

李林, 范雪波, 孙雪琪, 等. 2016. DSC2 型称重式降水传感器测雨性能的分析. 气象, 42(8):1013-1019.

# DSC2 型称重式降水传感器测雨性能的分析<sup>\*1</sup>

李 林<sup>1,2,3</sup> 范雪波<sup>3</sup> 孙雪琪<sup>3</sup> 崔 炜<sup>3</sup> 张治国<sup>3</sup>

1 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

2 中国气象局气象探测工程技术研究中心, 北京 100086

3 北京市气象探测中心, 北京 100089

**提 要:** 为更有效地利用降雨观测数据, 充分发挥新型探测设备建设效益, 文章对 DSC2 型称重降水传感器的测雨性能进行分析评估, 选取北京市 13 个国家级地面气象观测站在 2013 年 4—10 月, 称重式降水传感器与人工、翻斗观测降雨量的业务观测资料, 分析称重与人工和翻斗观测在降雨总量、日降雨量等方面的差异。结果表明: 在选取样本中, 12 个台站的总降雨量误差符合现行业务要求, 三种测量在日降雨量等级判断方面基本一致。称重比人工观测的日降雨量平均偏小 0.13 mm, 日降雨量相关系数为 0.9968, 对应地, 称重比翻斗观测的结果平均偏小 0.17 mm, 日降雨量相关系数为 0.9983。

**关键词:** 降雨量, 称重式降水传感器, 对比评估, 相关性

中图分类号: P456

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.08.012

## Analysis on the Performance of DSC2 Weighing Gauge in Precipitation Observation

LI Lin<sup>1,2,3</sup> FAN Xuebo<sup>3</sup> SUN Xueqi<sup>3</sup> CUI Wei<sup>3</sup> ZHANG Zhiguo<sup>3</sup>

1 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

2 Research Centre of Meteorological Observation Engineering Technology, CMA, Beijing 100086

3 Beijing Meteorological Observation Centre, Beijing 100089

**Abstract:** To use precipitation data more effectively, this paper analyzed the performance of DSC2 weighing gauge in precipitation observation. We selected the precipitation observation data from 13 national meteorological stations in Beijing from April to October 2013 to do research. The data were collected by weighing gauge, manual way and tipping gauge, respectively. The analysis was focused on the differences of total rainfall and daily precipitation observed by the three ways. The results showed that, among the samples, the errors of total precipitation from 12 stations are in line with the requirement of current operation and the grade judgment of daily precipitation by the three ways are basically consistent. Comparing the weighing gauge with manual way, the daily mean precipitation by weighing gauge shows a 0.13 mm less, and the daily precipitation correlation coefficient is 0.9968. The observation result by weighing gauge is averagely 0.17 mm less than the result by tipping gauge and the correlation coefficient is 0.9983.

**Key words:** precipitation amount, weighing gauge, assessment, relativity

\* 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ11020507)与中国气象局气象探测工程技术研究中心开放基金课题共同资助  
2015 年 5 月 6 日收稿; 2016 年 3 月 9 日收修定稿  
第一作者: 李林, 主要从事综合气象观测系统建设和观测数据质量控制. Email: lilin@bjmb.gov.cn

## 引 言

降水量是气候变化、水文气象、水循环等研究领域最基础的参数之一。由于降水分布的时间、空间随机性以及容易受到观测环境影响,加上不同观测原理的雨量计使用不同结构和安装高度,即使在同一台站安装的不同雨量计也很难观测到的降水量完全一致。世界气象组织(WMO)一直高度关注降水观测的准确性和误差原因,从 1955 年开始 CIMO 组织了五次降水观测仪器的对比试验(Sevruk et al, 2009),中国科学院兰州冰川冻土研究所参与了 1986—1993 年的降水对比观测试验(杨大庆等, 1989),1992 年中国气象局进行了 30 个试验站为期 7 a 的对比观测,任芝花等(2003)对中国人工观测降水的误差进行了定量分析,另有学者对强降水开展分区研究和自动站降水特征的聚类分析(马京津等, 2012;刘伟东等, 2014),也有研究人员对自动站雨量计资料开展质量控制等方法进行研究(王红艳等, 2015;刘雨佳等, 2014)。

为了解决冬季降雪观测自动化问题,中国气象局气象探测中心在 2006 和 2009 年的冬季两次组织称重式降水传感器的考核试验,并开展有关分析评估(任芝花等, 2007b;王柏林等, 2009;姚作新, 2011)。还有其他研究人员对降水观测仪器开展过数据分析,但基本上都集中在 SL3-1 型等翻斗式传感器方面(朱乐坤, 2004;胡玉峰, 2004;任芝花等, 2007a;2010)。

WMO 在 2004—2008 年进行雨强观测试验,发现称重降水传感器表现较其他类型传感器性能更优,我国目前的研究还主要是针对称重式降水传感器观测降雪,仍十分缺少针对称重式降水传感器测量降雨性能进行的比较研究。称重式降水传感器可实现全相态降水的全天候自动化观测,有利于提高降水观测的准确性和及时性,并有助于减少人工、翻斗测量方法的某些潜在误差(WMO, 2006)。现行业务中降雪采用称重式降水传感器、降雨采用翻斗雨量计,需要业务人员定期进行业务切换,同时不同降水形态采用不同的传感器在进行数据均一化等分析时还多引入了仪器误差。

本文通过称重式降水传感器与人工观测、自动气象站双翻斗雨量传感器观测数据的对比,对称重式降水传感器的测雨性能进行研究,对不同类型观

测仪器所带来的误差水平开展分析,对于推进全年降水的自动化观测具有必要且直接的现实意义,可提高降水观测数据的均一化水平,更好地发挥有关设备的建设效益。

## 1 降雨观测设备与资料

本文进行分析的降雨数据为三种观测仪器观测产生,即人工雨量筒(SDM6 型)、双翻斗雨量计(SL3-1 型)、称重式降水传感器(DSC2 型),其中前两种 SDM6 型和 SL3-1 型的承水口高度为 70 cm,而 DSC2 型的承水口高度为 120 cm,三者的承水口直径均为 20 cm,且只有 DSC2 型安装有单层防风圈。

SDM6 型和 SL3-1 型均为地面观测业务中一直使用的降雨观测设备(中国气象局, 2003),较为普遍。DSC2 型为引进的挪威 Geonor 公司的 T-200B 型称重降水传感器,由称重单元(振弦式称重传感器、激振电路、拾振电路等)、处理单元、外围组件(含收集容器、外壳、底盘、基座和防风圈等)构成硬件组成。载荷单元采用振弦技术,即利用内部弹性元件(即金属弦丝)由被测量物(即降水)拉紧的程度来称重,其输出的频率量与降水重量存在对应关系,数据处理单元测出称重单元传送来的频率量并计算得到集水桶内的降水量。

人工观测业务和自动气象站双翻斗观测按照现行业务规定进行。双翻斗式雨量计和称重式降水传感器每分钟进行自动观测,日降水量由每日逐时观测的降水量累加生成。对双翻斗雨量计和称重式降水传感器的降水数据,参照人工观测天气现象进行质量控制,剔除掉由于其他原因导致的故障数据和误报降水。本文中选取北京市 13 个国家级地面观测站三种雨量计在 2013 年 4—10 月的观测资料进行分析,观测期间降水状态均为降雨。

## 2 降雨量观测差异分析

### 2.1 观测效率对比

在选取的观测时间段内,人工观测共记录有 903 站次降雨现象,其中有 778 次降雨现象中全部三种观测方式中至少有一种观测到了降雨量。按照降雨量等于或大于 0.1 mm 为一个降雨日达到的标

准,称重、人工、双翻斗分别观测到 755、741、742 个降雨日,全部三种方式共同观测到的降雨日有 716 个。以人工和双翻斗均观测到的降雨日为参考,称重感应一致率达到 96.9%;以人工观测到降雨现象为参考,称重、人工、双翻斗的感应一致率分别为 83.6%、82.0%、82.2%。可以发现,三种观测方式对降雨日判断的差异较小,出现差异时日降水量介于零星降雨和小雨之间,观测的日降雨量集中在 0.1~0.3 mm。图 1 为 13 个台站观测降雨现象次数和三种设备分别观测到的降雨日数,从中可以看出仅有 2 个台站称重式观测的降雨日数少于人工和翻斗

观测。结果表明称重式降水传感器在捕捉微量降雨类事件的能力不低于人工观测和翻斗雨量观测甚至略优。

### 2.2 累积降雨量差异

计算观测时段内各台站的三种观测方式的累积降雨量,13 个台站中有 9 个台站统计的翻斗观测的累积降雨量最高,4 个台站统计的人工观测的累积降雨量最高,仅 1 个台站统计的称重式观测的累积降雨量最高。全部站点称重式观测的累积降雨量与人工观测、翻斗观测累积降水量相对误差的平均值分别为-1.6%和-2.0%,按照中国气象局相对误差不超过±4%的规范要求,与人工观测相比,称重式降水观测有 1 个台站相对差未达到要求;与翻斗观测相比,称重式降水观测有 2 个台站相对差超过范围。各站总降水量的数据比较参见表 1,结果表明称重式降水观测到的累积降雨量较人工和翻斗均为偏小。

### 2.3 降雨量等级比较

按照中国气象局的降雨量等级标准(中国气象局 2012),对三种方式共同观测到的 716 个降水日进行对比分析,如图 2 所示。有 11 次在降雨等级上存在差别,仅有 4 次称重与人工、翻斗均不一致。表 2 为在雨量等级存在差别的日降水量,在 11 次存有差别的降雨日中,除 54596 站在 6 月 25 日人工观测降雨量差异较大外,其余 10 次三者观测的日降雨量均十分接近降水等级判断标准的日降雨量。经查,此次个例差异较大的原因为该次主要降雨在

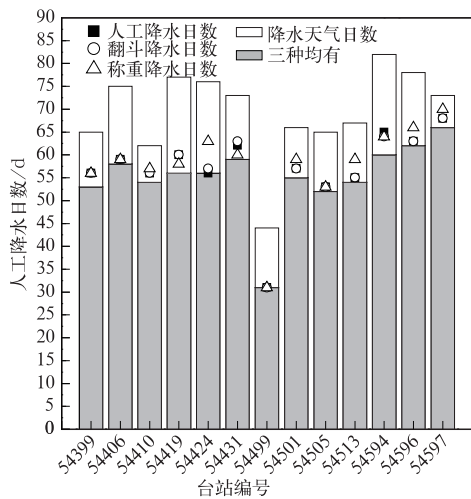


图 1 北京市 13 个台站观测降雨现象日数和三种设备分别观测到的降水日数  
 fig. 1 Statistics of precipitation phenomenon observed by 13 stations in Beijing and the independent precipitation days obtained by three different ways

表 1 各台站累积降水量(单位:mm)

Table 1 The precipitation of each station obtained by the three different ways (unit: mm)

台站	人工降雨量	翻斗降雨量	称重降雨量	与人工相对差/%	与翻斗相对差/%
54399	502.3	506.2	483	-3.8	-4.6
54406	495.8	499.3	481.6	-2.9	-3.5
54410	436.8	431.6	448.7	2.7	4.0
54419	510.2	518.1	499.6	-2.1	-3.6
54424	477.7	471.5	465.2	-2.6	-1.3
54431	450.5	459	430.8	-4.4	-6.1
54499*	258.2	261.7	258.5	0.1	-1.2
54501	396.1	396.6	394.7	-0.4	-0.5
54505	449.4	457.6	444.2	-1.2	-2.9
54513	499.5	498.6	494	-1.1	-0.9
54594	509.6	506.7	499.6	-2.0	-1.4
54596	455.3	459	446.2	-2.0	-2.8
54597	632.2	635.3	625.8	-1.0	-1.5

注:54499 站删除故障时间对比数据

19:49 开始,人工观测降雨可在正点前 15 min 内进行,而翻斗和称重观测是在正点时采样,这种差异造成前后两日降雨量等级存在误差。结果表明,在有明显降水过程时,称重式与人工、翻斗在降雨量等级判断上的差别很小。

#### 2.4 日降雨量差异

本文对 778 次降雨现象中称重式与人工观测、翻斗雨量计的日降雨量资料进行对比,分别有 86.1% 和 84.8% 的对比次数中称重式观测的日降雨量偏差在业务要求范围内(中国气象局,2003)。称重式观

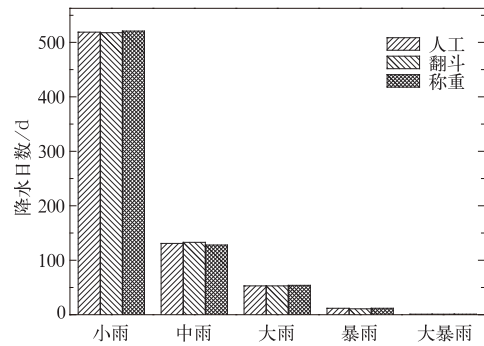


图 2 三种观测方式降水日的对比分析  
Fig. 2 Comparison of precipitation days obtained by the three different ways

表 2 三种观测方式降水等级存在差异时单独观测到的降水量(单位:mm)

Table 2 The independently observed precipitation in the case of different precipitation grads by the three different ways (unit: mm)

日期	台站	人工降雨量	翻斗降雨量	称重降雨量
2013/6/4	54499	25.0	24.3	25.0
2013/6/5	54597	9.7	10.0	10.1
2013/6/25	54596	11.4	6.7	6.6
2013/7/2	54424	25.4	24.9	25.5
2013/7/7	54399	10.3	10.5	9.5
2013/7/8	54513	25.2	26.0	24.8
2013/7/31	54406	24.0	23.2	26.4
2013/7/31	54596	9.9	10.2	9.6
2013/8/28	54399	10.3	10.4	9.1
2013/8/28	54410	50.7	49.0	52.4
2013/8/28	54596	24.8	25.0	25.0

测比人工观测的日降雨量平均偏小 0.13 mm,均方根误差为 0.72 mm;称重式观测比翻斗观测的日降雨量平均偏小 0.17 mm,均方根误差为 0.55 mm。称重观测与人工观测的绝对误差比与翻斗观测小,而均方根误差比与翻斗观测大,也是因为人工观测和称重观测、翻斗观测存在如上节所述的采样时间差。人工观测和翻斗观测分别有 61.9% 和 63.0% 的日降水量大于称重观测。

图 3 为称重式与人工、翻斗雨量计观测的日降水量差值频率分布图。图中差值为称重观测的日降水量减去人工和翻斗观测的日降水量,对比次数为不同差值对应的称重与人工和翻斗对比观测次数。由图可见,称重式降雨观测数据小于人工和翻斗的比率较高,两种的差值分布较为一致。

#### 2.5 小时降雨量分析

因为人工无小时降雨观测,仅分析称重观测与翻斗观测的小时降雨量数据,对比期间,称重观测与

翻斗观测分别有 3310 和 3608 个时次观测到降雨。按照小时降雨量的大小进行统计,小时降雨量按照 0.1、0.5、1.0、2.0、5.0、10.0 mm 进行统计,表 3 为两种观测的观测次数和占总观测时次的百分比。从表 3 可见,称重观测与翻斗观测的差异主要在小时降雨量为 0.1 mm 的级别,其他降雨量的情况两者差别不大,称重观测与翻斗观测的降雨总时次差值和 0.1 mm 的降水时次的差值相当。翻斗观测的 0.1 mm 的降水时次较称重观测多,但是如 2.1 所分析观测的降水日数较称重观测少,主要因为翻斗雨量计的机械结构复杂,降水的汇集时间长。降水汇集通过重力作用,但是同时水的吸附力等较强,尤其是在雨滴较小的情况下,容易吸附在仪器表面,水滴自身重力产生的汇集过程较慢,从而拉长了降水汇集时间,降低了对降水测量的反应时效。台站在观测过程中也发现降水停止后,翻斗雨量计还经常输出,并作为滞后降水进行处理,即为汇集时间长导致。同时翻斗雨量计触发翻动时,降水量还未

达到 0.1 mm,在小雨时翻斗观测偏大,而称重观测的算法对于降水强度低于  $0.05 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  不进行累积,也导致称重观测的小时降水 0.1 mm 的时次偏少。

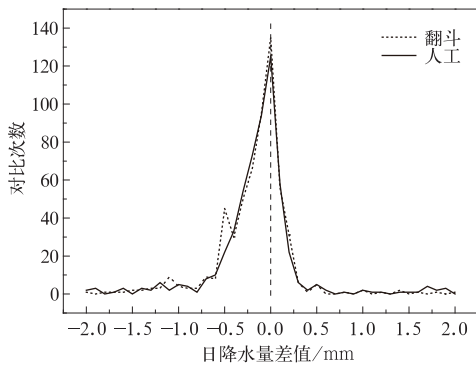


图3 称重观测与翻斗观测及人工观测的日降水量差值频率分布图

Fig. 3 The frequency distribution of absolute differences in daily precipitation among weighing gauge, manual gauge and tipping gauge

表3 称重观测和翻斗观测小时降水量分布

Table 3 The distribution of hourly precipitation between weighing gauge and tipping gauge

小时降水量/mm	称重观测		翻斗观测	
	次数	百分比/%	次数	百分比/%
0.1	577	17.4	860	23.8
0.2~0.5	997	30.1	975	27.0
0.6~1.0	552	16.7	552	15.3
1.1~2.0	473	14.3	502	13.9
2.1~5.0	422	12.7	434	12.0
5.1~10.0	174	5.3	173	4.8
>10.1	115	3.5	112	3.1

### 3 称重式降雨观测的误差因素

WMO 在《气象仪器和观测方法指南》中指出降雨误差主要包括风场变形误差、沾湿误差、蒸发误差、随机误差和仪器误差,根据任芝花等(2003)对中国降水测量误差的研究也得出相似的结论,并指出对于人工测量蒸发误差可以忽略,翻斗雨量计机械结构复杂,误差受雨强影响较大,当雨强较大时观测雨量偏大。目前,对于称重式观测降水量误差的分析研究较少,WMO 的 SPICE(Solid Precipitation Inter-Comparison Experiment)计划也主要关注在称

重测量降雪的性能,自 2005 年开始的降雨强度对比观测并未关注降雨总量。对于本文中观测到的称重式降雨观测值小于人工观测和翻斗观测数值的原因,可主要归纳概括为如下四个方面:仪器的静态性能误差、蒸发误差、人为习惯误差和风场变形误差。

#### 3.1 静态性能误差

在安装 DSC2 型传感器时,投入业务使用前需用 10 mm 雨量专用量杯做现场测试,北京地区近 100 个同型号设备输出的雨量值基本集中在 9.8~9.9 mm。另外,设备厂家在出厂检测时采用 Metrohm 876 型加液器注入 314.16 ml 水量,统计表明超过 95% 的设备测试输出数据为 9.9 mm。同时,中国气象局在 2010 年 11 月至 2011 年 3 月开展冬季外场对比观测时,采用标准球和加液器对 5 个 DSC2 型进行静态测试和现场测试,10 组测试中仅一组数据结果为正偏差,总体误差为  $-2\% \sim -1\%$ 。而 WMO 在 2004 和 2007 年(Vuerich et al,2009)进行的两次雨强对比观测,对比观测时对 Geonor 设备(DSC2 型的原型)的 T-200B 进行研究,在测试时其也表现为负误差。截至目前,尚未有公开数据表示对称重式降雨观测设备的这一偏差进行调整。

翻斗雨量计则使用机械结构进行测量,台站业务人员可以根据测试结果对其进行人工调整,在实际业务中发现部分台站业务人员倾向于将其观测值调整到略偏大的位置,而且,在对翻斗雨量计进行调整的同时,在无形中也消除了翻斗雨量计的部分沾湿误差。王敏(2015)、韩广鲁(2014)在对翻斗雨量计进行测量误差不确定度评定时,随机选取的翻斗雨量计均表现为正误差。

#### 3.2 蒸发误差

任芝花等(2003)认为中国台站人工雨量器的蒸发误差为 0.0 mm,翻斗观测的降水则由于是随降随测,基本不存在蒸发误差。

称重式降水传感器的内筒口径大于其承水口,暴露水面面积约为小型蒸发器水面面积的 1.6 倍。按照业务规范需向内筒中添加抑制蒸发油以提高数据准确性,而且在使用阶段,考虑到称重式降水观测在一段时间内仅作对比试验使用,台站人员未向称重式承水筒内添加抑制蒸发油以减少蒸发误差。在

北京地区,根据台站的称重式降水传感器中采集器设备的原始数据计算,在添加抑制蒸发油的情况下,内筒的日蒸发量小于 0.05 mm,而在 7—8 月未添加抑制蒸发油的情况下内筒水面的平均日蒸发量可达 2~3 mm,在极端情况下甚至高达 5 mm。在持续下雨的天气条件下,联合降水量计算内筒液面高度的变化,水分日蒸发量基本保持在 0.2~0.5 mm 之间。WMO(2006)的研究报告指出,在春、夏季可能每天有超过 0.8 mm 的蒸发损失。

### 3.3 人为习惯误差

人工观测要求在降水量小于 0.05 mm 时用微量表示,实际观测时当人工观测达到 0.05 mm 时,观测员一般记录为 0.1 mm,而称重式降水观测设备只有在达到 0.1 mm 时才输出降水数据。另外,人工观测时按照四舍五入的修约规则进行测量,称重观测则是采用舍弃尾数的修约规则,这在一定程度上也造成了称重式测量值要较人工观测偏小。

李伟等(2010)指出业务人员进行能见度、云高等对比试验观测时,可能会受到心理因素的干扰。经验表明,在人工测量降雨时也有着类似的心理因素,即人工测量时会参照翻斗雨量计的测量结果,从而使得两者在观测数据上表现为偏差较小,而观测人员工作中一般不进行实时查看称重降水观测数据的工作。在仪器完全一致的情况下,任芝花等(2007b)根据 2005 年开展的研究得出日降水量翻斗测量值比人工观测平均偏高 0.12 mm 的结论。进行类似计算,由本文数据样本得出的结论为翻斗测量值仅偏高 0.04 mm,标准差同时也明显下降。

### 3.4 风场变形误差

根据任芝花等(2003)人对中国降水测量误差的研究,降雨测量误差中风场变形误差为 3.17%,WMO 的国际比对结果中(Sevruk, 1985)风场变形误差在降雨时为 2%~10%。研究表明,风场变形误差的大小与仪器的形状、收集口大小、安装高度、风速、降水粒子大小以及降水类型等多种因素相关。

称重式与人工、翻斗采用的雨量器,在收集口形状和大小上保持一致,但其安装高度不同且配有 Tretyakov 防风圈予以挡护,杨大庆等(1989)在天山大西沟试验验证了 Tretyakov 防风圈能提升雨量

计的降雨捕捉能力。本文中两个站点(中 54410 和 54431 站)的相对误差较其他台站偏大,考虑到站点环境进行分析,可能为受风场影响的缘故。54410 站为 13 个台站中唯一的称重式降水观测数值大于其他两种观测数值的台站,该站称重较人工偏大 2.7%、较翻斗偏大 3.9%,原因可能与该站观测场位于海拔高度 1216.9 m 的山顶,常年风速较大有关,统计数据亦表明该站点年平均风速在北京各台站中最大,54410 站 2013 年有降雨时的平均最大风速为  $4.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而全部 13 个站点在降雨时的平均最大风速仅为  $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,前者高出平均值一倍。而 54431 站与人工和翻斗相比相对观测到降水总量最小,且均未能达到业务的标准。该站观测场位于办公楼的六楼顶部,称重与楼体边缘最近,且高出房檐也最高,WMO(2006)指出边缘引发的风的漩涡对降水观测影响较大。将 54410 和 54431 站的小时雨量按照降雨时的出现最大风速  $3.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (2 级风)统计累积降雨量,小于  $3.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时称重观测与翻斗观测相比两站的捕捉率分别是 100.7%和 92.5%,大于  $3.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时捕捉率则分别为 105.1%和 94.5%,可见在风速较大的情况下两站称重观测相对翻斗观测的捕捉率均得到提升。

## 4 称重式观测与人工、翻斗观测日降水量的相关性

利用 13 个台站称重式观测的日降水量与人工和翻斗观测的日降水量进行了相关统计分析。图 4 为称重观测与人工、翻斗观测日降水量的相关图。从样本点的位置分布可见称重式观测的日降水量与人工、翻斗观测值都有较好的线性相关性。利用最小二乘法计算,称重式观测的日降水量与人工观测的日降水量相关系数为 0.9968,与翻斗观测数值的相关系数为 0.9983,虽然称重观测与翻斗观测的误差较与人工观测误差大,但与翻斗观测的相关性更好,相关方程分别如下:

$$y_{\text{称重}} = 1.0017x_{\text{人工}} - 0.1611 \quad (1)$$

$$y_{\text{称重}} = 0.9937x_{\text{翻斗}} - 0.1264 \quad (2)$$

式(1)和式(2)中, $x_{\text{人工}}$ 、 $x_{\text{翻斗}}$  分别代表人工和翻斗观测的日降水量, $y_{\text{称重}}$  代表称重观测的日降水量,单位均为 mm。

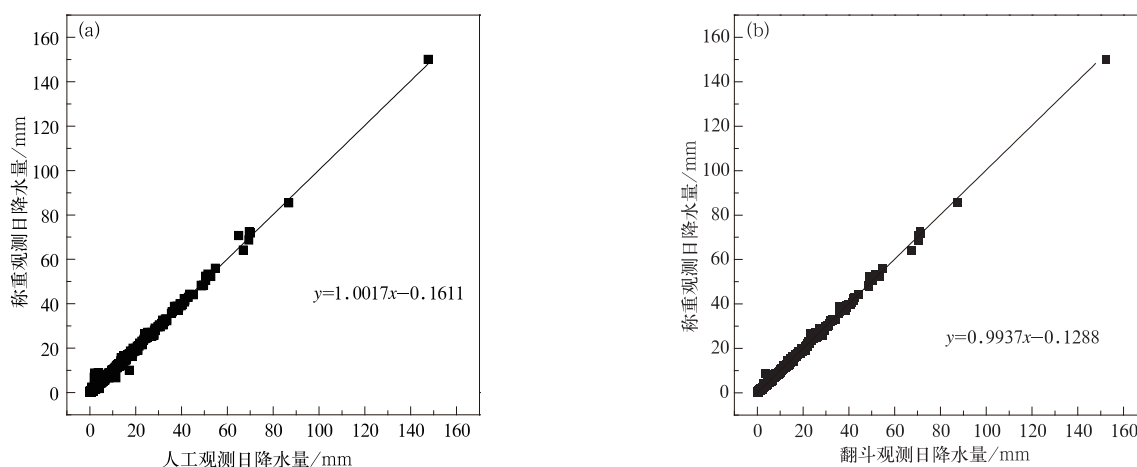


图 4 称重观测与人工观测(a)、翻斗观测日降水量(b)的相关图

Fig. 4 The correlation of daily precipitation among weighing gauge (a), manual gauge and tipping gauge (b)

## 5 结 论

使用北京市 13 个国家级地面观测站的称重与人工和翻斗的降水观测资料,通过系统对比发现:

(1)12 个台站的总降水量误差符合现行业务要求,称重比人工观测的日降水量平均偏小 0.13 mm,比翻斗平均偏小 0.16 mm,称重与人工和翻斗观测的日降水量对比,分别有 86.0%和 84.7%的对比次数符合业务要求。

(2)在有明显降水时,三者降水量等级判断差别较小,称重降水传感器在捕捉小量降水事件的能力优于人工观测和翻斗观测。

(3)称重观测的日降水量与人工观测对应值的相关系数为 0.9968,与翻斗观测对应值的相关系数为 0.9983。

## 参考文献

韩广鲁. 2014. 双翻斗雨量传感器测量数据不确定度评定. 气象科技, 42(5):773-776.  
 胡玉峰. 2004. 自动与人工观测数据的差异. 应用气象学报, 15(6): 719-726.  
 李伟, 贺晓雷, 齐久成. 2010. 气象仪器及测试技术. 北京: 气象出版社, 249.  
 刘伟东, 尤焕琴, 任国玉, 等. 2014. 北京地区自动站降水特征的聚类分析. 气象, 40(7):844-851.  
 刘雨佳, 陈洪滨, 金德镇, 等. 2014. 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. 大气科学, 38(1):159-170.

马京津, 李书严, 王冀. 2012. 北京市强降雨分区及重现期研究. 气象, 38(5):569-576.  
 任芝花, 冯明农, 张洪政, 等. 2007a. 自动与人工观测降雨量的差异及相关性. 应用气象学报, 18(3):358-364.  
 任芝花, 李伟, 雷勇, 等. 2007b. 降水测量对比试验及其主要结果. 气象, 33(10):96-101.  
 任芝花, 王改利, 邹凤玲, 等. 2003. 中国降水测量误差的研究. 气象学报, 61(5):621-627.  
 任芝花, 赵平, 张强, 等. 2010. 适用于全国自动站小时降水资料的质量控制方法. 气象, 36(7):123-132.  
 王柏林, 王经业, 任芝花, 等. 2009. 固体降水自动化观测试验. 气象科技, 37(1):97-101.  
 王敏. 2015. SL3 型雨量传感器示值误差测量不确定度评定方法. 气象科技, 43(1):65-69.  
 王红艳, 王改利, 刘黎平, 等. 2015. 利用雷达资料对自动雨量计实时质量控制的方法研究. 大气科学, 39(1):59-67.  
 杨大庆, 康尔泗, 张寅生, 等. 1989. 天山乌鲁木齐河源夏季降水观测中的动力损失及其修正. 气象, 15(1):22-27.  
 姚作新. 2011. 新疆阿勒泰国家基准气候站 ZQZ-BH 型称重式固态降水试验研究. 气象, 37(6):714-719.  
 朱乐坤. 2004. SL3 型翻斗雨量传感器的维护与调校方法. 气象科技, 32(4):300-302.  
 中国气象局. 2003. 地面气象观测规范. 北京: 气象出版社:54-55.  
 中国气象局. 2012. 降雨量等级标准(GB/T28592-2012).  
 Sevruk B, Ondras M, and Chvila, B. 2009. The WMO precipitation measurement intercomparisons. Atmos Res, 92:376-380.  
 Vuerich E, Monesi C, Lanza L G, et al. 2009. WMO Field Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges. WMO/TD1504:290.  
 WMO. 2006. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. WMO-No. 8, 569.