

DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2017.0330

HE Bin, ZHANG Wei, SHEN Yongping, et al. Comparison of precipitation observed by T-200b and standard rain gauge and precipitation change during 1980–2015 in the headwaters of Irtysh River, Chinese Altai Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(6): 1192–1199. [贺斌, 张伟, 沈永平, 等. 新疆阿尔泰山额尔齐斯河源区不同降水观测方法对比分析及1980–2015年降水变化研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(6): 1192–1199.]

新疆阿尔泰山额尔齐斯河源区不同降水观测方法对比分析及1980–2015年降水变化研究

贺斌¹, 张伟², 沈永平², 罗光花³, 何晓波², 康世昌²

(1. 新疆阿勒泰水文勘测局, 新疆阿勒泰 836500; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃兰州 730000; 3. 兰州大学资源环境学院, 甘肃兰州 730000)

摘要: 合理评估不同降水观测仪器的精度是评价区域降水变化的前提。基于阿尔泰山额尔齐斯河源区库威水文站 $\phi 20$ cm 标准雨量筒的人工降水观测和库威积雪站 T-200b 的自动降水观测, 对比分析了 T-200b 和 $\phi 20$ cm 标准雨量筒的观测精度, 在此基础上, 基于 1980–2015 年库威水文站的降水观测, 分析了阿尔泰山额尔齐斯河源区的降水变化。结果表明: 两种方法观测的日降水、月降水和年降水量均具有良好的相关性; 两种方法观测液态降水相关性要明显优于固态降水; 随着降雨强度的增加, 两种观测方法的相关性显著增强。总体上, T-200b 观测的降水量较 $\phi 20$ cm 标准雨量筒偏高。1980–2015 年间额尔齐斯河源区的年降水量以 2005 年为转折点呈现“先增加后减小”的变化趋势, 且冷季(11月至次年3月)的降水增加显著, 冷季的降水占年降水量的比例呈现逐渐增加的变化趋势。降水和融雪过程的变化已导致春季融雪水文过程发生改变, 进一步合理评估地表可利用水资源的年内重分配是该地区水安全的重要保障。

关键词: 阿尔泰山额尔齐斯河源区; 降水观测; $\phi 20$ cm 标准雨量筒; T-200b

中图分类号: P412.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2017)06-1192-08

0 引言

在全球变暖的背景下, 气候变化对人类生产生活的影 响已受到广泛关注。降水是陆地水资源最主要的汇入项, 是气候变化研究、水量平衡、水资源评价、规划、利用和水安全等诸多方面的重要参数之一。因此, 如何更加准确地进行降水观测已经成为气候学、水文学等学科领域的重要研究方向^[1-2]。然而, 由于自然环境复杂性、降水形态的多样性和观测仪器自身的误差等因素, 实际的降水观测往往存在较大的误差。通常情况下, 降水的观测值在不同程度上低于实际的降雨量, 对于固态降水而言, 雨量器对降水的捕获率更低^[3]。在山区及高纬度地区, 偏低的降水观测和降水空间分布的异质性往

往导致计算的河流量超过年降水量的不合理现象^[4-5]。因此, 开展更加准确的降水观测及现有降水观测仪器的修正已成为高寒山区水文学研究的重要课题。

目前, $\phi 20$ cm 标准雨量筒是我国基准水文站普遍使用的降水观测仪器。标准雨量筒的桶口直径和高度在各个国家有所不同, 据 WMO 统计数据, 有 100 多个国家人工观测雨量筒的高度介于 0.5 ~ 1.5 m 之间, 如美国国家气象标准为 60 cm 高, 桶口直径 20.32 cm, 而我国 $\phi 20$ cm 标准人工观测雨量筒桶口距离地面 70 cm, 筒口直径 20 cm, 冬季观测需要将储水瓶和漏斗去除^[6]。近年来, 自动化的降水观测逐渐取代人工观测, 自动化仪器可以分为以下几种类型: 翻斗式雨量计、称重式雨量计、可

收稿日期: 2017-06-20; 修订日期: 2017-10-19

基金项目: 中国科学院率先行动“百人计划”项目(王晓明); 国家自然科学基金项目(41690144; 41630754; 41690141); 冰冻圈科学国家重点实验室开放基金项目(SKLCs-OP-2017-10); 冰冻圈科学国家重点实验室自主研究课题项目(SKLCs-ZZ-2017)资助

作者简介: 贺斌(1975-), 男, 新疆阿勒泰人, 高级工程师, 从事水文水资源勘测工作。E-mail: 422583384@qq.com

通信作者: 张伟, E-mail: zhangw06@lzb.ac.cn.

视化传感器等^[7-9]。另外,由于地形、风速和植被状况等在不同程度上直接影响降水观测仪器对降水的捕获率,因此设计了不同的防风圈来减小风的影响。WMO 推荐使用双层格栅(Double fence inter-comparison reference)结合 Tretyakov 雨量筒(简称 DFIR)进行降水观测^[10]。为得到更加准确的降水观测数据,国内外众多学者开展了不同雨量计降水观测结果对比分析及研究^[11-16]。除了外界条件造成不同降水观测仪器对降水的捕获率不同,降水的状态和雨滴的大小也在很大程度上影响降水观测仪器的捕获率,一般情况下,和固态降水相比,降雨的观测结果更加接近真实值^[3]。在我国的青藏高原、东北和西北地区,固态降水在年降水占有较大的比例,评估降水观测仪器对不同状态降水(特别是固态降水)的捕获率更加重要。

降水是指示气候变化的最重要的指标之一。线性回归是降水变化分析的基础方法,小波分析、M-K 突变和趋势分析、EOF 分解技术也是降水变化分析的重要手段^[17-20]。随着 GIS 和遥感技术的发展,基于上述方法的降水空间变化分析逐渐成为较大空间尺度降水变化的研究方向。然而,在高山区,以阿尔泰山中国区为例,气象观测站点基本上都在海拔 800 m 以下的城镇区,山区的降水观测较少,山区降水的遥感反演结果因缺少验证数据而存在较大误差,这也在很大程度上造成山区降水变化评估的不确定性。

我国新疆阿勒泰地区是新疆水资源最为丰富的地区之一,发源于阿尔泰山的额尔齐斯河是全疆仅次于塔里木河的第二大河,额尔齐斯河丰富的水资源为当地和周边地区经济社会的发展提供了丰富的淡水资源供应。随着经济社会的发展和更加快速的气候变化,该地区逐渐呈现出水资源紧张的变化趋势。额尔齐斯河的水资源主要来自于盆地周围的高山中,因此合理评估河源区的降水变化是该地区水安全的重要保障。为此,基于水利部阿勒泰水文勘测局库威水文站和中国科学院西北生态环境资源研究院库威积雪站的降水观测数据,对比分析自动雨量计和 $\phi 20$ cm 标准雨量筒降水观测的差异,并在此基础上,利用库威水文站的长期降水观测数据,评估 1980 年以来额尔齐斯河源区的降水变化特征。

1 研究区概况

总体上整个阿尔泰山区处于西风控制区,属于典型的大陆型半干旱气候。在夏季,阿尔泰山主要

受控于西风;在冬季,西风的影响依旧强劲,同时极地环流也在不同程度上影响这一地区的天气过程^[21]。阿尔泰山地区的降水存在典型的海拔效应,低海拔区的戈壁地带年降水量不足 200 mm,而在高山区,年降水量可能超过 600 mm。阿尔泰山地区的降水年内分配较为均匀,其中 7 月的降水量最大,2 月的降水最为稀少^[22-23]。一般情况下,11 月至次年 3 月降水以固态降水为主,在高山区,4 月和 10 月的降水仍以固态降水为主。

本研究选择在阿尔泰山中段南坡的额尔齐斯河一级支流——卡依尔特斯河流域进行。卡依尔特斯河流域位于阿尔泰山中段南坡,北高南低,流域最低海拔 1 337 m,最高海拔 3 844 m,总面积约 2 365 km²。流域位于边境地区,人员稀少,仅在夏季有少量人类放牧活动。流域内以砂质土壤分布为主,土壤层较浅。地表植被状况较为丰富,阳坡及半阳坡主要分布草地和灌丛,半阴坡和阴坡以森林为主,综合森林覆盖率较高,2014 年流域的覆盖率达 39.2%,优势树种主要包括西伯利亚云杉、西伯利亚落叶松,也有部分白杨在低海拔区分布。流域内冬季酷寒,最低气温可达 -50 °C;每年 11 月至次年 4 月为流域的雪季,全流域均被积雪覆盖,最大积雪深度可达 1 m 以上,高海拔区的积雪可持续到 6 月份。卡依尔特斯河的洪水过程一般发生在 5-7 月^[24],最大瞬时径流超过 300 m³·s⁻¹,其中 6 月份的月均径流最大,接近 100 m³·s⁻¹,积雪融水和降水协同作用形成了流域的洪水过程;而 10 月至次年 4 月为河流枯水期,水量较小。近年来,伴随气候变暖,积雪消融提前,致使洪水过程有提前的趋势,特别地,5 月份的径流量增加较为明显。

2 数据资料及数据处理

本研究用到的数据全部来自于水利部阿勒泰水文勘测局库威水文站(台站编号:00101700;47°21′9.1″N,89°39′43.22″E;1 379 m a. s. l.)和中国科学院西北生态环境资源研究院库威积雪站(47°21′9.1″N,89°39′43.22″E;1 379 m a. s. l.)。库威水文站始建于 1957 年,但是降水的观测始于 1980s;库威积雪站建于 2011 年 8 月并于同期开始进行系统观测。库威水文站的降水观测采用 $\phi 20$ cm 型标准雨量筒(筒口直径 20 cm,筒口高出地面 70 cm),由人工观测完成;库威积雪站的降水由 T-200b 自动观测完成(图 1)。库威积雪站和库威水文站的雨量筒处于同一环境下,两个雨量筒的直线水平距离

不超过 10 m。需要说明的是,水文站的降水观测以北京时间 08:00 作为一天的起始时间,而库威积雪站则按照北京时间 00:00 作为一天的起始时间,为了保证数据对比的合理性,在数据处理的过程中,将降水事件作为降水的观测数据来进行对比分析。本文用到的降水数据包括 1980–2016 年库威水文站的数据和 2011–2016 年库威积雪站的观测数据。在数据处理过程中,为了数据比较更加便利,选择水文年而非自然年作为年降水数据统计的



图 1 库威水文站 $\phi 20$ cm 型标准雨量筒和库威积雪站 T-200b 自动降水观测设备

Fig. 1 Photo showing the $\phi 20$ cm standard rain gauge at Kuwei National Hydrological Station and T-200b rain gauge at Kuwei Snow Station

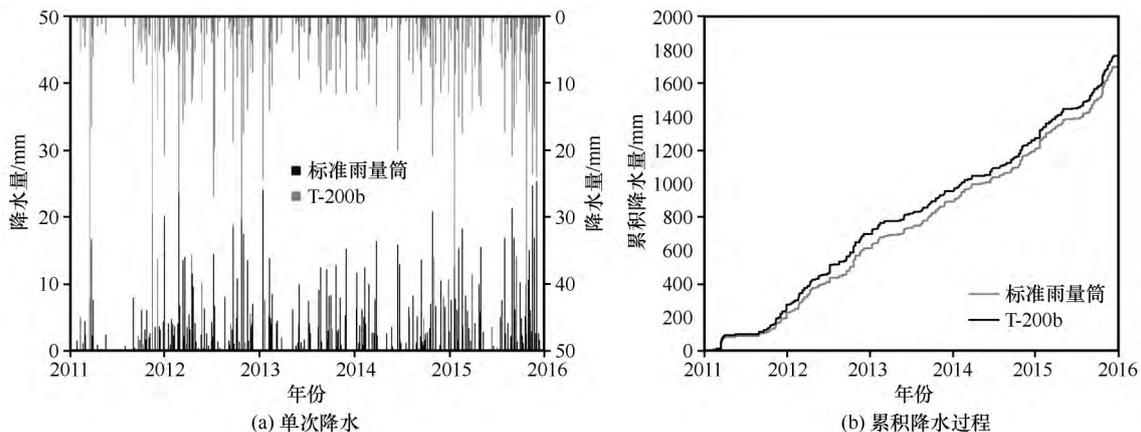


图 2 2011–2016 年卡依尔特斯河流域由 T-200b 和 $\phi 20$ cm 标准雨量筒观测的单次降水 (a) 和累积降水过程 (b)

Fig. 2 Precipitation events (a) and accumulated precipitation (b) during 2011–2016 hydrological years observed by $\phi 20$ cm standard rain gauge and T-200b rain gauge at the outlet of Kayiertesi River basin

时间尺度,即以每年的 9 月 1 日作为该年的起始日期。降水的状态根据库威积雪站积雪深度和雪枕观测的雪水当量进行判定。

3 结果及讨论

3.1 不同降水观测方法观测结果对比分析

3.1.1 降水事件统计分析

图 2 给出了 $\phi 20$ cm 标准雨量筒和 T-200b 观测的 2011–2016 年共 289 次降水事件(图 2a) 和累积降水(图 2b)。结果显示,额尔齐斯河源区的降水以 10 mm 以下的降水为主,5 年的次数合计为 234 次,约占全部降水的 80.97%; 10 ~ 24.9 mm 的降水共计 46 次,约占全部降水的 15.92%; 25 mm 以上的降水共计 7 次,仅占全部降水次数的 2.41%。最大的连续降水事件出现在 2016 年 6 月 23–25 日,三天的连续降水量达到了 47.2 mm($\phi 20$ cm 标准雨量筒观测的降水量为 48.8 mm)。对于 5 年的累积降水而言,T-200b 和 $\phi 20$ cm 标准雨量筒观测的累积降水分别为 1 758.4 mm 和 1 696.8 mm,T-200b 的观测结果比 $\phi 20$ cm 标准雨量筒大 61.6 mm。相较于 1 700 mm 左右的降水而言,61.6 mm 的降水误差致使总的降水量偏差在 5% 以内。

3.1.2 不同时间尺度两种观测方法对比分析

为了获得更加准确可靠的降水观测数据,我们将 2011–2016 年共计 5 年由 T-200b(P_1) 和 $\phi 20$ cm 标准雨量筒(P_2) 观测日降水量(单次降水)、月降水量和年降水量进行了系统地分析,相关结果如图 3 所示。上述三种时间尺度的降水量对比结果均显示出了较好的拟合结果,对于日尺度而言,T-200b 和 $\phi 20$ cm 标准雨量筒观测结果的拟合曲线为: $P_1 =$

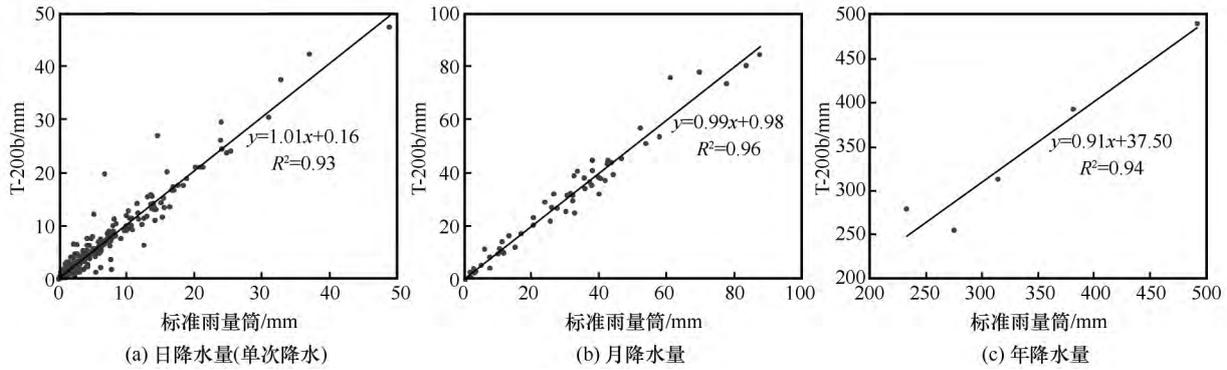


图 3 由 T-200b (P_t) 和 $\phi 20$ cm 标准雨量筒 (P_s) 观测的日降水量(单次降水) (a)、月降水量(b)和年降水量(c)拟合关系
 Fig. 3 Comparison between daily precipitation (a), monthly precipitation (b) and annual precipitation (c) observed by $\phi 20$ cm standard rain gauge and T-200b rain gauge at the outlet of Kayiertesi River basin during 2011-2016

$= 1.01P_s + 0.16$ ($n=289, R^2=0.93$); 对于月尺度而言, T-200b 和 $\phi 20$ cm 标准雨量筒观测结果的拟合曲线为: $P_t = 0.99P_s + 0.98$ ($n=60, R^2=0.96$); 对于年尺度而言, T-200b 和 $\phi 20$ cm 标准雨量筒观测结果的拟合曲线为: $P_t = 0.91P_s + 37.50$ ($n=5, R^2=0.94$)。总体上, 不同时间尺度情况下两种仪器观测的降水均表现出了很好的相关关系, 单次降水事件中 T-200b 观测的降水偏大, 但是对于月尺度和年尺度而言, 则相对偏小。对于长期的降水观测而言, T-200b 完全可以代替普通雨量筒的人工降水观测。

3.1.3 降水状态对不同仪器观测结果的影响

为了比较两种类型雨量筒对不同状态降水的观测精度, 我们根据库车积雪站积雪的观测数据, 对 2011-2016 年 289 次降水事件进行了降水状态区分, 结果表明, 在 5 个水文年内, 共观测到 183 次

降雨事件和 106 次降雪事件, 两种降水观测仪器记录的降水观测对比分析结果如图 4 所示。T-200b 和 $\phi 20$ cm 标准雨量筒观测的总降雨分别为 1 180.2 mm 和 1 157.6 mm, 观测的总降雪量分别为 578.2 mm 和 539.2 mm, T-200b 观测的总降雨量和降雪量均高于 $\phi 20$ cm 标准雨量筒, 其中总降雨量每年平均偏高 4.5 mm, 总降雪量每年平均偏高 7.8 mm。

对于单次降雨事件的对比分析结果表明, T-200b 和 $\phi 20$ cm 标准雨量筒观测结果的拟合曲线为: $P_t = 0.98P_s + 0.23$ ($n=183, R^2=0.96$), T-200b 的观测结果低于自动雨量筒的概率较大(图 4a); 对于单次降雪事件的对比分析结果表明, T-200b 和 $\phi 20$ cm 标准雨量筒观测结果的拟合曲线为: $P_t = 1.05P_s - 0.14$ ($n=106, R^2=0.93$), T-200b 的观测结果高于自动雨量筒的概率较大(图 4b)。

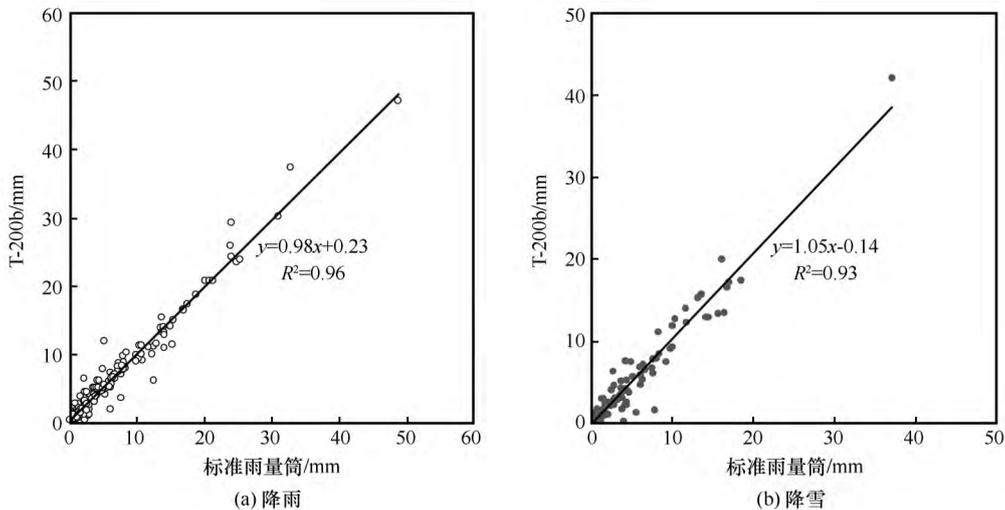


图 4 两种雨量筒对降雨(a)和降雪(b)观测结果的对比分析
 Fig. 4 Comparisons of rainfall events (a) and snowfall events (b) observed by $\phi 20$ cm standard rain gauge and T-200b rain gauge at the outlet of Kayiertesi River basin during 2011-2016

对于单次降水事件, T-200b 对固态降水的观测更接近真实值, 观测精度优于 $\phi 20$ cm 标准雨量筒, 两种类型的雨量筒对降雨的观测精度相当。

3.1.4 雨强对不同仪器观测的结果的影响

降雨强度也在不同程度上影响雨量筒的观测精度。为了对比分析 T-200b 和 $\phi 20$ cm 标准雨量筒在阿尔泰山地区对不同雨强的观测结果, 考虑到阿尔泰山地区降雨强度的特点, 根据 $\phi 20$ cm 标准雨量筒的观测结果, 我们人为地将 2011–2016 年的降水事件划分为四个等级: $0 \text{ mm} < P < 5 \text{ mm}$ 、 $5 \text{ mm} \leq P < 10 \text{ mm}$ 、 $10 \text{ mm} \leq P < 20 \text{ mm}$ 、 $P \geq 20 \text{ mm}$, 相关的对比分析结果如图 5 所示。上述四个等级降雨强度情况下 T-200b 和 $\phi 20$ cm 标准雨量筒的关系曲线分别为: $0 \text{ mm} < P < 5 \text{ mm}$, $P_t = 1.00P_s + 0.22$ ($n = 175$, $R^2 = 0.63$); $5 \text{ mm} \leq P < 10 \text{ mm}$, $P_t = 1.01P_s + 0.05$ ($n = 62$, $R^2 = 0.63$); $10 \text{ mm} \leq P < 20 \text{ mm}$, $P_t = 0.89P_s + 1.23$ ($n = 40$, $R^2 = 0.67$); $P \geq 20 \text{ mm}$, $P_t = 1.01P_s + 0.80$ ($n = 12$, $R^2 = 0.91$)。统计结果表明, 在上述不

同范围的降雨强度内, 由 T-200b 观测的降水过程总是大于 $\phi 20$ cm 标准雨量筒的观测结果; 但是具体到单次降水过程, 两种方法观测的降水存在较大区别, 另外, 随着降水强度的增加, 两种方法观测的降水相关性逐渐增强。

降水的观测精度受降水的状态、雨滴的大小、降雪颗粒的形状和大小、降水过程中的动力损失、浸润损失、蒸发损失、微量降水的缺测等因素的共同影响, 其中风速作为外界动力条件, 是造成上述影响条件发生作用的重要驱动^[12]。因此, 大量的降水观测修正研究也通过架设不同的防风圈来减弱风对降水的观测精度^[10]。库威水文站和库威积雪站的降水观测设施处于同一观测场地内, 将近 2 m 高的围墙距离 T-200b 自动雨量筒和 $\phi 20$ cm 标准雨量筒均不超过 5 m (图 1), 这样就在很大程度上减弱了风速对降水观测的影响。因此, 不同时间尺度、降水状态和降雨强度情境下, 2011–2016 年 T-200b 和 $\phi 20$ cm 标准雨量筒观测的降水均表现出

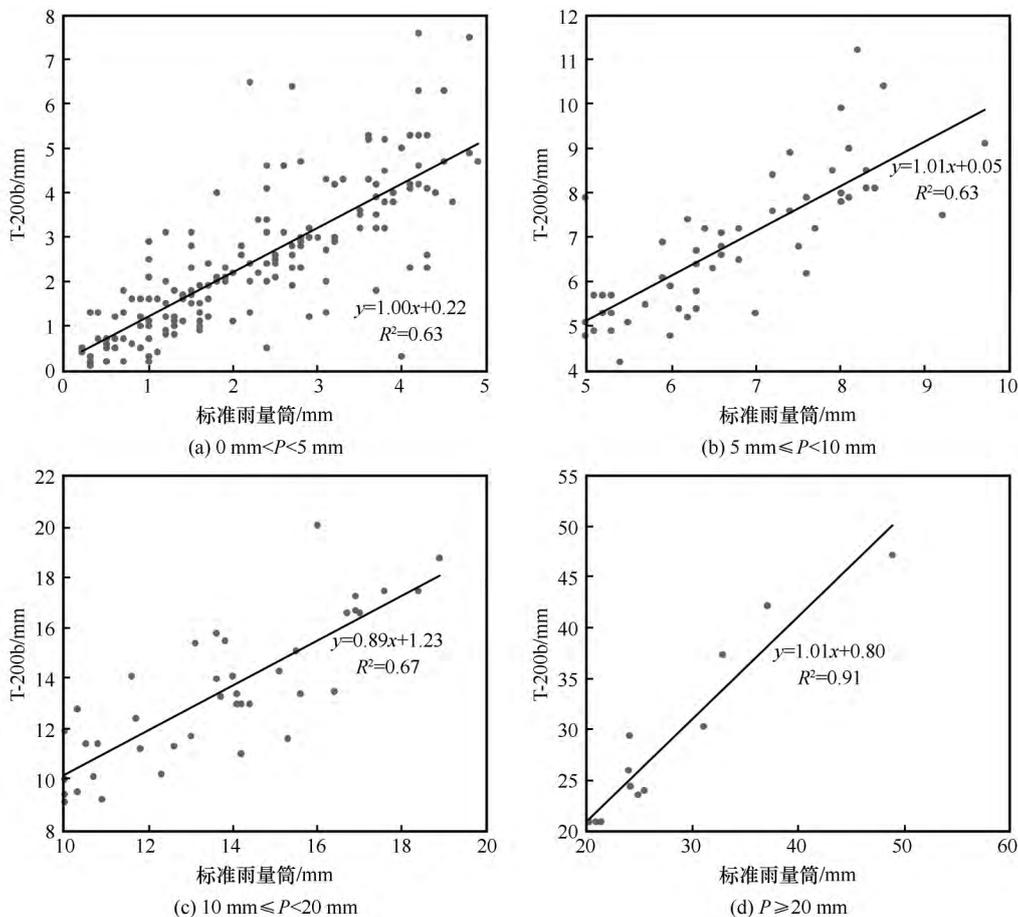


图 5 不同降雨强度下两种雨量筒观测结果对比分析

Fig. 5 Comparisons of precipitation for different rainfall intensities observed by $\phi 20$ cm standard rain gauge and T-200b rain gauge at the outlet of Kayiertesi River Basin during 2011–2016

了良好的相关性。

3.2 1980-2015 年额尔齐斯河源区降水变化

基于库威水文站 1980-2015 年的降水观测数据,我们分析了额尔齐斯河源区长期的降水变化(图 6)。1980-2015 年的平均年降水为 360.4 mm,属于典型的半干旱区,其中最大的年降水量出现在 2010 年(534.8 mm),最小年降水量出现在 1982 年(191.9 mm)。该地区最大月降水出现在 7 月份,

平均月降水为 48.8 mm,最小月降水量出现在 2 月份,平均月降水量仅为 12.7 mm,最大月降水量约为最小月降水量的 4 倍(图 6a)。总体来说,该地区的降水年内分配较为均匀,其中夏季(6-8 月)的降水最多,约占全年降水量的 34.1%,秋季和春季的降水量相当,分别占全年降水量的 28.6% 和 21.6%,冬季的降水最少,仅占全年降水量的 15.7%。

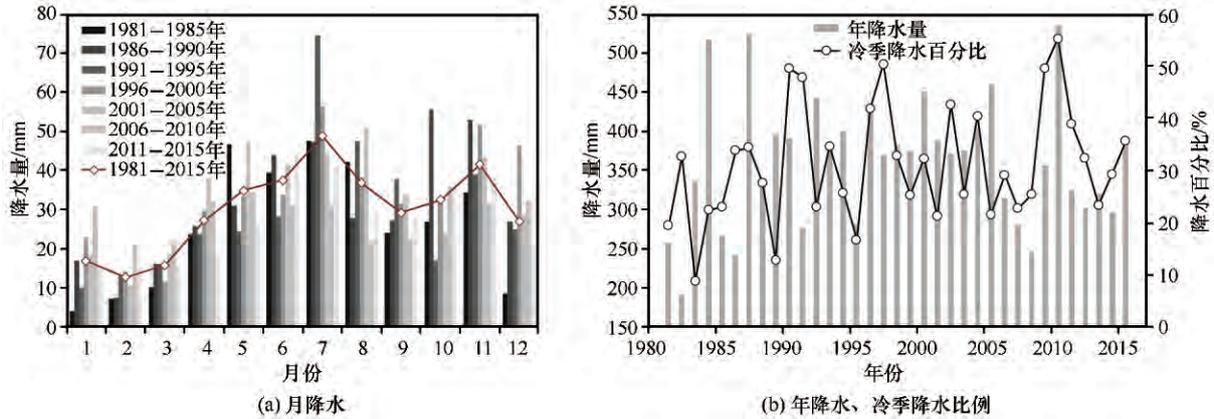


图 6 1980-2015 年额尔齐斯河源区月降水 (a) 和年降水、冷季降水比例变化 (b)

Fig. 6 Variations of monthly precipitation (a), annual precipitation and ratio of precipitation in cold season from November to March (b) during 1980-2015, observed in Kuwei National Hydrological Station

对于年降水量而言,1980-2015 年间额尔齐斯河源区的降水呈现出“先增加后减小”的变化趋势,具体表现为 1980-2005 年间,年降水量逐渐增加,随后,年降水量表现出逐渐减小的变化过程(图 6b)。对于月降水而言,1-4 月和 12 月的降水呈现出逐渐增加的趋势,7-8 月的降水有逐渐减小的变化趋势,其他月份的降水并没有表现出明显的变化趋势。就额尔齐斯河源区而言,11 月至次年 3 月的降水均以固态降水为主,为了分析该地区固态降水的变化,我们将 11 月至次年 3 月定义为冷季,冷季降水占年降水的比例定义为冷季降水百分比,1980-2015 年冷季降水百分比如图 6(b) 所示。冷季降水在 1980-2015 年间呈现出逐渐增加的变化趋势,表明固态降水在年降水中的份额增加。

降水流域水文过程的主要物质来源,降水的改变将在很大程度上影响区域水文过程。已有的研究表明,额尔齐斯河源区的水文过程已经出现了很大的改变,例如最大日径流逐渐由 6 月提前至 5 月,融雪型洪水出现的次数也表现出增加的变化趋势^[24]。气温和降水变化是引起额尔齐斯河水文过程改变最重要的原因,固态降水的增多致使冬季累积更多的积雪,在春季,升高的气温不仅导致积

雪融化提前,也使更多的积雪在较短的时间内融化。同时,增多的极端降水事件和增加的积雪融水叠加,导致融雪-降雨复合型洪水出现的频率增多,区域的防洪压力增大,另外,积雪的提前融化也导致水资源的年内分配改变,进一步增加区域水资源的压力。

4 结论

基于阿尔泰山额尔齐斯河源区库威水文站和库威积雪站 2011-2016 年的降水观测数据,根据不同的时间尺度、降水类型和降雨强度,我们对比分析了库威水文站 $\phi 20$ cm 标准雨量筒人工降水观测和库威积雪站 T-200b 自动降水观测的观测精度,在此基础上,基于 1980-2015 年库威水文站的降水观测数据,分析了阿尔泰山额尔齐斯河源区的降水变化特征。主要结论如下:

1) 降水对比分析结果表明:对于日尺度、月尺度和年尺度的降水观测, $\phi 20$ cm 标准雨量筒和 T-200b 观测的降水具有很好的一致性;对于降雨和固态降水,T-200b 和 $\phi 20$ cm 标准雨量筒对降雨的观测相关性优于固态降水;对于不同雨强的降水过程统计结果显示,T-200b 和 $\phi 20$ cm 标准雨量筒

观测的降水偏差较大,且随着雨强的增大,两种雨量筒观测的降水相关性逐渐增强。总体上,T-200b 和水文站 $\phi 20$ cm 标准雨量筒的观测具有很好的一致性,T-200b 观测的降水略高于 $\phi 20$ cm 标准雨量筒的观测结果,相关数据可以用来分析长期的气候变化。

2) 1980–2015 年阿尔泰山额尔齐斯河源区的降水观测结果显示,河源区的降水发生了很大的变化,主要表现在降水量和降水的年内分配上。在降水量上,年降水量呈现出以 2005 年为转折点出现了“先增大后减小”的变化趋势,但是总体上降水出现了增加;在降水的年内分配上,主要表现为冷季(11 月至次年 3 月)降水的增加,在很大程度上导致冷季降水(也就是降雪)占年降水量的比例明显增加。阿尔泰山额尔齐斯河源区降水变化将在很大程度上影响区域水资源的配置和利用。

致谢:感谢中国科学院西北生态环境资源研究院库威积雪站和阿勒泰水文勘测局库威水文站提供的宝贵观测数据。

参考文献(References):

- [1] Ding Baohong, Yang Kun, Qin Jun, et al. The dependence of precipitation types on surface elevation and meteorological conditions and its parameterization[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 513(11): 154–163.
- [2] Harpold A A, Kaplan M, Klos P Z, et al. Rain or snow: hydrologic processes, observations, prediction, and research needs [J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2017, 21(1): 1–48.
- [3] Ye Baisheng, Yang Daqing, Ding Yongjian, et al. A bias-corrected precipitation climatology for China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(1): 3–13. [叶柏生, 杨大庆, 丁永建, 等. 中国降水观测误差分析及其修正[J]. *地理学报*, 2007, 62(1): 3–13.]
- [4] Tian Xiangjun, Dai Aiguo, Yang Daqing, et al. Effects of precipitation-bias corrections on surface hydrology over northern latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(112): 161–167.
- [5] Ye Baisheng, Yang Daqing, Ma Lijuan. Effect of precipitation bias correction on water budget calculation in upper Yellow River, China [J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(25201): 1–10.
- [6] Zhang Feng. Hydrological information acquisition and processing [M]. Hefei: Hefei University of Technology Press, 2013. [张峰. 水文信息采集与处理[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2013.]
- [7] Liu Yujia, Chen Hongbin, Jin Dezheng, et al. Quality control and representativeness of automatic weather station rain gauge data[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 38(1): 159–170. [刘雨佳, 陈洪滨, 金德镇, 等. 加密自动气象站雨量计资料的质量控制及其相关关系的研究[J]. *大气科学*, 2014, 38(1): 159–170.]
- [8] Zhang Lele, Jiao Keqin, Zhao Lin, et al. Observations and analysis of the precipitation in the Beiluhe region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(1): 30–39. [张乐乐, 焦克勤, 赵林, 等. 青藏高原北麓河地区降水量观测与对比分析[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(1): 30–39.]
- [9] Colli M, Lanza L G, Rasmussen R, et al. The collection efficiency of shielded and unshielded precipitation gauges. Part 1: CFD airflow modelling [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17(1): 231–243.
- [10] Yang Daqing. Double Fence Intercomparison Reference (DFIR) vs. Bush Gauge for “true” snowfall measurement [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 509: 94–100.
- [11] Pan Xicai, Yang Daqing, Li Yanping, et al. Bias corrections of precipitation measurements across experimental sites in different ecoclimatic regions of western Canada [J]. *Cryosphere Discussions*, 2016, 10(5): 1–26.
- [12] Kochendorfer J, Rasmussen R, Wolff M, et al. The quantification and correction of wind-induced precipitation measurement errors [J]. *Hydrology and Earth System Science*, 2016, 21: 1973–1989.
- [13] Stisen S, H jberg A L, Troldborg L, et al. On the importance of appropriate rain-gauge catch correction for hydrological modelling at mid to high latitudes [J]. *Hydrology and Earth System Science*, 2012, 9: 3607–3655.
- [14] Zhao Qiudong, Ye Baisheng, He Xiaobo, et al. Bias correction of daily precipitation measured by Geonor T-200b precipitation gauge in Tanggula Mountain [J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(2): 452–459. [赵求东, 叶柏生, 何晓波, 等. 唐古拉山区 Geonor T-200b 雨雪量计日降水观测误差修正[J]. *高原气象*, 2014, 33(2): 452–459.]
- [15] Ye Baisheng, Cheng Peng, Yang Daqing, et al. Effects of the bias-correction on changing tendency of precipitation over China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(5): 717–725. [叶柏生, 成鹏, 杨大庆, 等. 降水观测误差修正对降水变化趋势的影响[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(5): 717–725.]
- [16] He Xiaobo, Ye Baisheng, Ding Yongjian. Bias correction for precipitation measurement in Tanggula Mountain Tibetan Plateau [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(3): 403–408. [何晓波, 叶柏生, 丁永建. 青藏高原唐古拉山区降水观测误差修正分析[J]. *水科学进展*, 2009, 20(3): 403–408.]
- [17] Zhang Linmei, Miao Yunling, Li Jianli, et al. Variations of summer extreme precipitation events in Altay Prefecture, Xinjiang region, from 1961 to 2010 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(5): 1199–1208. [张林梅, 苗云玲, 李健丽, 等. 新疆阿勒泰地区近 50 a 夏季极端降水事件变化特征[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(5): 1199–1208.]
- [18] Liu Xiaohong, Qin Dahe, Shao Xuemei, et al. Variation and abrupt change of precipitation in Nyingchi Prefecture of Tibet Autonomous in past 350 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(4): 375–379. [刘晓宏, 秦大河, 邵雪梅, 等. 西藏林芝地区近 350 a 来降水变化及突变分析[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(4): 375–379.]
- [19] Zhao Xuemin, Hu Caihong, Wu Zeyu, et al. Analysis on the spatiotemporal change of precipitation, flood and drought in the Fenhe River basin [J]. *Arid Zone Research*, 2007, 24(3): 349–354. [赵学敏, 胡彩虹, 吴泽宇, 等. 汾河流域降水及旱涝时空结构特征[J]. *干旱区研究*, 2007, 24(3): 349–354.]
- [20] Xu Yueqing, Li Shuangcheng, Cai Yunlong. Wavelet analysis of rainfall variation in the Hebei Plain [J]. *Science in China: Series*

- D Earth Sciences, 2005, 48(12): 2241–2250. [许月卿, 李双成, 蔡运龙. 基于小波分析的河北平原降水变化规律研究[J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 2004, 34(12): 1176–1183.]
- [21] Tian Lide, Yao Tandong, Macclune K, et al. Stable isotopic variations in west China: a consideration of moisture sources [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2007, 112(D10): 185–194.
- [22] Wu Xuejiao, Shen Yongping, Wang Ninglian, et al. Coupling the WRF model with a temperature index model based on remote sensing for snowmelt simulations in a river basin in the Altay Mountains, north-west China [J]. Hydrological Processes, 2016, 30(21): 3967–3977.
- [23] Zhang Wei. Study on snow hydrological processes in the headwater of Irtysh River, Chinese Altai Mountains [D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2016. [张伟. 阿尔泰山额尔齐斯河源区积雪水文过程研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2016.]
- [24] He Bin, Wang Guoya, Su Hongchao, et al. Response of extreme hydrological events to climate change in the regions of Altay Mountains, Xinjiang [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(4): 927–933. [贺斌, 王国亚, 苏红超, 等. 新疆阿尔泰山地区极端水文事件对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2012, 34(4): 927–933.]

Comparison of precipitation observed by T-200b and standard rain gauge and precipitation change during 1980–2015 in the headwaters of Irtysh River, Chinese Altai Mountains

HE Bin¹, ZHANG Wei², SHEN Yongping², LUO Guanghua³, HE Xiaobo², KANG Shichang²
 (1. Hydrology Reconnaissance Bureau of Altay Prefecture, Altay 836500, Xinjiang, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. College of Earth Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Assessing the observation accuracy of rainfall gauge is the first step to investigate the regional and global precipitation change. The comparison and analysis between T-200b rainfall gauge and $\phi 20$ cm standard rainfall gauge of China was carried out based on precipitation observations from 2011 to 2016 at Kuwei National Hydrological Station and Kuwei Snow Station in the headwaters of the Irtysh River basin, Chinese Altai Mountains. Then, the precipitation dataset during 1980–2015 from Kuwei National Hydrological Station was utilized to analyze the long-term precipitation change in this region. Comparison indicated that: (1) There are good relationships among daily, monthly and annual precipitations observed by the two methods; (2) The relationship for rainfall observed by the two methods is better than that for solid precipitation; (3) The relationship of precipitation observed by the two methods would get better with increasing rainfall intensity. Generally, the precipitation observed by T-200b is more than that by $\phi 20$ cm standard rainfall gauge. The annual precipitation in the headwaters of the Irtysh River had increased from 1980 to 2005, and then had slightly declined. Precipitation in cold season from November to March had significantly increased during 1980–2015, and the proportion of precipitation in cold season to annual precipitation had increased gradually.

Key words: the headwaters of Irtysh River, Chinese Altai Mountains; precipitation observation; 20 cm standard rainfall gauge; T-200b

(本文编辑: 周成林)