

青藏高原唐古拉山区降水观测误差修正分析

何晓波^{1,2}, 叶柏生², 丁永建²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所中国科学院生态水文与流域科学重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 青藏高原由于降水观测点分布等原因一直是水文和气候研究的薄弱环节。2005年5~10月在青藏高原唐古拉山中部冬克玛底河流域进行连续的人工气象观测。观测期间根据不同降水类型和气温之间的相关关系, 采用气温2.7℃为临界值对降水类型进行了划分, 利用已有的T-200B型自动雨雪量计和普通雨量计的修正公式, 并在日尺度基础上对降水进行了修正对比。经过修正, 中游T-200B型雨量站全年降水量662.1 mm; 普通雨量计全年降水量为657.2 mm; 2005年修正后的降水量相比1993年观测到的降水量472 mm增加了近200 mm。结果表明在高寒山区降水观测, 依据同步观测的气温划分降水类型, 可以根据相关修正公式修正T-200B型自动雨雪量计和普通雨量计降水观测值。从而能够在高寒山区恶劣的自然环境自动连续准确的观测高寒区域的降水。

关 键 词: 青藏高原; 唐古拉山; 降水观测; 误差修正; 降水类型

中图分类号: P332.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-6791(2009)03-0403-06

全球气候变暖对降水的影响, 就中国而言西部(大约以103°E为界)近30年来该区域年降水量表现出普遍增加的趋势。作为水文和气候研究的重点区域, 青藏高原由于地形、地势的复杂变化导致降水时空分布的极端复杂性, 同时因为降水观测点分布及人工观测局限性等原因使得降水资料的代表性一直是相关研究的薄弱环节^[1,2]; 另一方面, 对于气候寒冷的青藏高原地区, 固态降水所造成的观测误差对降水量的观测影响尤为强烈^[3,4]。因此, 青藏高原的降水观测是一个亟待解决的现实问题。

由于降水参数的重要性, 为了改善降水观测, 各种各样的防风圈被开发用以改变雨量计周围的流场进而改进雨量计对降水的捕捉能力^[5]。不同的雨量计和防风圈由于外形的差异其受气流影响的程度也不尽相同, 对降水测量误差修正主要取决于雨量计的类型和观测方式。本文所讨论的挪威产Geonor T-200B型自动雨雪量计已在北美、欧洲等国家观测网络以及一些研究计划中得到了广泛的应用, 并进行了相应的对比修正^[6]。近期国内也开始在青藏高原等高寒地区采用此仪器开展了相关降水观测。因此, 针对这一情况本文对青藏高原中部唐古拉山地区的降水观测进行了对比分析和修正。

1 观测区域概况及观测场设置

青藏高原中部唐古拉山脉冬克玛底河流域地理位置为东经92°00'、北纬33°04', 属长江上游通天河水系布曲河流域。张寅生1993年研究表明本区平均海拔在5000 m以上, 多年平均气温为-6.0℃, 5~9月份平均气温升至0℃以上; 降水集中于5~9月份, 降水量436.6 mm, 占全年比例为92.5%~94.1%。流域河谷内为多年冻土区, 地势平坦开阔, 适于降水对比观测。

根据气候条件和降水集中时间, 在流域上中下游3个地点布置了3个挪威产T-200B型自动雨雪量计降水观测; T-200B型自动雨雪量计采用振弦式称重感应器, 基本上可以忽略湿润损失; 其次利用在储集器中的防

收稿日期: 2008-08-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2007CB411501); 国家自然科学基金资助项目(40741001); 中国科学院重要方向性项目(KZCX3-SW-345)

作者简介: 何晓波(1977-), 男, 四川武胜人, 助理研究员, 博士, 主要从事寒区旱区水文水资源与环境研究。

E-mail: hxb@lzb.ac.cn

冻混合液融化固态降水, 以及添加机油, 从而避免了蒸发损失。T-200B 型自动雨雪量计属于总雨量计, 总容量为 600 mm(包括防冻液)、灵敏度为 0.1 mm, 测量温度范围 $-25 \sim 60^{\circ}\text{C}$ 。

上游雨量站海拔 5 270 m; 中游雨量站海拔 5 160 m(降水对比观测点); 下游出山口处雨量站海拔 5 040 m。所有雨量站均伴有自动气象观测项目, 其中包括风向风速(05103-L11/L36 型风向风速探头, Campbell 公司)、温度、湿度(HMP45C-L11/L36 型温度湿度探头, Campbell 公司)。人工观测采用普通雨量计严格按照《降水观测规范》测量, 其口径为 20 cm, 器口离地面 70 cm, 每日 8:00 和 20:00 统计; T-200B 型自动雨雪量计口径 20 cm, 器口距地面 150 cm, 防风圈距器口中心 50 cm, 记录时间步长为 30 min。

2 分析研究方法

1985 年开始, 世界气象组织发起了固态降水观测对比计划(WMO/CIMO 1985)。规定使用双层格栅对比参照雨量计(DFIR)作为降水观测真值标准对其它雨量计观测进行修正。Yang 等将美国气象局带防风圈的标准雨量计与 DFIR 进行了日降雪捕捉率对比观测。Yang 等根据降水类型和气温的数据关系分析认为当 $T \leq 0^{\circ}\text{C}$ 时降水类型为固态降水; $0^{\circ}\text{C} < T < 3^{\circ}\text{C}$ 时为混合降水。从而得出不同气温区间雨量计的相对捕捉率与风速的关系式^[7]。

因此, 在对其它各种雨量计降水量进行修正时, 也是从风速与相对捕捉率的关系入手。在条件允许的情况下, 对特定地域不同气温区间不同降水类型的降水展开分析。

2.1 相对捕捉率计算公式

Smith 在加拿大萨斯喀彻温省专门采用 DFIR 和 T-200B 型自动雨雪量计的降水观测进行了对比分析, 得出了 T-200B 型自动雨雪量计固态降水的相对捕捉率与风速之间的日平均关系公式^[8]为

$$CE = \frac{T}{DFIR} = \exp(-0.20U_a) \quad (1)$$

式中 CE 为相对捕捉率, %; T 为 T-200B 型自动雨雪量计所观测降水量值; $DFIR$ 为双层格栅对比参照雨量计观测降水量值; U_a 为雨量计器口高度的日平均风速。

修正结果显示 T-200B 型自动雨雪量计降水总积累量提高到 DFIR 的 87%, 远远高于未修正时的 36%, 效果明显。此外在降雨观测方面, T-200B 型自动雨雪量计观测较为理想, 平均相对捕捉率均达到了 90% 左右。

2.2 风速的确定

在降水相对捕捉率公式中需要雨量计器口处的风速, 但一般自动气象站在观测时并没有此高度的风速测量。根据 Goodison 等^[3], 器口高度风速可用以下公式计算:

$$U_a = [\lg(h/z_0)/\lg(H/z_0)] \times UH \quad (2)$$

式中 U_a 为器口高度风速; h 为器口距地面高度; z_0 为粗糙长度(冬季为 0.01); H 为风速测量高度; UH 为距地面高度处的风速。

在本文中所述的测量中均有与降水测量器口相应高度的风速测量可以直接应用。

根据 Yang 等^[7]利用 DFIR 进行对比实验中运用式(1)、式(2)时, 在当日平均风速超过 6 m/s 的情况下就要考虑公式的误差。而且此时 DFIR 对降水的测量低估也上升到 20%。同理式(3)也必须考虑较大风速的情况, 选择 6 m/s 作为参考风速上限。在考察期间, 3 个雨量站点日平均风速高于 6 m/s 仅出现在 4 月 10 日之前和 11 月 15 日后(图 1), 期间降水量少于全年 5%。修正的降水时段风速基本低于 6 m/s。

2.3 降水类型的判断

降水观测误差和降水类型也有很大的关系。一般来说液态降水和冰雹等降水类型的观测误差相对较小, 雪花观测误差范围就随雪的形态和风速的影响变化较大; 雪在青藏高原降水中占较大比例, 其相对捕捉率低。此外在全球变暖的背景下, 一方面由于温度的升高导致固态降水的比例下降, 液态降水增多, 普通雨量计的观测值也有相应的增加。因此也表现出全年降水量的增加, 水文和气候研究时应考虑这一问题。因此在近年来的西

部气候向暖湿转型的过程研究中就必须考虑降水数据的准确性。缺乏人工观测的情况下,降水类型划分对于降水观测的修正就变得很重要。

在缺少相关数据支持的情况,对降水类型划分主要依靠与当地气温的统计关系,Yang等^[7]在不同环境下对降水类型和气温关系研究发现雪发生的最大气温范围是从 $-4.1^{\circ}\text{C} \sim 2.6^{\circ}\text{C}$;混合降水气温范围是 $-8.6^{\circ}\text{C} \sim 7.3^{\circ}\text{C}$;降雨的最低气温为 -1.6°C 。Upadhyay通过分析认为气温小于 0°C 时98%的降水类型为雪,但Upadhyay认为在气温介于 $0^{\circ}\text{C} \sim 3^{\circ}\text{C}$ 时降水类型中雨或雪比例较大只有小部分情况为混合类型^[9]。另一方面 Fassnach等^[10,11]总结分析了气温和降水类型的关系,表明空气湿度是确定气温和降水类型关系的重要因子。

3 结果分析与讨论

3.1 降水类型判断

观测地点位于青藏高原唐古拉山多年冻土区,气候寒冷。2005年开展了从5月12日开始至10月5日共147 d的降水观测对比观测,无降水日34 d,降水日113 d:其中固态降水61 d,混合降水类型23 d,降雨29 d;固态降水的天数占到了观测时段的41%;降雨多集中于7、8月份,降水天数占观测时段的20%。观测期间日平均风速为 2.5 m/s ,日平均气温为 4.2°C ;平均相对空气湿度75.4%。

分析表明降水类型对湿度不敏感,观测到的固态降水发生时最大湿度范围从21.8%至99%;混合降水发生时最大湿度范围从59%至99%;降雨发生时最大湿度范围从44%至99%。

根据人工和自动观测数据对比分析,2005年固态降水最大日温度范围从 $-8.6 \sim 9.3^{\circ}\text{C}$,时间范围是6月中旬之前9月中旬之后。混合类型温度范围从 $2.4 \sim 8.9^{\circ}\text{C}$,时间范围为从6月21日至9月11日结束;降雨温度范围从 $2.7 \sim 9.2^{\circ}\text{C}$,时间范围从6月28日至9月4日。统计得出日气温低于 2.7°C 时没有发生纯液态降水,日气温低于 2.4°C 时降水均属于纯固态降水。依此,分别按照 2.7°C 和 2.4°C 的临界值和忽略混合类型降水的影响,简单的将低于临界值的降水划入固态降水进行降水类型的划分。

根据数据分析,在有人工观测的87次降水过程中,依靠不同温度划分降水类型的两套方案与现场人工观测相比较,准确率分别为80%、83%,相差不大。按照 2.7°C 确定的降水类型和人工观测的降水类型修正值更为接近(图2)。在观测时段内T-200B型自动雨雪量计计原始测量值为263.9 mm,采用式(1),两套温度方案修正值分别为296.7 mm和308.6 mm。根据实际观测的降水类型修正后的

降水量为311.2 mm。 2.7°C 划分降水类型和人工观测降水类型修正后的降水量相差2.6 mm。因此对比后选定 2.7°C 为降水类型划分的温度标准。

3.2 降水修正

3.2.1 普通雨量计修正

利用杨大庆^[12]在乌鲁木齐河流域所做的降水观测和降水修正,针对本次试验中的普通雨量计做了相应的

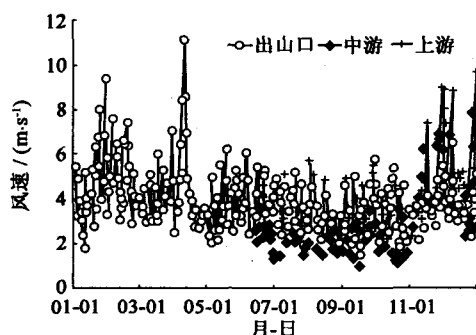


图1 2005年唐古拉山冬克马底冰川流域上中下游雨量站点日平均风速

Fig.1 Average wind velocity at 3 automatic rain gauge in Tanggula Mountain in 2005

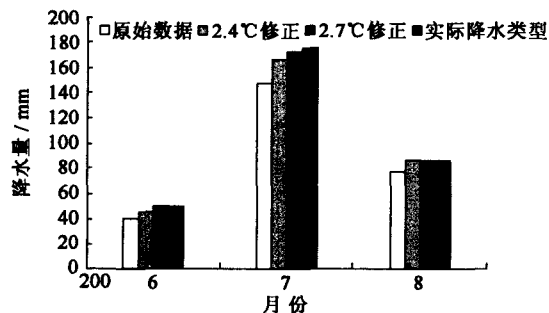


图2 冬克玛底流域中游不同温度降水修正月降水量

Fig.2 Bias-corrected precipitation according to temperature-classific precipitation type

误差修正和对比。

根据杨大庆等在乌鲁木齐河流域的对比观测所得出的中国标准普通雨量计的捕捉率与风速的关系为

$$\begin{aligned} CE_{\text{snow}} &= \exp(-0.056 W_s) \times 100 & (0 < W_s < 6.2) \\ CE_{\text{rain}} &= \exp(-0.040 W_s) \times 100 & (0 < W_s < 7.3) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 CE_{snow} 、 CE_{rain} 分别为降雪和降雨时捕捉率； W_s 是标准的 10 m 高度风速。

雨夹雪等混合降水类型按以下公式计算：

$$CE_{\text{mixed}} = CE_{\text{snow}} - (CE_{\text{snow}} - CE_{\text{rain}}) \times (T_d + 2)/4 \quad (4)$$

$$T_d = \begin{cases} -2 & (T < -2) \\ 2 & (T > 2) \\ T & (-2 \leq T \leq 2) \end{cases} \quad (5)$$

式中 CE_{mixed} 为混合降水捕捉率； T_d 为日平均温度。

考虑风速、降水量以及降水类型得出实际降水量计算公式为

$$P_c = \begin{cases} (P_g + \Delta P_w)/CE \\ \Delta P_l \end{cases} \quad (6)$$

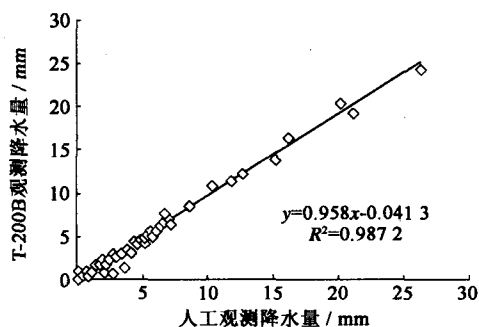


图 3 观测期间 T-200B 型自动雨雪量计与人工观测对比

Fig.3 Comparison of Automatic observations and manual observations in summer 2005

式中 P_c 为修正降水量； P_g 为器测降水量； ΔP_w 为湿润损失； ΔP_l 为微量降水损失(当日降水少于 0.1 mm 时计算采用)。

其中湿润损失对于降水日按 1 d 一次，降雪为 0.3 mm，降雨和混合降水为 0.29 mm；对于微降水日微量降水损失按 0.1 mm 修正直接加到降水量；忽略蒸发损失。本文中采用实际观测到的降水类型修正普通雨量计。

在对比时段内自动雨量计测得降水量 263.9 mm，人工测得 279.8 mm，人工观测比 T-200B 型自动雨雪量计多出 12.9 mm。单次降水观测数据对比显示两者相关性很好(图 3)，说明 T-200B 型自动雨雪量计可替代普通雨量计人工观测。

3.2.2 T-200B 型自动雨雪量计修正

在降水类型判断的基础上，采用式(3)和实测风速，对 T-200B 自动雨量计进行修正，以此得到较为贴近实际的降水量。表 1 是流域上游、中游和出山口 T-200B 型自动雨雪量计的原始观测值、利用气温划分降水类型以及人工观测降水类型为验证的修正对比。

对比结果表明：在有人工观测降水类型的中游，按照 2.7℃ 的临界值划分降水类型修正后的降水量基本与人工观测降水类型修正降水量一致，相对捕捉率(CE)平均为 86%。依此，分别对上游和出山口自动降水量观测进行了修正(表 1)。从表 1 中可以看出，6~8 月雨量计的修正不是很大，这与降雨时间范围 6 月 28 日至 9 月 4 日相符合。上游和出山口在其它时段相对捕捉率(CE)较低导致降水量修正大幅度增加分别为上游 9 月后月降水量的修正均高于 70%；出山口月修正均高于 60%，最高时超过 200%。原因是这期间观测降水量较少，降水类型全部为降雪，且期间风速较大。

利用气温划分降水类型所得修正降水量值相对雨量计原始观测值提高约 16.8%，而根据实际观测的降水类型计算所得的降水量值较原始观测值提高 17.7%。其主要原因是实际观测的固态降水量要多于依据温度划分的固态降水量。对比出山口同期降水在全年所占比例推算流域上游和中游全年降水量。上游全年降水量为 651 mm；中游同比修正降水量为 662.1 mm；出山口全年修正值为 567.7 mm。在冬克玛底冰川流域由于地形影响导致局部降水不均匀，下游降水明显偏低，中游略高于上游。

利用划分降水类型的温度指标修正 T-200B 型自动雨雪量计的降水量观测值完全可以适应高原恶劣的自然环境, 并对降水进行长期自动的观测。相比 1993 年观测所得的降水量, 在相同地点观测修正后的年降水量 662.1 mm 远大于当时的全年降水量 472 mm^[13]; 接近 200 mm 的降水增量对于青藏高原水文和气候研究有着重大的意义和价值。

表 1 观测期间 T-200B 型自动雨雪量计测量值与气温划分降水类型以及实际观测降水修正对比 mm
Table.1 Monthly precipitation measured by T-200B and bias-corrected precipitation according to measured and temperature-classific precipitation type in 2005 in Tanggula Mountain

月份	出 山 口				中 游				上 游			
	测量值	实测修正	温度修正	修正率/%	测量值	实测修正	温度修正	修正率/%	测量值	实测修正	温度修正	修正率/%
1	2.3		8.5	270								
2	2.5		6.5	160								
3	2.0		6.5	225								
4	11.9		27.0	127								
5	30.9		60.3	95								
6	47.8	74.1	67.6	41	40.1	50.1	50.0	25	43.5	60.3	56.8	31
7	105.7	132.1	117.7	11	146.3	175.3	172.5	18	133.3	153.9	162.0	22
8	118.3	133.8	131.4	11	77.5	85.8	86.1	11	115.6	132.6	137.7	19
9	67.0	117.0	107.3	60					69.2	124.1	123.2	78
10	12.5		25.0	100					21.1		37.3	77
11	3.5		6.6	89					3.1		5.4	74
12	1.5		3.2	113					0.0		0.0	

4 结 论

唐古拉冬克玛底冰川流域位于青藏高原腹部, 属于低纬高山高原寒区。本区气候恶劣、交通不便, 是降水观测极为困难的典型高寒山区。本区降水主要集中于 5~9 月, 降水类型多为固态降水。观测时期纯降雨天数仅有 29 d, 其余时间多为固态降水。经过 5 个月的 T-200B 型自动雨雪量计降水量与人工降水观测分析, 依据气温和降水类型之间的统计关系, 完全可以利用式(1)和式(3)修正 T-200B 型自动雨雪量计和普通雨量计的观测数据。根据实测资料修正后观测时段 2005 年冬克玛底冰川流域上游全年降水量为 651 mm; 中游为 662.1 mm; 出山口全年降水量为 567.7 mm。通过实际观测的降水类型修正同期观测的普通雨量计, 全年降水量为 657.2 mm。两种方法修正后的降水远高于前人对本区降水的观测。同时也验证了 T-200B 型自动雨雪量计在恶劣自然环境测量降水的效率, 为高原降水观测提供了又一便捷长期有效的观测仪器。为以后青藏高原各项水文和气候研究工作做好了铺垫。

致谢: 野外观测过程中, 得到了冬克玛底冰川考察队全体队员的支持和帮助, 在此深表谢意。

参考文献:

[1] 舒守娟, 王元, 李艳. 西藏高原地形扰动对其降水分布影响的研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(5):585 - 591. (SHU Shou-juan, WANG Yuan, LI Yan. Effect of topographic perturbation on the precipitation distribution in Tibetan Plateau[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(5):585 - 591. (in Chinese))

[2] 张杰, 李栋梁, 何金梅, 等. 地形对青藏高原丰枯水年雨季降水量空间分布的影响[J]. 水科学进展, 2007, 18(3):319 - 326. (ZHANG Jie, LI Dong-liang, HE Jin-mei, et al. Nfluence of terrain on precipitation distribution in Qingzang tableland in wet and dry years [J]. Advances In Water Science, 2007, 18(3):319 - 326. (in Chinese))

[3] GOODISON B E, LOUIE P Y T, YANG D. WMO solid precipitation measurement intercomparison, final report, WMO/TD No. 872[R]. Geneva: WMO, 1998: 212.

[4] YANG D, METCALFE J R, GOODSION B E, et al. "True snowfall": An evaluation of the double fence intercomparison reference gauge, proc [C]//50th Eastern Snow Conference/61st Western Snow Conference, Quebec City:[s.n.], 1993: 105 - 111.

- [5] YANG D. An improved precipitation climatology for the Arctic Ocean[J]. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 1625 – 1628.
- [6] MARJORIE M G, GRANT G, EDWIN M, et al. Performance of the NOAA USCRN Weighing-bucket precipitation gauges during the heavy snowstorm event of 5-8 december 2003[C]// NOAA Technical Note Elizabeth Weatherhead, Recommendations for Assuring the Quality of the Geonor Precipitation Data. Colorado: University of Colorado, 2003.
- [7] YANG D, GOODSON B E, METCALFE J R, et al. Accuracy of NWS 800 standard nonrecording precipitation gauge: Results and application of WMO intercomparison[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15: 54 – 68.
- [8] SMITH C D. Correcting the wind bias in snowfall measurements made with a GEONOR T-200B precipitation gauge and alter winn shield[C/OL] // http://ams.confex.com/ams/87ANNUAL/techprogram/session_19849.htm, 2006.
- [9] UPADHYAY D S. Cold climate hydrometeorology[D]. New York: Western Snow Conference, Quebec City, 1995: 105 – 111.
- [10] FASSNACHT S R, KOUWEN N, SOULIS E D. Surface temperature adjustments to improve weather radar representation of multi-temporal winter precipitation accumulations[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 253(1 – 4): 148 – 168.
- [11] FASSNACHT S R. Estimating alter-shielded gauge snowfall undercatch, snowpack sublimation, and blowing snow transport at six sites in the coterminous United States[J]. *Hydrolog Process*, 2004, 18(18): 3481 – 3492.
- [12] 杨大庆, 姜彤, 张寅生, 等. 天山乌鲁木齐河源降水观测误差分析及其改正[J]. *冰川冻土*, 1988, 10(4): 384 – 399. (YANG Da-qing, JIANG Tong, ZHANG Yin-sheng, et al. Analysis and correction of errors in precipitation measurement at the head of Urumqi River Tianshan[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1988, 10(4): 384 – 399. (in Chinese))
- [13] 张寅生, 姚檀栋, 蒲健辰, 等. 青藏高原唐古拉山冬克玛底河流域水文过程特征分析[J]. *冰川冻土*, 1997, 19(3): 214 – 222. (ZHANG Yin-sheng, YAO Tan-dong, PU Jian-chen, et al. The features of hydrological processes in the Dongkemadi river basin, Tanggula Pass, Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1997, 19(3): 214 – 222. (in Chinese))

Bias correction for precipitation measurement in Tanggula Mountain Tibetan Plateau^{*}

HE Xiao-bo^{1,2}, YE Bai-sheng², DING Yong-jian²

(1. Key Laboratory of Ecohydrology and Integrated River Basin Science, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering

Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Cold and Arid

Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: This paper presents the results of bias corrections for Geonor T-200B Pluviometer and Chinese standard precipitation gauge (CSPG) measurements in the middle of Tanggula Mountain, Tibetan Plateau. The precipitation observation in frigid mountainous areas is always the bottleneck for studies of regional hydrology and climate. During May-December 2005, a continuous meteorological measurement was conducted in the Dongkemadi glacial drainage. In the meantime, we take up a comparative analysis of the precipitation observation between ability of Geonor T-200B Pluviometer and CSPG. Based on the correlative relationship between precipitation type and temperature, the precipitation type can be divided by using the observed contemporary temperature 2.7°C in the mountainous areas, therefore, the observed precipitation values are corrected. The bias corrections results show that the corrected precipitation value (662.1 mm) of T-200B Pluviometer is closer to the corrected value (657.2 mm) of CSPG. The precipitation in 2005 compared with that of 1993 increases by 200 mm because of the bias corrections. Therefore, this study has great importance for reducing precipitation observation error in the frigid mountainous areas.

Key words: Tibetan Plateau; Tanggula Mountain; precipitation observation; error correction; precipitation type

^{*} The study is financially supported by the National Basic Research Program of China (No.2007CB411501) and the National Natural Science Foundation of China (No.40741001).