [49] Wang X N, Ding Y J, Zhao C C, et al. Similarities and improvements of GPM IMERG upon TRMM 3B42 precipitation product under complex topographic and climatic conditions over Hexi Region, northeastern Tibetan Plateau[J]. Atmospheric Research, 2019, 218: 347–363.
- [50] Lu X Y, Wei M, Tang G Q, et al. Evaluation and correction of the TRMM 3B43V7 and GPM 3IMERGM satellite precipitation products by use of ground-based data over Xinjiang, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(5): 209–209.
- [51] Speirs P, Gabella M, Berne A. A comparison between the GPM dual-frequency precipitation radar and ground: Based radar precipitation rate estimates in the Swiss Alps and Plateau[J]. Journal of Hydrometeorology, 2017, 18(5): 1247–1269.
- [52] Manz B, Buytaert W, Zulkaffi Z, et al. TRMM- and GPM-Based Precipitation Analysis and Modelling in the Tropical Andes[C]. Vienna: EGU General Assembly Conference Abstracts, 2016.
- [53] Palomino-Ángel S, Anaya-Acevedo J A, Botero B A. Evaluation of 3B42V7 and IMERG daily-precipitation products for a very high-precipitation region in northwestern South America[J]. Atmospheric Research, 2019, 217: 37–48.
- [54] Sun R C, Yuan H L, Liu X L, et al. Evaluation of the latest satellite-gauge precipitation products and their hydrologic applications over the Huaihe River Basin[J]. Journal of Hydrology, 2016, 536: 302–319.
- [55] Wang L, Chen R S, Song Y X, et al. Precipitation–altitude relationships on different timescales and at different precipitation magnitudes in the Qilian Mountains[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 134(3–4): 875–884.
- [56] Tang G Q, Wen Y, Gao J, et al. Similarities and differences between three coexisting spaceborne radars in global rainfall and snowfall estimation[J]. Water Resources Research, 2017, 53(5): 3835–3853.

Precipitation observation network and its data application in the alpine region of Qilian Mountains

HAN Chuntan^{1,2}, WANG Lei³, CHEN Rensheng¹, LIU Zhangwen¹, LIU Junfeng¹,
YANG Yong¹, LV Hanqin⁴

(1. Qilian Alpine Ecology and Hydrology Research Station, Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China; 4. Hohhot Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Hohhot 010010, China)

Abstract: Precipitation is the fundamental replenishment source of surface and groundwater resources, which directly affects the spatial and temporal distribution of water resources and the distribution and development of mountainous cryosphere. The alpine region of the Qilian Mountains is an area of large amounts of precipitation and runoff. The characteristics of precipitation are greatly affected by topography. However, the existing precipitation observation network cannot reasonably reflect the changes of precipitation on the vertical topographic gradient. To determine how the spatial and temporal change of precipitation affects the hydrological and ecological processes of the alpine mountains, it is necessary to observe the changes of precipitation pattern and type from the vertical gradient of the catchment. This article summarized the gridded, stepped, and automated precipitation observation network in the alpine region of the Qilian Mountains. The network is formed by the Geonor T-200BM3 weighing-type all weather precipitation gauges. A precipitation calibration system is also built in the Aug-one Glacier periglacial area, which is based on the Double Fenced Intercomparison Reference (DFIR) recommended by the World Meteorological Organization (WMO). In the Aug-one Glacier region, a preliminary analysis of precipitation datasets was conducted, and the applicability of GPM and TRMM precipitation datasets in the Qilian Mountains was evaluated using observational data. The development of this network is important for an in-depth understanding of the changes of rain, snow, and water vapor at different elevations, and minute division of the evaluation of precipitation resources in the alpine mountains. This network provides methods and data products for the comprehensive observation and evaluation of precipitation resources across China.

Key words: precipitation observation network; weighing-type gauge; Qilian Mountains; alpine mountains; Aug-one Glacier; TRMM; GPM; data application