

国外降水观测误差分析及改正 方法研究概况^①

General Aspect of Correction of Errors in Precipitation Measurements Abroad

杨大庆

(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

提 要 本文综合近年来国外有关降水观测误差分析和改正方法研究的主要成果, 阐述雨量计观测降水中动力损失、湿润损失和蒸发损失的概念及其影响因素。介绍确定上述三项误差的手段和修正误差的各种方法, 并提出有待解决的若干问题。

降水量是反映气候的重要指标之一, 是水分循环和水量平衡的重要要素, 在水文模型和水资源评价中是必不可少的输入参数。

雨量器观测降水误差分析表明, 在山区和高纬度地区, 固态降水比例较高, 雨量器观测值明显低于实际降水量, 致使不少山区河流出现年径流量超过年降水量的不合理结果 (Goodison, 1978; WMO, 1985)。为了修正降水观测误差, 50年代以来美国、加拿大、英国、瑞士、苏联等先后开展不同雨量器观测降水对比实验研究, 取得许多积极的成果。近年来国内学者亦陆续注意到降水量观测值偏小问题 (张海仑, 1982; 林之光, 1983, 1985), 相应的研究工作也已起步。为此, 本文简要介绍国外降水观测误差分析及改正方面的研究方法和成果。供研究中参考。

1 雨量器观测降水误差分析

雨量器观测降水误差有偶然性误差和系统性误差两类。系统误差使降水观测值系统偏离实际降水量。因此对它进行分析和修正是必要的。综合国外研究, 雨量器观测降水中的系统误差主要有风干扰雨量器承受降水造成的动力损失 (ΔP_d), 雨量器承水器和储水瓶 (筒) 内壁吸附部分降水造成的湿润损失 (ΔP_w) 和降水停止到观测时刻以及降水间歇期内雨量器储水瓶 (筒) 中水分蒸发造成的蒸发损失 (ΔP_e)。其中动力损失最为严重, 液态降水时最大动力损失量为实际降水量的 10%, 固态降水时可达 50%, 甚至 100%; 湿润损失其次, 其最大值为实际降水量的 10%; 蒸发损失较小, 最大值

^① 本文于1987年5月28日收到修改稿。

一般不超过实际降水量的 4% (Sevruk, 1985a)。因此, 实际降水量 P_t 可以表达为:

$$\begin{aligned} P_t &= P_m + \Delta P_a + \Delta P_w + \Delta P_e \\ &= P_m + \Delta P \end{aligned} \quad (1)$$

其中, P_m 为观测降水量,

$$\Delta P = \Delta P_a + \Delta P_w + \Delta P_e \quad (2)$$

式 (1)、(2) 表明了实际降水量、观测降水量和观测误差之间的相互关系, 是修正观测降水量的基础。

2 雨量器观测降水的动力损失及其修正

2.1 雨量器器口的流场和流速分布

从空气动力学角度分析, 风影响雨量器承受降水, 原因是当空气运动时, 雨量器周围流场发生变化, 器口迎风部位有上升气流, 器口上部流线密集, 气流流速较大。风洞实验表明, 雨量器器口上方风速增加率 (与风洞风速之比) 为 15—20% (Robison, 1969; Green, 1972), 因此, 器口上部雨滴下落迹线几乎与地面平行, 从而使雨滴漂走, 不进入雨量器。这种现象被称为“雨滴漂溢” (林之光, 1983)。雪片的比重比雨滴小, 漂溢现象更为严重。

2.2 防风圈的设计原则及实用价值

目前国外普遍使用的防风圈有 Alter、Wyoming (美国)、Nipher (加拿大)、Tretyakov (苏联) 防风圈及其改进形式。各种防风圈的形状、体积和防风效果差异较大, 理想的防风圈应当保证雨量器器口通过水平气流; 避免雨量器器口气流产生任何加速度; 尽量减弱雨量器承水器外壁承受的风压; 防止降雨溅入承水器, 使雨量器器口高度不影响其捕捉率, 并保证雨量器器口不被降雪封闭 (WMO, 1970)。

有无防风圈雨量器观测值的对比揭示了防风圈的防风作用。1946—1961 年 Allis (1963) 在内布拉斯加州 Hastings 地区对美国国家天气局标准雨量器的 5 种安装方式进行对比观测, 结果表明, 带防风圈雨量器的观测值高于不带防风圈者。降雨时带 Nipher 和 Alter 防风圈雨量器的观测值分别比标准雨量器高 3% 和 2%, 雨夹雪时高 12%, 降雪时分别上升到 47% 和 34%。Hanson (1979) 指出, 带 Wyoming 防风圈的雨量器比美国国家天气局标准雨量器多观测降水 25% (降雪时多 54%, 降雨时高 11%)。Goodison (1982) 发现, 降雪观测中, 带 Nipher 防风圈的加拿大标准雨量器比美国国家天气局标准雨量器多观测降水 50% 左右。国内的对比观测表明, 带 Tretyakov 和 Nipher 防风圈的雨量器比同高度普通雨量器分别多捕捉降雪 30% 和 20%。由此证实, 雨量器加防风圈后的确能够提高捕捉降水的能力, 防风圈的防风作用在观测降雪时比较明显 (杨大庆, 1988)。

2.3 雨量器口径与捕捉降水率的关系

Huff (1955) 对四种不同口径雨量器进行对比观测后发现, 雨量器的口径与捕捉率呈反比。降雨观测中, 口径为 2.03 cm 雨量器比美国国家天气局标准雨量器 (口径为 20.3 cm) 多捕捉降水 5—30%, 口径为 2.92 cm 和 7.62 cm 雨量器捕捉的降水量分别比美国国家天气局标准雨量器高 2—25% 和 1—9%。不同口径雨量器捕捉降水量的差异随降水量和降水时段的风速而变化。一般来讲, 在微雨大风条件下, 小口径雨量器的捕捉率较高, 在大雨弱风条件下, 大口径和小口径雨量器的捕捉率相差不多。

2.4 雨量器器口高度与捕捉率的关系

由于地面的磨擦作用, 近地面的风速随高度上升而增大。因此, 雨量器器口越接近地面, 受风的影响越小, 其捕捉率就越高 (Gray, 1970; Green, 1972)。据 Neff (1977) 研究, 在开阔观测场, 地面雨量器比器口高度为 1 m 的雨量器多捕捉降水 5—15%。在冬季积雪区, 风吹雪在地面流动, 灌入雨量器, 产生相当大的观测误差, 所以地面雨量器原则上不能用来观测降雪。

2.5 降水时段平均风速与捕捉率的关系

国外对风速与捕捉率的关系研究较多, 得到的结论不尽相同, 综合起来有两种。一是风速与捕捉率的直线相关, Helmers (1954) 给出两者之间最简单的相关方程, 其中风速是一周的平均值。方程通过统计检验, 但精度欠佳, 原因是未区分降水形态及周平均风速的时间尺度过长。Sturges (1984) 认为, 以降水日平均气温为参数, 区分不同的降水形态分析两者的关系, 发现降雪时捕捉率受风的影响最大, 雨夹雪时次之, 降雨时两者不相关。Green (1972) 考虑雨滴下落路径对捕捉率的影响, 以雨滴倾角 (雨滴下落路径与水平线的交角) 为参数, 建立三个相关方程。结果表明, 在同样风速下, 雨滴下落路径越倾斜, 雨量器的捕捉率就越低。二是风速与捕捉率关系为曲线形式, 又可分为两类。第一类较常见, 曲线随风速增大向下弯曲, 表明静风时雨量器的捕捉率最高, 最大风速时捕捉率最低。同样风速下, 降雨时的捕捉率最高, 雨夹雪时次之, 降雪时最低, 带防风圈雨量器的捕捉率高于不带防风圈者 (Larson, 1974)。第二类曲线为上凸形, 当降水时段平均风速在 0—4 m/s 时, 捕捉率大于 1.0, 风速超过 4.5 m/s 时, 捕捉率小于 1.0, 以后随风速增大而下降 (Goodison, 1983)。Goodison 认为: 曲线异常的原因是 Nipher 防风圈的防风作用好, 加拿大标准雨量器的口径小, 受风的干扰小。另外, 防风圈边缘的溅水补充以及防风圈上的积雪被风吹入雨量器, 使得雨量器观测值偏高。

2.6 雨量器观测降水动力损失修正

降水观测动力损失的修正标准为实际降水量的相对真值。确定降水相对真值的方法之一是实际观测, 认为地面雨量器基本不受风的干扰, 采取防溅措施后, 其观测值接近实际降水量 (Heff, 1977; Robison, 1969)。降雪观测中, 将放置在林中空地的测雪板和

带有防风圈雨量器的观测值视为相对真值 (Goodison, 1983; Sturges, 1984)。另一种是算法, Hason (1979) 设计了“对雨量器”, 它是由两个美国国家天气局标准雨量器组成, 其中一个雨量器带 Alter 防风圈, 另一个不带防风圈。用下式计算实际降水量 (A)。

$$\ln\left(\frac{U}{A}\right) = B \ln\left(\frac{U}{S}\right) \quad (3)$$

其中, U 和 S 分别为无防风圈雨量器和有防风圈雨量器观测值 (mm), B 为经验系数, 一般取 1.70。

实际观测及计算表明, 用“对雨量器”观测值计算的降水量与带 Wyoming 防风圈雨量器的观测值十分接近。

修正降水观测动力损失多用系数法, 即:

$$\Delta P_a = \alpha P_m \quad (\alpha = (P_i - P_m) / P_m) \quad (4)$$

其中 P_i 为实际降水量, P_m 为观测降水量, α 为修正系数。

依修正系数 α 的不同取值, 系数法可以分为一次修正和逐次修正。所谓一次修正是将 α 视为常数, 而逐次修正中 α 为变数, 其值由降水时段平均风速 $\bar{W}$, 从 $\bar{W} - R$ 关系线上查得 $R(i)$, 经下式确定

$$\alpha(i) = \left(\frac{1}{R(i)} - 1\right) \quad (5)$$

以上两种修正方法, 一次修正比较简单, 修正系数 α 是不同风速下的平均值, 反映观测场平均风速下, 标准雨量器观测值和实际降水量之间的关系。逐次修正考虑每次降水观测中风对雨量器捕捉降水干扰程度的差异, 修正系数随降水时段风速而变化比较符合实际情况。

3 雨量器观测降水的湿润损失及其修正

每次降水观测中普通雨量器的湿润损失量决定于雨量器的材料和结构以及降水量、降水持续时间、降水强度、降水形态和降水时段内风向风速的变化。一般来讲, 雨量器内壁越光滑, 口径越小, 湿润损失就越小; 降水量越大, 降水时间越长, 强度越大, 风向风速变化越明显, 湿润损失量就越大。同一种雨量器, 对应降雨的湿润损失量最大, 雨夹雪时次之, 降雪时最小。如苏联 Tretyakov 雨量器在雨、雨夹雪和雪时的平均湿润损失量分别为 0.22 mm、0.19 mm 和 0.18 mm (Golubev, 1985)。瑞士 Hellmann 雨量器的湿润损失量固态降水时为 0.15 mm, 液态降水时为 0.30 mm (Sevruk, 1985b)。但是, 另一种观点认为, 雨量器在观测固态和液态降水时的湿润损失量相同 (Dahlstrom, 1985; Madson, 1985)。笔者通过实际观测发现, 不同降水形态下普通雨量器的湿润损失量有较明显的差异 (杨大庆, 1987)。

设 ΔP_w 为某时段雨量器观测降水中的湿润损失量 (mm), C_1 和 C_2 分别为普通雨量器承水器和储水瓶 (筒) 在一次降水观测中的湿润损失量 (mm), n 为该时段内雨量器的湿润次数, 则湿润损失量的修正可用下式计算

$$\Delta P_w = (C_1 + C_2) \cdot n \quad (6)$$

承水器和储水瓶(筒)由湿变干所需要的时间为雨量器在观测环境下的干燥时间。Sevruk (1974a)指出,在夏季干旱气候条件下,Hellmann 雨量器承水器的干燥时间为 10—20 min,湿润气候条件下不超过 1 h,储水筒的干燥时间为 4 h。1986 年夏季乌鲁木齐河源的实际观测表明,普通雨量器不带漏斗时,承水器的干燥时间约为 1 h,储水筒的干燥时间不超过 2 h。因而认为,夏季在乌鲁木齐河源普通雨量器的干燥时间为 2 h。

Sevruk (1974a) 取式 (6) 中的 C_1 和 C_2 为 0.15 mm,修正瑞士某实验流域 1938—1947 年 4—9 月降水观测中的湿润损失,发现月湿润损失修正量的 10 年平均变化于 3.9—5.5 mm 之间,4—9 月合计值为 30.1 mm。根据湿润损失实际观测,取 C_1 为 0.17 mm, C_2 为 0.15 mm,修正乌鲁木齐河源 1986 年 5—8 月 78 次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% (杨大庆, 1987)。

4 雨量器观测降水的蒸发损失及其修正

雨量器观测降水的蒸发损失量取决于蒸发时间内的气温以及雨量器器口风速和饱和差。另外雨量器储水瓶(筒)的口径和封闭程度以及雨量器的颜色和使用年限也与蒸发损失有关 (Sevruk, 1985a)。蒸发时间是决定蒸发损失量的关键因素,它与蒸发损失量成正比。

雨量器的蒸发损失量可用实验方法确定。定时向雨量器储水瓶(筒)中加水,定时称重,两次称重之间的重量差,即为实验时段(蒸发时间)内雨量器的蒸发损失量 (mm, 蒸发损失量与蒸发时间的比值,就是蒸发损失率 (mm/h)。据 Sevruk (1974b) 研究,瑞士 Hellmann 雨量器日蒸发损失量的最大值为 0.75 mm,1971 年 8 月无降水日雨量器日平均蒸发损失量为 0.60 mm,德国及波兰 Hellmann 雨量器的日蒸发损失率分别为 0.015 mm/h 和 0.018 mm/h, Tretyakov 雨量器的日蒸发损失率为 0.051 mm/h (Golubev, 1985),国内普通雨量器为 0.011 mm/h。由于各种雨量器结构和观测场气候条件的差异,不同雨量器的蒸发损失率相差较大。国外雨量器的蒸发损失实验大多选择无降水天气时进行,实验资料反映无降水条件下雨量器储水瓶(筒)中水分蒸发,也许比降水停止后雨量器的实际蒸发损失大。

修正雨量器蒸发损失的方法有两种,其一为间接方法,通过相关分析建立雨量器蒸发损失量与气温、蒸发器日蒸发量、日降水量等气象要素的相关方程。经过相关方程的外延和内插计算,修正雨量器的蒸发损失量 (Sevruk, 1974b; WMO, 1975)。Sevruk (1974b) 建立雨量器蒸发损失量与蒸发器日蒸发量之间的回归方程,修正瑞士 Les Avants 流域 4—9 月降水观测的蒸发损失为 6.60 mm。其二为直接法,用决定雨量器蒸发损失量的两个关键要素——蒸发损失率 (e) 和蒸发时间 (h),直接计算蒸发损失量,即

$$\Delta P_e = e \times h \quad (7)$$

对比两种方法,第一种方法揭示雨量器蒸发损失量和有关气象要素之间的联系,在有资料地区便于推广应用,不足之处是相关方程外延,计算的精度较低。第二种方法物理意义清楚,便于计算。但是蒸发损失率取常数不太合理。研究表明,该值随降水形态和雨量器器口的风速以及饱和差而变化 (Golubev, 1985)。据乌鲁木齐河源的蒸发损失实验,雨量器白天的蒸发损失率比夜晚大一个数量级。因此,式 (7) 中的蒸发损失率至少应在白天和夜晚区别对待。

5 存在的问题

综合上述分析,降水观测误差分析和改正研究中存在以下问题。

(1) 实际降水量的准确测定:不同雨量器的对比观测表明,地面雨量器受风的干扰较小,观测液态降水时,适当采取防溅措施,其捕捉降水量接近降水真值。因此,在修正液态降水动力损失时,可以地面雨量器的观测值作为标准。地面雨量器受风吹雪的严重干扰,不能用来观测降雪。所以在山区和高纬度地区,无自然屏障条件下,降水真值尤其是降雪真值的观测仍待解决。

(2) 无降水对比观测资料地区(台站)降水观测误差的修正:降水对比观测实验(包括雨量器的湿润损失和蒸发损失实验)的目的在于建立系统误差与有关影响因素的关系,修正单点降水观测中的动力损失、湿润损失和蒸发损失,从而得到实际降水量的相对真值,为了估算某一地区或流域的实际降水量,必须修正每一观测点的降水观测误差。由于条件的限制,不可能在各个不同的地理位置、开阔程度、气候条件和降水特征的观测场进行降水对比观测实验。因此,在无降水对比观测资料的地区和台站,如何利用基本气象资料,修正降水观测系统误差,仍然是一个有待解决的问题。

(3) 修正动力损失的数学模型的建立:降水时段平均风速与捕捉率的关系曲线,说明特定环境下风影响雨量器捕捉降水的程度,能够满足修正单点降水观测资料中动力损失的要求。但是这种关系是经验性的,不具有普遍意义。因此,如何利用雨量器的风洞实验资料,考虑雨滴(雪粒)下落路径随风速的变化,建立定量的数学物理模型,计算雨量器器口不同风速下的“漂溢量”。

致谢:承蒙施雅风先生审阅全文,并提出修改意见。谨致谢忱。

主要参考文献

- 张海仑 (1982): 近代水文和水资源主要研究方向. 水文 (水资源专辑), 93—96.
林之光 (1983): 降水观测误差及其对山区降水分布的影响. 气象, 9 (12): 26—28.
林之光 (1985): 中国气候. 上海: 科学技术出版社, 173—176.
杨大庆 (1987): 普通雨量器湿润损失实验的初步分析. 气象, 13 (7).
杨大庆 (1988): 乌鲁木齐河源降水观测误差分析及其改正, 冰川冻土, 10 (4): 384—399.
Allis, J.A. and Harris, B. (1963): A comparison of performance of five rain-gage installations, J. Geophys. Res., 68(16).
Dahlstrom, B. (1985): The improvement of point precipitation data on an operational basin, Instruments & Observing

Methods Reports, No.25 WMO.

Golubev, V.S. (1985): Random and systematic errors of precipitation measurements by network instruments, Instruments & Observing Methods Reports, No.25, WMO.

Goodison, B.E. (1978): Accuracy of Canada snow gage measurements, Journal of Applied Meteorology, Vol.17.

Goodison, B.E. and Metcalfe, J.R. (1982): Canada snow-gage experiment recent results, Presented at the West Snow Conference, April 20—23.

Goodison, B.E. (1983): Handbook of snow, Ontario, Canadian.

Gray, D.M. (1970): Handbook on the principles of hydrology, printed in USA.

Green, M.J. (1972): Effects of exposure on the catch of raingages, Symposium on the results of research on representative and experimental basins, Vol.II, IASH * UNESCO.

Hanson, C.L. (1979): A note on the dual-gage and Wyoming shield precipitation measurement systems, Water Resources Research, 15(4).

Helmert, A.E. (1954): Precipitation measurements on wind-swept slopes, Trans. Am. Geophys. Union, 35(3).

Huff, F.A. (1955): Comparison between standard and small orifice raingages, Trans. Am. Geophys. Union, 36(4).

Larson, L.W. and Peck, E.L. (1974): Accuracy of precipitation measurements for hydrologic modeling, Water Resources Research, 10(4).

Madson, H. (1985): Meteorological stations with low frequency of solid precipitation, Instruments & Observing Methods Reports, No.25, WMO.

Neff, E.L. (1977): How much rain does a rain gage?, Journal of Hydrology, Vol.35.

Robinson, A.C. and Rodda, J.C. (1969): Rain, wind and the aerodynamic characteristics of rain-gauges, Meteorological Magazine, 98.

Sevruk, B. (1974a): Correction for the wetting loss of a Hellmann precipitation gage, Hydrological Sciences Bulletin, XIX.

Sevruk, B. (1974b): Evaporation losses from containers of Hellmann precipitation gages, Bull. Int. Ass. Scient. Hydrol, 19(26).

Sevruk, B. (1985a): Correction of precipitation measurements: Summary report, Instruments & Observing Methods Reports, No.25, WMO.

Sevruk, B. (1985b): Correction of precipitation measurements: Swiss experience, Instruments & Observing Methods Reports, No. 25, WMO.

Sturges, D.I. (1984): Comparison of precipitation as measured in gages protected by a modified Alter shield, Wyoming shield, and stand of trees, Presented at the West Snow Conference, April, 17—20.

WMO (1970): Guide to hydrometeorological practices.

WMO (1975): World water balance and water resources of the earth, Studies & Reports In Hydrology 25, UNESCO.

WMO (1985): International organizing committee for WMO solid precipitation measurement intercomparison, First Session, Norrköping, 16—20.