天山乌鲁木齐河源夏季降水观测中的动力损失及其修正*

杨大庆　康尔泗　张寅生
（中国科学院兰州冰川冻土研究所）
姜　彤
（中国科学院南京地理研究所）

提　要

本文论述雨量计观测降水中动力损失的概念及其影响因素。通过不同雨量计观测降水对比实验资料的分析，评价了不同降水形态下各种防风圈的防风作用；揭示雨量计捕捉降水率与降水时段平均风速的关系，建立修正方案，确定真实降水量，修正乌鲁木齐河源夏季降水观测中的动力损失量。

一、概述

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，观测值与实际降水量常有一定偏差。目前发现这种偏差较普遍是负的，即雨量计观测值比实际降水量系统偏小，尤其降雪观测值偏小严重。在山区和高纬度地区，由于雨量计观测值明显偏小，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，主要是风对降水的干扰（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（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（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，它的最大值一般不超过实际降水量的10%；蒸发损失最小，其最大值为实际降水量的4%。为了修正降水观测中的上述偏差，国外先后开展不同雨量计观测降水对比实验研究，取得了许多积极的成果。目前 WMO 正在实施一项固态降水对比观测计划。

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，也开展了一些研究工作[1—5]。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，目的是确定观测环境下，雨量计观测降水中的动力损失量，修正以往的降水观测资料。

二、观测场的布设

雨量计观测降水对比实验（简称降水对比观测）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，为修正降水观测资料中的动力

*本文承蒙陆风先生审阅，提出修改意见，谨致谢意。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

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°06′N，87°15′E；3588m）南面30m处，这里地势开阔，无障碍物。降水对比观测场放有7台口径为20cm的雨量计，它们可以分为两组。第一组雨量计器口距地面高度为2m，包括3台普通雨量计，其中2台雨量计分别配有尼费尔和苏联特立奇耶克夫防风圈（分别简称为尼式和特式防风圈），另一台雨量计不带防风圈。尼式防风圈是加拿大的标准防风圈，B. E. Goodison等人指出这种防风圈的防风效果较好。特式防风圈曾于50年代在国内用来观测固态降水，以后被取消。降水对比观测场的另一组雨量计包括4台普通雨量计和1台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0.0m，Belford自记雨量计的器口高度为1.0m，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。除雨量计外，对比观测场还在地面放置90×60cm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。

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，共观测降水78次。

三、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，原因是当空气运动时，雨量计周围的流场发生变化，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，不进入雨量计。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0.7m）的观测值为标准，假定它为100%。

表1　降水对比观测资料的分类统计

防风圈	无	无	无	无	Tretyakov	Nipher	降水形态
器口高度(m)	0.0	0.3	0.7	2.0	2.0	2.0	
雨量计编号	G	1	2	5	6	7	
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	182.8	
相对值(%)	112.7	102.6	100.0	94.3	103.5	101.4	

1．防风圈的效用

从器口高度2m的3台雨量计的对比，可发现在三种降水形态下，带有特式防风圈和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。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有差异。

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对降雪最明显，它比尼式防风圈在降雨和降雪时的相对捉捕率分别高0.4%和6.4%。因此认为，在观测环境下，特式防风圈的防风效果比尼式防风圈好。

2．雨量计器口高度与相对捕捉率的

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

关系

对比器口位于不同高度4台普通雨量计观测降水量的合计值和相对值可见，随着雨量计器口高度的升高，其相对捕捉率下降。器口与地面平齐的地面雨量计比器口位于0.7m的标准雨量计多捕捉降水13%，器口高度为0.3m的雨量计比标准雨量计多捕捉降水8%，而器口位于2.0m的雨量计比标准雨量计少捕捉降水5%左右。

在器口位于不同高度的雨量计中，地面雨量计受风的影响最小，捕捉降水能力强。但是，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0.3m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0.7m的标准雨量计。

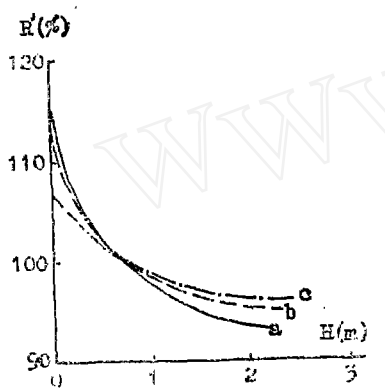

图1 H-R′相关曲线

a为降雪，b为雨夹雪，c为降雨

图1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。图中降雪时关系曲线较陡，降雨时则较平缓，表明降雪观测中雨量计受风的影响比降雨观测严重，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。

四、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（湿雪）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10.8m。从降水对比观测资料中选择降水量大于2.0mm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（$\bar{v}$）建立关系，得到以下结论。

1. 降雪条件下的R-$\bar{v}$关系

在器口高度为2.0m的3台雨量计中（图2a），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-$\bar{v}$关系曲线，远低于上面两种带防风圈者，尤其在大风条件下相差较大。

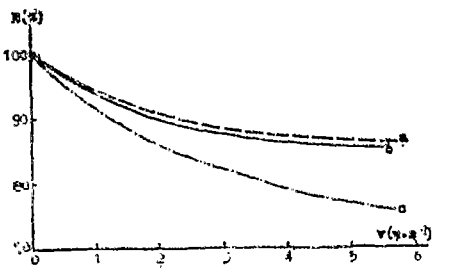

图2a R-$\bar{v}$相关曲线（固态降水，同高度）

a为特式防风圈雨量计，b为尼式防风圈雨量计，c为器口位于2m的普通雨量计

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

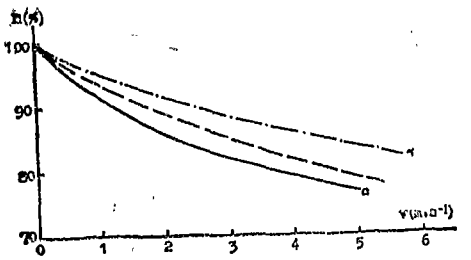

图2b R-$\bar{v}$相关曲线(固态降水,不同高度)

c为器口高度为2m的普通雨量计，d为器口高度为0.7m的标准雨量计，e为器口高度为0.3m的普通雨量计

器口位于0.3m、0.7m和2.0m的3台雨量计对比（图2b），可见随着雨量计器口高度的上升，R-$\bar{v}$关系曲线变陡。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。

对比图2a和2b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0.3m，能更有效地提高捕捉率，在大风条件下更是如此。

2. 降雨条件下的R-$\bar{v}$关系

和降雪时不同，器口位于2.0m的3台雨量计，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，特式防风圈雨量其次之，普通雨量计最低（图3a）。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。

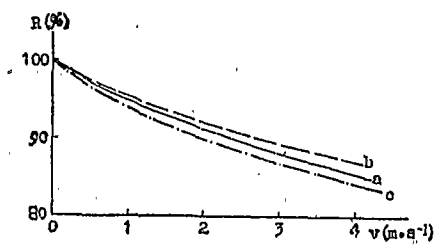

图3a R-$\bar{v}$相关曲线（液态降水，同高度）

a为特式防风圈雨量计，b为尼式防风圈雨量计，c为器口高度为2m的普通雨量计

和降雪观测中相同，器口位于不同高度3台雨量计的R-$\bar{v}$关系曲线，仍然是0.3m雨量计的最高，0.7m标准雨量计的居中，2.0m雨量计的最低（图3b）。另外，对比图3a和3b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0.3m，比用特式和尼式防风圈更能提高雨量计捕捉降水的效率。

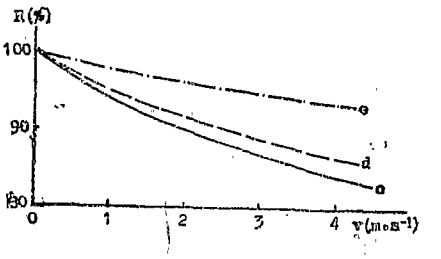

图3b R-$\bar{v}$关系曲线(液态降水,不同高度)

c为器口高度为2m的普通雨量计，d为器口高度为0.7m的标准雨量计，e为器口高度为0.3m的普通雨量计

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-$\bar{v}$关系曲线相互接近；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-$\bar{v}$关系曲线。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-$\bar{v}$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雪。即风速越大，防风圈的防风作用越明显。

不带防风圈雨量计降雨时的R-$\bar{v}$关系曲线在降雪曲线之上。另外，降雨时的曲线较平缓，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为大。

4. 雨夹雪的情况

雨夹雪仅有4次测风记录，没有做R-$\bar{v}$关系图。从对应降水时段最大平均风速的一

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表2 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）

雨量计编号	G	1	2	5	6	7	平均风速 (m/s)
器口高度 (m)	0.0	0.3	0.7	2.0	2.0	2.0	
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	

次观测可初步看出（表2）：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0.3m的雨量计的捕捉率与特式和尼式防风圈雨量计的相似。

五、降水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）和动力损失量（ΔP_a）之和，即

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

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_w）和蒸发损失量（ΔP_e）之和，即

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

将（2）式代入（1），得到

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

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

（4）式表明，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，可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。于是

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

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41.1mm，它相当于同期观测降水量（296.1mm）的13.9%。

表3 乌鲁木齐河源降水对比观测场标准雨量计5—8月降水观测中动力损失修正

降水形态	观测降水量 (mm)	修正率(%)	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

六、结论

1．在乌鲁木齐河源夏季观测降雨、雨夹雪和降雪时，使用尼费尔（Nipher）和特立奇耶克夫（Tretyakov）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和降雪观测中较明显。降雪观测中，特式防风圈的防风效果比尼式防风圈好。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，风速越大，雨量计的捕捉率越低。降水时段平均风速相同时，

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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。

3．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，得出总修正量为41.1mm，相当于同期观测降水量（296.1 mm）的13.9%。

考参文献

〔1〕张海仑，近代水文和水资源主要研究方向，水文，水资源专辑，1982年。

〔2〕张家诚、林之光，中国气候173—176，上海科学技术出版社，1985年8月。

〔3〕陈天珠，雨量计安装高度对雨量观测值影响的试验研究35—39，水文，1983年第6期。

〔4〕林之光，降水观测误差及其对研究山区降水分布的影响，气象，1983年第12期。

〔5〕谢自楚、葛光文，天山乌鲁木齐河源1号冰川的积累消融及物质平衡，天山乌鲁木齐河冰川与水文研究，14—24，科学出版社，1965年。

Analysis and correction of wind effects on precipitation measurements at the head of Urumqi river during summer

Yang Daqing　Kang Ersi　Zhang Yingsheng

(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Academia Sinica)

Jiang Tong

(Nanjing Geography Institute, Academia Sinica)

Abstract

The concept of wind effects on precipitation measurements is introduced. Based on the comparative measurements obtained with different gauges, the efficiency of wind shields under different precipitation conditions and the relationships between the capture rate of a gauge and the average wind speed are determined. With the correction of the errors caused by wind effects in precipitation measurements, relatively accurate values of summer precipitation at the observation point (43°06′N, 87°15′E; 3588m, a.s.l.) in the source area of Urumqi river is obtained.

（上接45页）

时间较短，可能有一定的偶然性，特别是季节变化方面的分析是很不完整的，有待于今后进一步分析验证。

参考文献

〔1〕D.E.Parker, Climatic change or analyst's artifice? —A study of grid-point upper-air data, The Meteorological Magazine 1980, No.1294, Vol. 109.

〔2〕A. Hollingsworth, et al., The respone of numberical weather prediction systems to FGGE level Ⅱb data, Quant J.R.Met Soc. (1985), Vol. 111, No. 465.

〔3〕袁景凤、李小泉，不同来源月平均海温资料的比较分析，气象，1985，3期

〔4〕李小泉、刘宗秀，北半球及分区的500hPa极涡面积指数，1986年，气象增刊Ⅱ。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net