

天山乌鲁木齐河源降水观测误差分析 及其改正^①

杨大庆 姜 彤 张寅生 康尔泗

(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

提 要 乌鲁木齐河源不同雨量计观测降水对比以及普通雨量计湿润损失和蒸发损失实验表明,普通雨量计观测降水中的动力损失(修正量/观测降水量)为13.9%,湿润损失为8.4%,蒸发损失为3.7%,三项之和为26.0%。修正以上观测偏差,得到乌鲁木齐河源1号冰川粒雪线处(4050 m)年平均降水量645.8 mm。

关键词 山地降水 降水观测 雨量计 误差 修正

降水是水资源的主要收入部分,是气候评价、水量平衡及水文模型的重要输入参数。雨量计观测降水受众多因素的影响,因此其观测值与实际降水量常有一定的偏差。目前较普遍发现这种偏差是负的,即雨量计观测值比实际降水量系统偏小,尤其降雪观测偏小严重。在山区和高纬度地区,由于雨量计观测值明显偏低,使得不少河流出现年径流量超过年降水量的不合理现象。

雨量计观测降水的误差分析表明,造成观测降水量比实际降水量系统偏小的原因主要是风对雨量计承受降水的干扰(称为动力损失);雨量计承水器和储水筒(瓶)内壁对部分降水的吸附(称为湿润损失);以及降水停止到观测时刻和降水间歇期内雨量计储水瓶(筒)中水分的蒸发(称为蒸发损失)。在以上原因中,风对雨量计的影响最大,它可使固态降水观测值比实际降水量最多偏小50%;其次为湿润损失,它的最大值为实际降水量的10%;蒸发损失最小,其最大值一般不超过实际降水量的4%(Sevruk, 1985a)。为了修正降水观测中的上述偏差,国外一些国家先后开展不同雨量计观测降水对比实验研究(Helmert, 1954; Huff, 1955; Allis, 1963; Rawls, 1975; Hanson, 1979; Bergman, 1982; Sturges, 1984; Haupt, 1972; Goodison, 1978, 1982; Green, 1972; Sevruk, 1972),取得了许多积极的成果(WMO, 1985a)。

国内有人注意到雨量计观测降水量比实际降水量系统偏小问题(谢自楚, 1965; 张海仑, 1982; 林之光, 1983; 张家诚、林之光, 1985),也开展了一些研究工作(陈天玢, 1983; 不同高度雨量协作组^②, 1986)。1985年施雅风教授从雨量计观测降水量偏小影响水资源计算和评价的高度认识这个问题,将其列入他主持的“乌鲁木齐地区水资

^①本文于1987年5月4日收到,1987年8月27日改回。

^②不同高度雨量试验协作组(1986):全国不同高度雨量试验成果报告(讨论稿)。

源若干问题研究”课题, 当年夏季参加该课题的研究人员在博格达山南坡黑沟和乌鲁木齐河源 1 号冰川做了部分观测工作,^① 取得一些初步成果^②。1986 年夏季, 我们在乌鲁木齐河源开展不同雨量计观测降水对比实验研究, 其中包括普通雨量计的湿润损失和蒸发损失实验, 目的是确定观测环境下, 雨量计观测降水时动力损失、湿润损失和蒸发损失的量级, 建立修正方案, 修正已往的降水观测资料。

一、观测场的布设

雨量计观测降水对比实验 (简称为降水对比观测) 是用不同类型的雨量计在某一地点同时进行降水观测, 以评价各种雨量计的优劣, 选择出最能反映实际降水量的观测方法和仪器类型, 为修正已往降水观测资料中的动力损失提供依据。降水对比观测场一般应靠近基本气象站, 以便得到气温、湿度、风向风速等同步资料。我们的降水对比观测场布设在大西沟气象站观测场 ($43^{\circ}06'N$, $87^{\circ}15'E$, 3540 m) 南面 30 m 处, 这里地势开阔, 无障碍物。降水对比观测场放有 7 只口径为 20 cm 的雨量计, 它们可以分为两组 (图 1)。第一组雨量计器口距地面高度为 2 m, 包括 3 只普通雨量计, 其中 2 只雨量计分别配有尼费尔 (Nipher) 和苏联特立奇耶克夫 (Tretyakov) 防风圈 (分别简

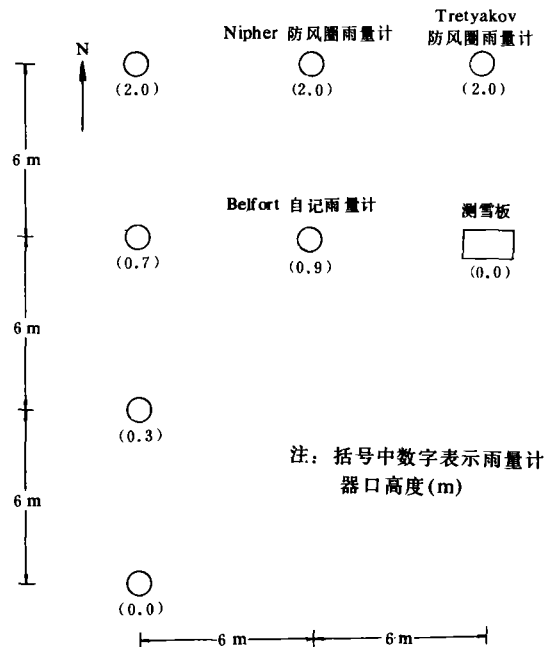


图 1 大西沟气象站降水对比观测场示意图

Fig.1 Position of precipitation gauges in the field site at the head of the Urumqi River

①王宗太等(1986):博格达南坡高山区降水量的测算,一九八五年乌鲁木齐地区水资源若干问题研究报告汇编。
②姜彤等(1986):乌鲁木齐河源降水规律的初步探讨。

称为尼式和特式防风圈), 另一只雨量计不带防风圈。尼式防风圈(照片 1) 是加拿大的标准防风圈, Goodison (1975, 1978) 等人 (Harris, 1974) 指出这种防风圈的防风作用较好。特式防风圈(照片 2) 曾于 50 年代在国内用来观测固态降水(水利电力部水文局, 1958), 以后被取消了(中央气象局, 1979)。降水对比观测场的另一组雨量计包括 4 只普通雨量计和 1 只 Belford 称重式自记雨量计, 它们都不带防风圈, 器口高度分别为 2.0、0.7、0.3、和 0.0 m, Belford 周记雨量计的器口高度为 1.0 m, 这种雨量计的储水筒中放有防冻液, 可以用来观测固态降水。除雨量计之外, 降水对比观测场地面放有 90×60 cm 的一块测雪板, 降大雪时在板上取样, 确定新雪密度和雪深, 计算雪水当量(以 mm 为单位的降水量)。

按照上述方式布设观测仪器有三个意图。首先, 通过第一组雨量计的对比观测, 确定防风圈的效用; 其次, 分析第二组雨量计的对比观测资料, 确定雨量计安放高度(以器口高度表示)对其捕捉降水的影响; 第三, 对比雨量计和测雪板的观测值, 了解测雪板在本地区的适用性。大西沟气象站的降水对比观测从 1986 年 5 月 1 日开始, 到 8 月 31 日结束, 这期间共观测降水 78 次。

二、降水对比观测资料的统计分析

从空气动力学角度分析, 风影响雨量计承接降水, 其原因是当空气运动时, 雨量计周围的流场发生变化, 流线严重变形。雨量计器口的迎风部位有上升气流, 气流水平流速降低, 而器口上部气流水平流速加大, 改变了雨滴或雪粒的下降路径, 使其几乎与地面平行, 从而使雨雪飘走, 而不进入雨量计。这种现象称为雨雪飘溢(林之光, 1983), 飘溢现象的强弱与降水形态有关。因此, 在统计降水对比观测资料时, 最好依降水形态来分类。

表 1 大西沟气象站降水对比观测资料的分类统计

Table 1 Total precipitation (mm) caught by gauges placed in the field site at the head of the Urumqi River

雨量计	S	S	S	S	Tretyakov	Nipher	降水
器口高度(m)	0.0	0.3	0.7	2.0	2.0	2.0	
雨量计编号	G	No.1	No.2	No.5	No.6	No.7	形态
合计值(mm)	60.9	57.5	57.1	54.1	55.9	55.7	雨
相对值(%)	106.7	100.7	100.0	94.7	97.9	97.5	
合计值(mm)	35.3	32.5	30.8	29.4	31.6	33.9	雨夹雪
相对值(%)	114.6	105.5	100.0	95.5	102.6	110.1	
合计值(mm)	106.5	94.5	91.9	86.3	98.7	92.8	雪
相对值(%)	115.9	102.8	100.0	93.9	107.4	101.0	
总计(mm)	202.7	184.4	179.8	169.7	186.1	182.3	
相对值(%)	112.7	102.6	100.0	94.3	103.5	101.4	

注: “S”代表不带防风圈的普通雨量计。

表 1 是不同降水形态下, 大西沟气象站降水对比观测场各种雨量计观测降水量的合计值和相对值 (相对捕捉率)。相对值的计算以国内标准雨量计 (器口高度为 0.7 m) 的观测值为标准, 假定它为 100。

1. 防风圈的效用

对器口位于 2 m 的三只雨量计进行对比 (表 1), 发现在三种降水形态下, 带有特式防风圈的雨量计和带有尼式防风圈的雨量计的相对值, 总高于不带防风圈的普通雨量计。这表明用防风圈能够提高雨量计的捕捉降水率。但这种提高对不同的防风圈是不相同的, 对同一种防风圈在不同的降水形态下也是有差异的。

对尼式防风圈而言, 雨夹雪时其防风作用比降雪时明显。这可能是因为乌鲁木齐河源夏季雨夹雪中有时含有冰雹和霰, 它们在尼式防风圈上溅起, 进入雨量计, 增大了降水观测值。特式防风圈的防风作用降雪时最明显, 降雨时次之, 雨夹雪再次。特式防风圈和尼式防风圈对比, 在降雨和降雪时, 前者提高的捕捉率均高于后者, 尤其降雪时相差较大 (表 2)。因此可以认为, 在观测环境下, 特式防风圈的防风效果比尼式防风圈好。

表 2 带防风圈雨量计与同高度普通雨量计相对捕捉率之差(%)
Tabel 2 Difference of relative catch ratio (%) between shielded and unshielded gauges

差 项	特式防风圈雨量计 -普通雨量计	尼式防风圈雨量计 -普通雨量计
雨	3.3	2.8
雨夹雪	7.1	14.6
雪	14.2	11.1

2. 雨量计器口高度与相对捕捉率的关系

对比器口位于不同高度四只普通雨量计观测降水量的合计值和相对值 (表 1), 我们发现, 随着雨量计器口高度的升高, 其相对捕捉率下降。器口与地面齐平的地面雨量计比器口位于 0.7 m 的标准雨量计多捕捉降水 13%, 器口高度为 0.3 m 的雨量计比标准雨量计多捕捉降水 3%, 而器口位于 2 m 的雨量计比标准雨量计少捕捉降水 5% 左右。

在不同高度雨量计中, 地面雨量计受风的影响最小, 捕捉降水能力强。但这种雨量计在遇到高强度降雨时, 可能接受部分降水的溅入补充, 使观测值偏大。另外, 在冬季积雪条件下, 因受风吹雪的严重干扰而无法使用。器口高度为 0.3 m 的雨量计, 其捕捉率比标准雨量计高, 并且几乎不受雨滴溅入干扰。所以, 在冬季无积雪或积雪深度不大的地区, 尤其在南方, 可以考虑用它取代器口高度为 0.7 m 的标准雨量计。

图 2 是不同降水形态下, 雨量计器口高度 (H) 和相对捕捉率 (R') 的关系曲线。图中降雪时曲线较陡, 降雨时则平缓, 表明降雪观测中雨量计受风的影响比降雨观测中严重, 在降雪观测时降低雨量计器口高度提高的捕捉率比降雨观测时大。

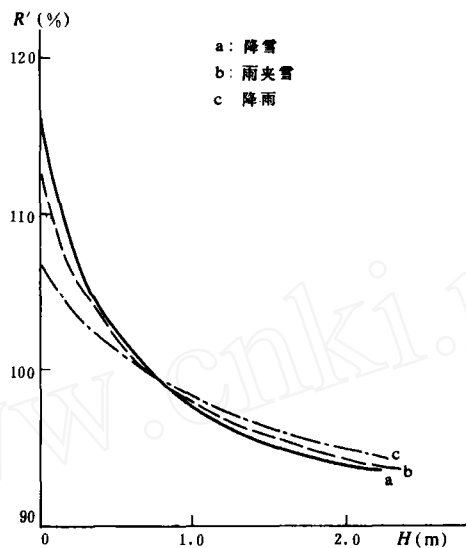


图 2 雨量计器口高度(H)与相对捕捉率(R')的关系

Fig.2 Variation in relative catch (R') with height (H) of a gauge

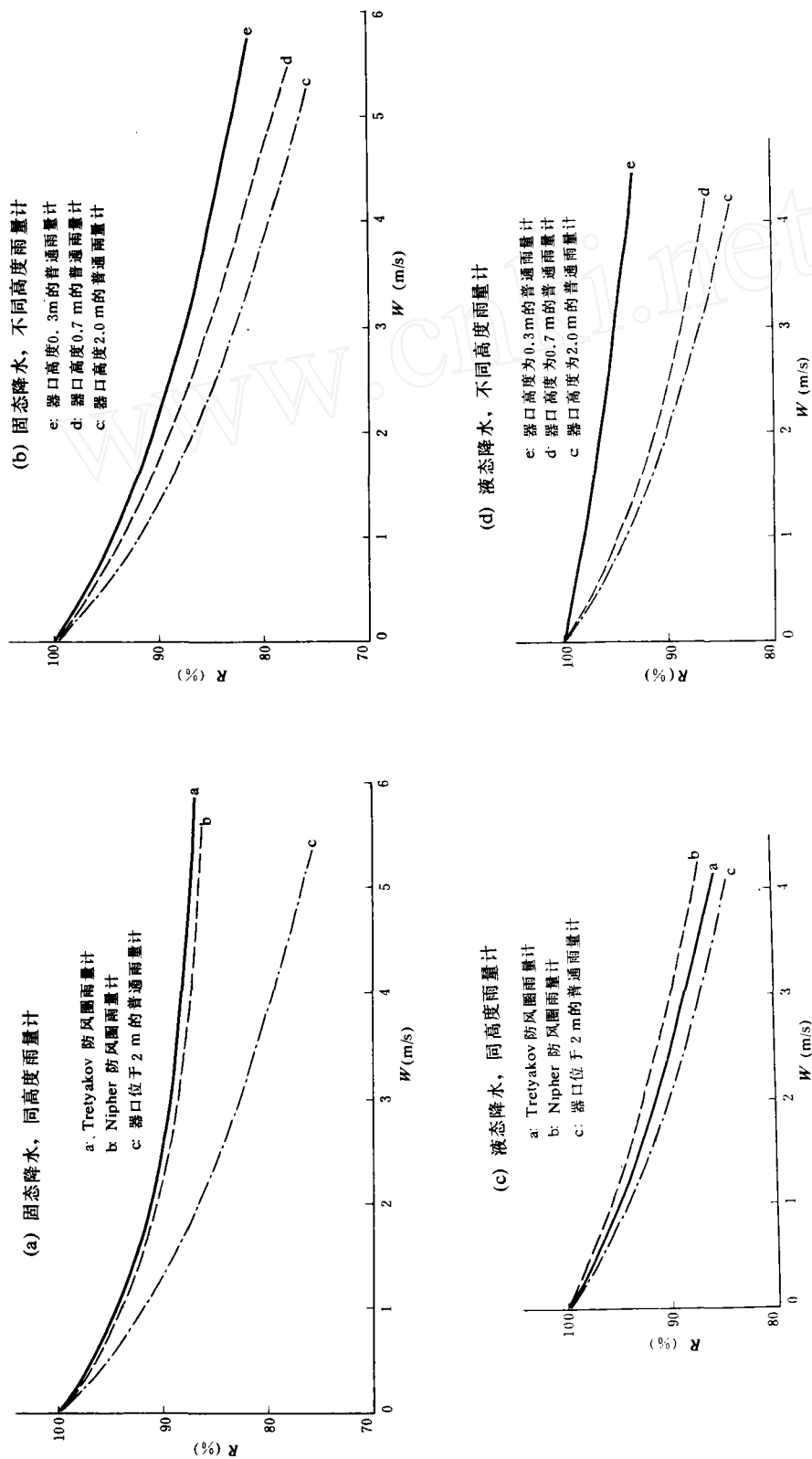
三、降水时段平均风速与捕捉率的关系

捕捉率是雨量计的观测降水量与实际降水量的比值(用百分率表示)。由于雨量计观测降水时存在多种误差,因此实际降水量或真实降水量很难确定。大西沟气象站所处的乌鲁木齐河源地区,夏季降水以雪和雨夹雪为主,地面基本无积雪。降水对比观测场所用地面雨量计很少接受降雨溅入补充,也不会受风吹雪的干扰,因此其观测值接近实际降水量,在计算捕捉率时可视为相对真值。

雨量计捕捉率的高低,除了其结构和安装方式外,主要决定于降水形态及降水时段风速的大小。我们在降水对比观测实验中用同一种雨量计和同样的观测方法,所以各雨量计捕捉率的高低,完全决定于雨量计的安装方式(器口高度以及有无防风圈)和降水形态及降水时段的风速。大西沟气象站有自记风向风速仪,其感应高度(风杯高度)为 10.8 m。从降水对比观测资料中选择降水量大于 2.0 mm 的降水过程,以地面雨量计观测值为相对真值,计算各雨量计的捕捉降水率(R),与相应的降水时段平均风速($\bar{W}$)建立关系(图 3),得到以下结论。

1. 降雪条件下

在器口高度为 2 m 的三只雨量计中,特式防风圈雨量计捕捉率与降水时段平均风速的关系曲线略高于尼式防风圈雨量计,而不带防风圈雨量计的 $R-\bar{W}$ 关系曲线,远远低于上面两种带防风圈者,尤其在大风条件下相差较大。例如,在降水过程中,当观测场 10.8 m 高度的平均风速为 5.0 m/s 时,特式防风圈雨量计的捕捉率为 87.5%,尼式防风圈雨量计的捕捉率为 86.5%,而器口位于同样高度的普通雨量计的捕捉率仅为 76.5% (图 3-a)。由此可以看出防风圈的效用。

图 3 降水时段平均风速($\bar{W}$)与捕捉率(R)的关系Fig.3 Catch ratio (%) versus average wind speed ($\bar{W}$) during storm

器口位于 0.3、0.7 和 2.0 m 的三只雨量计对比 (图 3-b), 可见随着雨量计器口高度的上升, $R-\overline{W}$ 关系曲线变陡。这说明当风杯高度具有同样风速时, 雨量计器口越高, 其捕捉降水率越低。反之, 雨量计器口越低, 其捕捉降水率越高。例如, 当降水时段平均风速为 5 m/s 时, 0.3 m 高度 (器口高度) 雨量计的捕捉率为 83%, 0.7 m 高度雨量计的捕捉率为 79%, 2.0 m 高度雨量计的捕捉率仅为 76.5%。

对比图 3-a 和 3-b 中的曲线 a、b、d、e 可知, 降雪条件下, 使用特式和尼式防风圈比降低雨量计高度到 0.3 m, 能更有效地提高捕捉率, 在大风条件下更是如此。

2. 降雨条件下

和降雪时不同, 器口位于 2 m 高度的三只雨量计, 在降水时段平均风速相同时, 尼式防风圈雨量计的捕捉率最高, 特式防风圈雨量计次之, 普通雨量计最低 (图 3-c)。降雨观测中尼式防风圈雨量计的捕捉率高于特式防风圈的原因, 可能和尼式防风圈特有的形状所引起的边沿溅水有关。

和降雪观测中相同, 不同高度的三只雨量计的 $R-\overline{W}$ 关系曲线, 仍然是 0.3 m 雨量计的最高, 0.7 m 标准雨量计的居中, 2.0 m 高度雨量计的最低 (图 3-d)。另外, 对比图 3-c 和 3-d 中的曲线 a、b、d、e, 可见在降雨观测中, 将雨量计器口高度降低到 0.3 m, 比用特式和尼式防风圈更能提高雨量计捕捉降水的效率。

3. 降雨和降雪的对比

降雨观测中, 特式防风圈雨量计和尼式防风圈雨量计以及无防风圈普通雨量计的 $R-\overline{W}$ 关系曲线相互接近 (图 3-c); 降雪观测中上述三条曲线分离, 特式和尼式防风圈雨量计的曲线平缓, 且远远高于普通雨量计的 $R-\overline{W}$ 关系线 (图 3-a)。这表明降雪观测中防风圈的效用比降雨观测中显著。另外, 降雪观测中, 随着降水时段平均风速的增加, 带防风圈雨量计的 $R-\overline{W}$ 关系曲线趋于平坦。由此可知, 在大风条件下, 带防风圈的雨量计能稳定地捕捉降水, 即风越大, 防风圈的防风作用越明显。

不带防风圈雨量计降雨时的 $R-\overline{W}$ 关系曲线在降雪时之上 (图 3-b、3-d)。另外, 降雨时的曲线平缓, 降雪时则较陡。表明降雪条件下, 雨量计器口高度对捕捉率的影响比降雨时大。

4. 雨夹雪的情况

表 3 大西沟气象站雨夹雪条件下, 降水时段平均风速与捕捉率的对应 (最大平均风速时的个例)

Table 3 Catch ratio (%) of the gauges versus the maximum average wind speed (m/s) during the storm of rain mixed with snow

雨量计编号	G	No.1	No.2	No.5	No.6	No.7	平均风速
器口高度(m)	0.0	0.3	0.7	2.0	2.0	2.0	(m/s)
观测降水量(mm)	7.2	6.7	6.5	6.2	6.6	6.7	2.82
捕捉率(%)	100.0	93.1	90.3	86.1	91.7	93.1	

雨夹雪仅有 4 次测风记录, 定线点据太少, 所以没有作 $R-\overline{W}$ 关系图。但从对应降水时段最大平均风速的一次观测可初步看出 (表 3): 第一, 捕捉率随雨量计器口的升高而下降; 第二, 两种防风圈的防风作用相当; 第三, 器口高度为 0.3 m 的雨量计的捕捉率与特式和尼式防风圈雨量计相似。这些结论与降雨和降雪时的结果不矛盾, 同时进一步说明和支持了以前的结果。

四、夏季降观测中动力损失的修正

由于风对雨量计捕捉降水的干扰, 进入雨量计的降水量 (捕捉降水量) 小于实际降水量。因此, 实际降水量 (P_t) 是雨量计捕捉降水量 (P_c) 和动力损失 (修正) 量 (ΔP_a) 之和, 即

$$P_t = P_c + \Delta P_a \quad (1)$$

雨量计观测降水中有湿润损失和蒸发损失, 其捕捉降水量是观测降水量 (p_m) 与湿润损失量 (ΔP_u) 和蒸发损失量 (ΔP_e) 之和, 即

$$P_c = P_m + \Delta P_w + \Delta P_e \quad (2)$$

将式(2)代入式(1), 得到

$$P_t = P_m + \Delta P_a + \Delta P_w + \Delta P_e \quad (3)$$

$$\Delta P_a = P_t - (P_m + \Delta P_w + \Delta P_e) \quad (4)$$

式 (4) 表明, 雨量计观测降水中的动力损失 (修正) 量, 是实际降水量与雨量计捕捉降水量之间的差值。

由雨量计对比观测得知, 地面雨量计受风的影响小, 在无雨水溅入和风吹雪干扰时, 它捕捉的降水量接近实际降水量。因此, 我们就以地面雨量计捕捉降水量 (P_{gc}) 为降水真值, 修正标准雨量计观测降水中的动力损失。另外, 降水对比观测中使用同一种雨量计, 有理由认为, 在同一观测环境下, 它们具有同样数量的湿润损失和蒸发损失, 即地面雨量计和标准雨量计的湿润损失及蒸发损失量相同, 这样

$$\begin{aligned} \Delta P_a &= P_{gc} - (P_{sm} + \Delta P_{sw} + \Delta P_{se}) \\ &= (P_{gm} + \Delta P_{gw} + \Delta P_{ge}) - (P_{cm} + \Delta P_{cw} + \Delta P_{ce}) \\ &= P_{gm} - P_{sm} \\ &= \alpha P_{sm} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\alpha = (P_{gn} - P_{sm}) / P_{sm} \quad (6)$$

其中, P_{gm} 和 P_{sm} 分别为地面雨量计和标准雨量计的观测降水量 (mm); ΔP_{gw} 和 ΔP_{sw} 分别为地面雨量计和标准雨量计的湿润损失量 (mm); ΔP_{ge} 和 ΔP_{se} 分别为以上两种雨量计的蒸发损失量 (mm); α 为动力损失修正系数。

在大西沟气象站降水对比观测场, 以地面雨量计观测值为标准, 依不同降水形态分别计算动力损失修正系数, 发现降雪观测中动力损失修正系数 (修正率) 最大, 为 15.8%; 雨夹雪时次之, 为 14.3%; 降雨时最小, 仅为 6.7%。1986 年 5 月 1 日至 8 月 31 日, 大西沟气象站标准雨量计观测降水中动力损失的修正量为 41.1 mm, 它相当于

同期观测降水量 (296.1 mm) 的 13.9% (表 4)。

表 4 大西沟气象站标准雨量计 5—8 月降水观测中动力损失的修正

Table 4 Correction of error caused by wind effect in precipitation measurement
at the head of Urumqi River during May—August, 1986

降水形态	观测降水量(mm)	修正值(%)	修正量(mm)
雨	57.1	6.7	3.8
雨夹雪	30.8	14.3	4.4
雪	208.2	15.8	32.9
合计	296.1		41.1

五、测雪板观测结果的分析

大西沟气象站降水对比观测场所用测雪板为标准 1 号图板 (90 cm × 60 cm), 水平放置地面, 降雪之前板上无积雪, 降雪停止后, 在板上多点量测雪深, 取得平均值, 同时用雪秤确定新雪密度。平均雪深与密度的乘积就是雪水当量——单位为 mm 的降水量。测雪板观测完之后要扫去板上余雪, 以便下次观测。

大西沟气象站的测雪板共有 8 次观测, 其中 5 月和 6 月各占 4 次。7 月和 8 月因气温升高, 雪降至地面迅速融化而无法使用。测雪板和雨量计的 8 次对比观测表明 (表 5), 5 月测雪板观测值比标准雨量计高 8.3%, 其相对捕捉率与特式防风圈雨量计接近。6 月测雪板观测值比标准雨量计少 2%。原因是 6 月气温高, 有时降水开始为雨, 以后才转雪。另外, 6 月测雪时气温高, 测雪日平均气温为 0.0℃, 板上积雪融化, 影响雪深和密度的观测精度。

除降水对比观测场的测雪板外, 6 月份我们在 1 号冰川冰舌末端 (3740 m) 和 1 号冰川东支中部的 3910 m 也放有测雪板。观测结果表明, 夏季新雪密度的变化幅度相当大 (表 6)。三个高度对比, 营地 (降水对比观测场) 的新雪密度的最大值、最小值和平均值都最小, 冰川中部居中, 冰舌末端最大。这是因为营地测雪板观测及时; 冰川上气温低, 雪的变形较弱; 而冰舌末端气温高, 观测较迟 (测雪路线是营地—冰川中部—冰舌末端), 板上积雪消融, 密度相应增大。

表 7 是三个高度测雪板 6 月份的测雪结果。由表可见, 降大雪时, 降水量多随高度

表 5 大西沟气象站对比观测场测雪板和雨量计观测降水对比

Table 5 Comparison of snowfall precipitation caught by precipitation
gauges and snow board

	雨量计编号	No.1	No.2	No.5	No.6	No.7	测雪板	测雪日 平均气温
五 月	合计值(mm)	16.5	15.8	13.9	17.3	16.0	17.1	-2.5℃
	相对值(%)	104.4	100.0	88.0	109.5	101.3	108.2	
六 月	合计值(mm)	56.4	53.2	50.1	56.6	55.7	52.0	0.0℃
	相对值(%)	106.0	100.0	94.2	106.4	104.7	97.7	

表 6 测雪板上新密度(g/cm^3)的极值和均值Table 6 Maximum, minimal and mean density (g/cm^3) of snow measured on snow boards

观测点	营地	1 号冰川冰舌末端	1 号冰川东支中部
高程(m)	3540	3740	3910
最大值	0.121	0.260	0.220
最小值	0.085	0.123	0.125
平均值	0.101	0.192	0.156

表 7 6 月份三块测雪板的降水量(mm)观测结果

Table 7 Snowfall precipitation (mm) measured on three snow boards placed on different altitudes at the head of the Urumqi River

日期	Pm	营地(3540 m)	冰舌末端(3740 m)	1 号冰川中部 (3910m)
6.5	17.2	*	16.3	19.4
6.6	20.2	17.2	34.2	31.9
6.9	11.9	9.8	15.1	19.6
6.10	15.1	17.6	25.7	23.6
6.28	6.1	7.5	*	7.8
6.29	11.9	*	13.7	16.9

注: 1) Pm 为营地标准雨量计观测降水量(mm); 2) * 表示缺测。

而增加。但增加的幅度(降水梯度)在各高度带并不相同。从 3540 m 到冰舌末端(3740 m), 降水量每 100 m 增加 2.7—8.5 mm, 从冰舌末端到冰川中部的 3910 m, 降水梯度减小, 最大值仅为 2.6 mm/100 m, 有时甚至出现倒梯度, 原因可能是冰川上的测雪板放在平坦开阔的地方, 大风会吹去板上部分积雪。

六、普通雨量计湿润损失观测及修正

普通雨量计的湿润损失分为承水器和储水瓶(筒)的湿润损失两部分。1986 年夏, 乌鲁木齐河源普通雨量计湿润损失的观测用 WMO 推荐的称重法(WMO, 1985b)。承水器湿润损失的实际观测共有 6 次(其中 4 次为降雨, 2 次为雨夹雪), 平均湿润损失量为 0.17 mm, 最小值为 0.10 mm, 对应于最小观测降水量 0.1 mm; 最大值为 0.30 mm, 对应于最大观测降水量 10.8 mm(雨夹雪)。实际观察发现, 这次降水后, 雨量计承水器内壁充分湿润, 所以与之对应的湿润损失量 0.30 mm, 可以认为是承水器湿润损失的最大值。Günther (1985) 指出, 当降水量为 3—4 mm 时, 口径为 16 cm 的德国海尔曼(Hellmann)雨量计承水器内壁充分湿润, 对应最大湿润损失量 0.18 mm, 远远小于普通雨量计的相应值。原因是海尔曼雨量计内壁电镀, 而普通雨量计内外壁镀锌, 前者内壁光滑, 对降水的吸附作用较弱。另据实际观测, 普通雨量计承水器的平均湿润损失量雨夹雪时为 0.25 mm, 降雨时为 0.13 mm, 前者几乎为后者的两倍。这可能是因为雨夹雪的量(4 次平均值为 5.9 mm, 而 2 次降雨平均仅为 1.8 mm),

导致较大的湿润损失。

储水筒湿润损失的实际观测共有 13 次 (其中 6 次为降雨, 4 次为雨夹雪, 3 次为雪), 最大湿润损失量为 0.30 mm (对应最大观测降水量 10.8 mm), 最小为 0.05 mm。平均湿润损失量为 0.15 mm, 略小于承水器的平均湿润损失量。实际观测发现, 降雨时储水筒的平均湿润损失量最大, 为 0.18 mm; 雨夹雪时次之, 为 0.13 mm; 降雪时最小, 仅为 0.12 mm。

普通雨量计湿润损失的修正, 可以用下式计算

$$\Delta P_w = (c_1 + c_2) \times n \quad (7)$$

式中, ΔP_w 为某时段降水观测中湿润损失的修正量 (mm), c_1 和 c_2 分别为普通雨量计承水器和储水瓶 (筒) 在一次降水观测中的湿润损失量 (mm), n 为该时段内雨量计的湿润次数。

统计某时段内雨量计的湿润次数, 首先要确定观测环境下雨量计的干燥时间, 即雨量计承水器和储水筒 (瓶) 由湿变干所需的时间。实际观测表明, 普通雨量计承水器 (不带漏斗) 的干燥时间不超过 1 小时, 储水筒的干燥时间不超过 2 小时。因此可以认为, 夏季在乌鲁木齐河源普通雨量计的干燥时间为 2 小时。

1986 年 5 月 1 日至 8 月 31 日, 大西沟气象站降水对比观测场共有 78 次独立降水对比观测。所谓独立降水对比观测是指一次降水停止后观测一次, 两次降水之间的时间间隔大于雨量计的干燥时间。因此, 这 78 次降水观测中, 雨量计有 78 次“完全”湿润。另外, 这 78 次降水中有雨、雨夹雪和雪三种降水形态, 它们造成的湿润损失不同, 照理应当区别对待, 取不同的 c_1 和 c_2 值。但实际观测中承水器没有取得降雪条件下的观测资料。所以这里只好不区分降水形态, 取 c_1 为 0.17 mm (承水器湿润损失量在降雨和雨夹雪时的平均值), c_2 为 0.15 mm (储水筒湿润损失量在降雨、雨夹雪和降雪时的平均值), 修正这 78 次 ($n=78$) 降水观测中的湿润损失, 得到总修正量 25.0 mm, 它相当于同期观测降水量 (296.1 mm) 的 8.4%。

七、普通雨量计蒸发损失实验及蒸发损失量的修正

普通雨量计蒸发损失实验用称重法, 具体方法是, 20 时在雨量计储水瓶 (筒) 中加入一定量的水 (2.0—25.0 mm), 用蒸发专用案秤称重, 记录其总重量 (单位 mm), 次日早 8 时和晚 20 时分别称量一次。加水储水瓶 (筒) 原始重量与 8 时重量差 (用 mm 表示) 为雨量计夜间 12 小时蒸发损失量, 8 时与 20 时重量差为雨量计白天 12 小时蒸发损失量。如某日实验中出现降水, 则在降水开始之前称量雨量计储水瓶 (筒), 经过计算, 得到某一时段雨量计的蒸发损失量。雨量计的蒸发损失实验要选择在阴天或有降水的日子里进行, 这样获得的实验资料才能反映降水停止后雨量计中水分蒸发的实际情况。

1986 年夏季, 乌鲁木齐河源普通雨量计的蒸发损失实验分两个阶段 (A、B 组), 第一阶段 (7 月 28 日至 8 月 22 日) 普通雨量计不带漏斗和储水瓶 (A 组实验), 第二阶段 (8 月 23 日至 8 月 31 日) 普通雨量计加漏斗和储水瓶。这样, 一方面可以用 A 组

的实验资料确定雨量计不带漏斗和储水瓶时的蒸发损失率 (单位时间内的蒸发损失量), 修正乌鲁木齐河源夏季降水观测中的蒸发损失。另一方面, 对比两组实验结果, 可以认识漏斗和储水瓶在防止雨量计蒸发损失中的作用。

分析蒸发损失实验资料发现 (表 8), 白天的蒸发损失率 (e_d) 比夜晚的相应值 (e_n) 大一个数量级。A 组实验中, 蒸发损失率白天和夜晚的比值 ($e_d: e_n$) 为 6.9, B 组实验为 9.5。这说明雨量计的蒸发损失主要发生在白天。所以, 白天降水停止后应及时进行观测。对比 A、B 两组实验结果 (表 8), 发现 A 组实验得到的蒸发损失率比 B 组的相应值大一个数量级。白天两组蒸发损失率之比为 6.9, 夜晚为 9.5, 表明雨量计加漏斗和储水瓶之后, 白天降低蒸发损失近 7 倍, 夜晚 9.5 倍。因此, 为了减少降水观测中的蒸发损失量, 除冬天有大量降雪外, 其它季节普通雨量计均应加漏斗和储水瓶。

修正普通雨量计的蒸发损失, 可用下式,

$$\Delta P_e = e_d h_d + e_n h_n \quad (8)$$

式中, ΔP_e 为某月降水观测中蒸发损失的修正量 (mm), e_d 和 e_n 分别为雨量计白天和夜晚的蒸发损失率 (mm/h), h_d 和 h_n 分别为某月降水观测中白天和夜晚的总蒸发时间 (h)。

随着季节的更替, 降水量和热量条件的改变, 雨量计的蒸发损失率会发生变化。1986 年夏, 乌鲁木齐河源普通雨量计蒸发损失实验, 在 7 月和 8 月中选择阴天或降水天气时进行, 实验确定的雨量计蒸发损失率, 基本上反映了蒸发时间内, 雨量计储水瓶 (筒) 中水分蒸发的实际情况, 夏季 6—8 月具有代表性。因此, 这里以 A 组实验为依据, 取雨量计白天的蒸发损失率 (e_d) 为 0.131 mm/h, 夜晚的蒸发损失率 (e_n) 为 0.019 mm/h。

表 8 普通雨量计蒸发损失实验结果

Table 8 Total value and rate of liquid precipitation evaporation from the standard precipitation gauge of China

组 别	A 组实验			B 组实验		
时 间	白天	夜晚	合计	白天	夜晚	合计
总蒸发时间(h)	98.8	51.2	150.0	62.7	52.5	115.2
总蒸发量(mm)	12.92	0.95	13.87	1.20	0.10	1.30
平均蒸发率(mm/h)	0.131	0.019		0.019	0.002	

关于蒸发时间, 目前国外对它的定义有不同的认识。一种认为它应当从降水开始算到观测时刻 (Mendel, 1985); 另一种认为, 蒸发时间不包括降水时段, 它是降水终止到观测时刻的时间间隔和一次降水中的停顿时间之和 (Sevruk, 1985b)。本文接受第二种概念, 因为降水发生时, 空气中水分饱和或接近饱和, 雨量计的蒸发损失可能很小。按照上述概念, 分别统计乌鲁木齐河源降水对比观测场 6—8 月降水观测中, 白天 (8 时至 20 时) 和夜晚 (20 时至 8 时) 的蒸发时间, 代入式 (8) 计算, 发现降水观测中标准雨量计蒸发损失的月修正量分别为 4.9、2.7 和 3.3 mm, 相当于月观测降水量的 3.9%、3.5% 和 6.3%。三个月蒸损失总修正量为 10.9 mm, 相当于同期观测降水量 (255.4 mm) 的 4.3%。

八、乌鲁木齐河源年降水量的估算

综合前面的修正结果, 乌鲁木齐河源大西沟气象站 5—8 月降水观测中, 动力损失量最大, 湿润损失量次之, 蒸发损失量最小, 它们三项之和相当于同期观测降水量的 26.0%, 1986 年折合降水 77.1 mm (表 9)。

表 9 1986 年乌鲁木齐河源 5—8 月降水观测中动力损失
湿润损失和蒸发损失的修正

Table 9 Correction of errors caused by wind effect, wetting and evaporation losses in precipitation measurement at the head of Urumqi River from May—August, 1986

项 目	ΔP_a	ΔP_w	ΔP_e	ΔP	P_m	P_t
修正量(mm)	41.2	25.0	10.9	77.1	296.1	373.2
修正率(%)	13.9	8.4	3.7	26.0		

注: ΔP_a 、 ΔP_w 和 ΔP_e 分别为动力、湿润和蒸发损失修正项, $\Delta P = \Delta P_a + \Delta P_w + \Delta P_e$, P_m 和 P_t 分别为观测降水量和修正后的降水量(mm)。

据大西沟气象站的观测, 乌鲁木齐河源夏季降水多以固态形式出现, 5—8 月降水量占年降水量的 78.1%。其他季节只有少量固态降水, 气温较低, 这时雨量计的湿润损失和蒸发损失可能很小, 因此修正降水观测误差时, 可只考虑动力损失量。

降水对比观测表明 (表 1、表 4), 降雪时大西沟气象站标准雨量计的动力损失量为观测降水量的 15.8%。1986 年 1—4 月和 9—12 月, 大西沟气象站观测降水量合计为 96.1 mm, 修正动力损失 15.8%, 相当于增加降水量 15.2 mm, 这样, 修正后的降水量为 111.3 mm。将这部分降水量和已修正的 5—8 月降水量相加, 得到 1986 年的降水总量 484.5 mm, 它比相应的观测值 (392.8 mm) 多 23.3%, 折合降水 91.7 mm。

大西沟气象站 5—8 月观测降水量的多年 (1959—1985) 平均为 330.7 mm, 在这个基础上增加 26.0% 的修正量, 得到修正后的降水量 416.7 mm。另外, 该站 1—4 月和 9—12 月观测降水量合计的多年 (1959—1985) 平均为 92.8 mm, 同样忽略这几个月雨量计观测降水时的湿润损失和蒸发损失, 对观测降水量作 15.8% 的动力损失修正, 得到修正后的降水量 107.5 mm。将已修正的 5—8 月降水量与这部分降水量相加, 得到大西沟气象站多年平均降水量的相对真值 524.2 mm, 它比相应的观测值 (423.5 mm) 多 23.6%, 相当于增加降水量 100.7 mm。

1986 年夏, 乌鲁木齐河源布设有 5 只总雨量计。它们的位置分别在大西沟气象站附近的 3540 m, 1 号冰川冰舌末端的 3740 m, 1 号冰川东支冰舌 3860 m, 1 号冰川东支粒雪盆 4010 m 和空冰斗中部 3870 m。总雨量计附近有按常规观测的普通雨量计, 两者的对比观测表明 (表 10), 总雨量计观测的月降水量比普通雨量计多 0.2—80% 左右, 在冰川上总雨量计的观测值明显高于普通雨量计。原因是总雨量计带有防风圈, 受风的影响小, 捕捉降水能力强。另外, 总雨量计储水筒中放有防冻液, 上覆一层防蒸发油, 几乎没有蒸发损失。而冰川上的普通雨量计不带防风圈, 储水筒内放细口铁皮小筒, 一个月观测一次, 蒸发损失量相当大。1986 年 6 月在冰舌上实际观测到蒸发损失

表 10 乌鲁木齐河源总雨量计和普通雨量计观测降水量(mm)对比

Table 10 Comparison of monthly precipitation (mm) caught by storage gauges and the standard precipitation gauges placed in the head of Urumqi River

站点	大西沟 气象站		1 号冰川 冰舌末端		1 号冰川 东支冰舌		空冰斗		1 号冰川 东支粒雪盆	
海拔(m)	3540		3740		3840		3870		4010	
降水量	Ps	Pm	Ps	Pm	Ps	Pm	Ps	Pm	Ps	Pm
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
5 月	50	45.9	70	51.8	80	18.9 *	70	46.0		42.4
6 月	130	124.2	150	133.4	130	71.4	160	127.0		59.0
7 月	80	74.2	80	82.5	80	57.7	80	72.5		69.9
8 月	80	52.4	80	49.0	60	59.1	80	47.2	50	52.5
合计	340	296.7	380	316.7	350	207.1	390	292.7		223.8

注: 1) Ps 和 Pm 分别为总雨量计和普通雨量计观测的月降水量;

2) * 本月普通雨量计有几天被风吹倒。

32.3 mm, 它相当于同期观测降水量 (71.4 mm) 的 45.2%。

对比不同高度观测点同期降水观测值 (表 10), 发现 1 号冰川冰舌上总雨量计和普通雨量计的观测值均小于冰舌末端, 粒雪盆总雨量计 8 月份的观测值, 也低于冰舌和冰舌末端的相应值, 从而使降水出现倒梯度。其实这种现象是虚假的, 因为冰川上的风速比冰舌末端大, 降水观测中相应的动力损失很有可能大于冰舌末端。即, 冰川上雨量计包括总雨量计受风的影响比冰舌末端大, 相应的观测精度低于冰舌末端。因此, 用受风影响较小的大西沟气象站和冰舌末端总雨量计的观测值, 计算夏季 (5—8 月) 本区降水梯度, 结果是 22 mm / 100m。这个数值与 25 mm / 100m (谢自楚等, 1965) 的年降水梯度十分接近。以此为依据, 从大西沟气象站向上推算 1 号冰川区的年降水量, 得到冰舌末端 (3740 m) 1986 年的降水总量为 538.1 mm, 多年平均年降水量 577.6 mm; 粒雪线处 (4050 m) 1986 年降水总量 606.3 mm, 多年平均年降水量 645.8 mm。

九、结 论

(1) 在观测降雨、雨夹雪和降雪时, 使用尼费尔和特立奇耶克夫防风圈均能提高雨量计的捕捉降水率。防风圈的效用在 大风时较明显, 降雪观测中较明显。降雪观测中, 特立奇耶克夫防风圈的防风效果比尼费尔防风圈好。雨量计的捕捉降水率随器口高度的上升而下降。

(2) 降水观测中, 风越大, 雨量计的捕捉率越低。降水时段平均风速相同时, 带防风圈雨量计的捕捉率较高, 器口接近地面雨量计的捕捉率较高。以地面雨量计的观测值为标准, 修正大西沟气象站普通雨量计 1986 年 5—8 月观测降水中的动力损失, 得总修正量 41.1 mm, 它相当于同期观测降水量 (296.1 mm) 的 13.9%。

(3) 乌鲁木齐河源夏季降水观测中, 不带漏斗和储水瓶的普通雨量计, 每次降水观

测中, 承水器的平均湿润损失量为 0.17 mm, 储水筒的平均湿润损失量为 0.15 mm。而蒸发损失, 白天每小时 0.131 mm, 夜晚每小时 0.019 mm。雨量计加漏斗和储水瓶后, 白天可降低蒸发损失近 7 倍, 夜晚 9.5 倍。

(4) 乌鲁木齐河源夏季降水观测中, 动力损失的修正率(修正量/观测降水量)为 13.9%, 湿润损失修正率为 8.4%, 蒸发损失修正率为 3.7%, 总修正率(三项之和)为 26.0%。大西沟气象站修正后的多年平均降水量为 524.2 mm。以 22 mm/100m 为年降水梯度, 推算出 1 号冰川粒雪线(4050 m)处的多年平均年降水总量为 645.8 mm。

致谢: 施雅风先生审阅全文并提出修改意见, 新疆水文总站径流实验站帮助加工防风圈, 乌鲁木齐市气象局和所属大西沟气象站提供风速资料, 天山冰川站的工作人员支持观测工作。作者在此深表谢意。

主要参考文献

- 中央气象局 (1979): 地面气象观测规范. 北京: 气象出版社, 60—62.
- 水利电力部水文局 (1958): 降水观测暂行规范. 北京: 水利电力出版社, 18—23.
- 张海仑 (1982): 近代水文和水资源研究方向. 水文, 水资源专辑, 93—96.
- 张家诚、林之光 (1985): 中国气候. 上海: 上海科学技术出版社, 173—176.
- 陈天珠 (1983): 雨量计安装高度对雨量观测值影响的试验研究. 水文, (6): 35—39.
- 林之光 (1983): 降水观测误差及其对研究山区降水分布的影响. 气象, (12): 26—28.
- 谢自楚、葛光文 (1965): 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的积累消融及物质平衡. 见: 天山乌鲁木齐河冰川与水文研究, 北京: 科学出版社, 14—24.
- Allis, J.A. and Harris, B. (1963): A comparison of performance of five rain-gage installations, *Journal of Geophysical Research*, 68 (16): 4723—4729.
- Bergman, J.A. (1982): Two standard precipitation gages and the gamma transmission snow gage: a statistical comparison, United States Department of Agriculture, Forest Service, Research note PSW—358.
- Goodison, B.E. (1975): Snow study at Cold Creek: testing and evaluation of gauges in Canada for snowfall measurement, *Canada Hydrological Symposium—75 Proceedings*, 27—35.
- Goodison, B.E. (1978): Accuracy of Canada snow gage measurements, *Journal of Applied Meteorology*, 17: 1542—1548.
- Goodison, B.E. and Metcalfe, J. R. (1982): Canada snow-gage experiment recent results, Presented at the West Snow Conference, April 20—23, 1982, 192—195.
- Green, M.J. (1972): Effects of exposure on the catch of raingages, Symposium on the results of research on representative and experimental basins, II: 399—412, IASH-UNESCO.
- Gunther, Th. (1985): Some results of investigations on the correction of precipitation measurements in the German Democratic Republic, *Instruments & Observing Methods Reports*, 25: 147—154, WMO.
- Hanson, C.L. (1979): A note on the dual-gage and Wyoming shield precipitation measurement systems, *Water Resources Research*, 15 (4): 956—960.
- Harris, R.E. and Carder, A. C. (1974): Rain and snow gage comparison, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 11: 557—564.
- Haupt, H. F. (1972): Improved instrumentation for measuring melted precipitation on wind-swept topography, Distribution of precipitation in mountainous areas, II: 73—85, WMO.
- Helmert, A. E. (1954): Precipitation measurements on wind-swept slopes, *Transaction of American Geophysical Union*, 35 (4): 471—474.
- Huff, F.A. (1955): Comparison between standard and small orifice raingages, *Transaction of American Geophysical Union*, 36 (4): 689—694.
- Mendel, O. (1985): Correction of measured precipitation data and their application in central and east Europe, *Instruments & Observing Methods Reports*, 25: 167—174, WMO.
- Rawls, W. and Robertson, D. C. (1975): Comparison of precipitation gage catches with a modified Alter and a rigid

- Alter type wind-shield, *Water Resources Research*, 11 (3): 415—517.
- Sevruk, B. (1972): Precipitation measurements by means of storage gauge with stereo and horizontal orifices in the Baye De Montex watershed, *Distribution of precipitation in mountainous areas*, 11: 86—95, WMO.
- Sevruk, B. (1985a): Correction of precipitation measurements: Summary report, *Instruments & Observing Methods Reports*, 25: 13—23, WMO.
- Sevruk, B. (1985b): Correction of precipitation measurements: Swiss experience, *Instruments & Observing Methods Reports*, 25: 187—196, WMO.
- Sturges, D. L. (1984): Comparison of precipitation as measured in gages protected by a modified Alter shield, Wyoming shield, and stand of trees, Presented at the Western Snow Conference, April, 17—20, 1984.
- WMO (1985a): Correction of precipitation measurement, *Instruments and Observing Methods Reports*, 25.
- WMO (1985b): International organizing committee for WMO solid precipitation measurement intercomparison, First Session, Norrköping, 16—20 December 1985, Final Report.

Analysis and Correction of Errors in Precipitation Measurement at the Head of Urumqi River, Tianshan

Yang Daqing, Jiang Tong, Zhang Yinsheng and Kang Ersi
(Lanzhou Institute of Glaciology & Geocryology, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

The concepts of wind effect, wetting and evaporation losses in precipitation measurement are introduced and the factors affecting the losses are analysed. Based on the comparative measurements of precipitation with different gauges and wind shields and also on the observation of wetting and evaporation losses at the head of the Urumqi River in the summer of 1986, the catch deficiency (13.9% for wind effect, 8.4% for wetting and 3.7% for evaporation respectively) for a standard gauge of China is determined. With the correction of the errors mentioned above, the accurate value of average annual precipitation, 524.2 mm and 645.8 mm, is obtained respectively at the altitudes of 3540 m a.s.l and 4050 m a.s.l at the head of the Urumqi River.

Key words: mountain precipitation, precipitation measurement, precipitation gauge, error, correction

图 版 说 明

照片 1 尼费尔防风圈

照片 2 特立奇耶克夫防风圈

Plate Captions

Photo 1 Nipher shield

Photo 2 Tretyakov shield

杨大庆等：天山乌鲁木齐河源降水观测误差分析及其改正

Yang Daqing et al.: Analysis and Correction of Errors in Precipitation
Measurement at the Head of Urumqi River, Tianshan

图版 I

Plate I

