

杜传耀,尹佳莉,李林,等,2019.降水现象仪观测应用评估[J].气象,45(5):730-737. Du C Y, Yin J L, Li L, et al, 2019. Application evaluation of precipitation phenomenon instrument observation[J]. Meteor Mon, 45(5):730-737 (in Chinese).

## 降水现象仪观测应用评估\*

杜传耀<sup>1,2</sup> 尹佳莉<sup>1</sup> 李林<sup>1,2</sup> 伍永学<sup>1</sup> 姜涛<sup>1</sup>

1 北京市气象探测中心,北京 100176

2 中国气象局北京城市气象研究院,北京 100089

**提 要:** 利用 2017 年 9 月至 2018 年 8 月北京 20 个站降水现象仪采集数据与人工平行观测数据,对降水现象仪进行了对比评估。结果表明:降水现象仪的缺测率为 0.01%,空报率为 0.6%,捕获率为 93.5%,漏报率为 27.9%,错报率为 10.0%。从统计结果可知,降水现象仪的缺测率、空报率较低,捕获率较高,体现出设备性能良好的一面,漏报率和错报率偏高,表明设备漏识别和错误识别的情况较多,漏报主要发生在弱降水过程中,错报主要出现在毛毛雨的识别上。设备测量和人工观测降水开始时间一致性较好,终止时间一致性偏差;降水现象仪现存问题:在大雨强时易出现雨滴叠加误识别,在小雨强时识别率会降低,在无降水错误输出降水现象方面缺少质控。

**关键词:** 降水现象仪,雨滴谱,完整性,准确性,一致性,对比评估

**中图分类号:** P414

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.05.015

## Application Evaluation of Precipitation Phenomenon Instrument Observation

DU Chuanyao<sup>1,2</sup> YIN Jiali<sup>1</sup> LI Lin<sup>1,2</sup> WU Yongxue<sup>1</sup> Jiang Tao<sup>1</sup>

1 Beijing Meteorological Observation Center, Beijing 100176

2 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

**Abstract:** In this paper, data acquired by artificial observation and precipitation phenomena observation instruments at 20 observation stations of Beijing from September 2017 to August 2018 are used to compare and assess the precipitation phenomena observation instruments. The results show that the lack of measurement rate of precipitation phenomenon instrument is 0.01%, false prediction rate is 0.6%, the capture rate is 93.5%, the missing report rate is 27.9%, and misreporting rate is 10.0%. From the above statistical parameters, we can see that the lack of measurement rate and false prediction rate of the instruments are low and precipitation phenomena capture rate is high, which shows the good performance of the instruments. The missing report rate and misreporting rate are high, indicating missing and misidentification cases tend to happen frequently. Missing report mainly happens in the process of light precipitation and the misreporting mainly in the process of drizzle identification. The time consistency of distinguishing the beginning of precipitation processes is better, but poor at the ending time. The existing problems of the instruments are that raindrop overlap misidentification is easy to appear during heavy precipitation, and the identification rate is reduced during light precipitation. The quality control process is lacking in the case of wrong outputs of precipitation when no precipitation is seen.

**Key words:** precipitation phenomena meters, raindrop size distribution, integrity, accuracy, consistency, comparative evaluation

\* 国家重点研发计划(2018YFC1506801)资助

2018 年 4 月 29 日收稿; 2019 年 2 月 1 日收修定稿

第一作者:杜传耀,主要从事大气探测和综合观测工作. Email: duchuanyao@126.com

## 引言

自2017年起,北京地区20个国家级气象站已陆续完成降水现象观测仪的安装,率先实现了降水类天气现象的自动化观测。按照业务要求,需要对安装的降水现象仪进行评估,并给出一个综合评估结果,作为降水现象仪可否业务化的科学依据。因此,开展对降水天气现象仪的评估工作,并且对评估工作中发现的问题进行总结,对北京地区以及全国的降水天气现象自动化观测都具有指导性意义。本文之前国内外都开展过类似的评估工作,世界气象组织早在1993年,在加拿大圣约翰和法国特普拉就开始组织了天气现象自动观测对比评估试验(Leroy et al,1998)。2009年中国气象局气象探测中心为了解天气现象仪自动化观测和人工观测的差异,考察国内外天气现象仪研制的水平和状况,在北京市观象台组织了天气现象仪评估(陈冬冬等,2010),本次的评估不仅包括降水现象,还包括雾、霾等视程障碍类现象,布设了包括美国Campbell公司的PWS100、美国OSI公司的OWI-430、英国Biral公司的VPF-370,以及国内凯迈公司的CJY-2C/T等多种设备,进行了为期2个月(8—9月)的数据收集评估,由于季节限制,观测到的现象种类多为雨和毛毛雨两种现象,其他现象比如雪、雨夹雪等没有收集到,没有获取一个完整性的结论。2011年12月至2012年6月,中国气象局气象探测中心在北京市观象台和庐山进行了为期7个月的国产天气现象仪的对比评估试验(杜波等,2014),布设了三个厂家的设备,评估的结果表明,在不同降水强度下,除微弱降水和混合型降水现象外,对降水现象的捕获率可达到70%以上,数据准确率达到90%以上。设备在某些现象的观测上仍存在缺陷,技术尚未成熟,但天气现象仪国产化向前迈进了一步。2014年7月,中国气象局气象探测中心在北京南郊综合大气探测试验基地和长沙试验基地分别组织了雨滴谱降水现象仪的对比评估试验(杜波等,2017),布设了6种型号的设备,评估结果显示,设备在小雨强时,现象的捕获率不低于84%,中大雨强时,捕获率不小于97%;同时对冰雹有较好的捕获率。从此次评估结果看,国内降水现象仪的研发技术有了进一步提升,逐步趋于成熟。本文是对2017年安装在北京20个国家级站的20套降水现象仪进行评估,通过仪器测量数据

和人工平行观测数据的比对,获取降水现象仪测量数据的完整性、准确性、一致性等资料。本次评估在设备和数据获取上都是较为系统和完整的,因此,本文对降水现象仪性能评估的一些参数,分析的仪器测量过程中存在的问题,更具有代表性,并且在一定程度上能够反映近期国内降水现象仪观测的技术水平和发展状况。

## 1 数据资料获取及工作原理

本文使用2017年9月至2018年8月北京20个国家级站点降水现象仪测量数据和人工平行观测数据。数据包括春、夏、秋、冬四季,基本涵盖了各种降水现象(共统计降水过程980场次),统计过程中,基本能够反映出降水现象仪的各项性能指标以及存在的问题,本文给出了一个初步的评估结果,随着数据的积累以及设备的推广,对设备的评估将更加详尽。

降水现象仪如图1,设备安装在每个台站的业务站内,接收和发射南北向安装,且发射在南,接收在北。降水现象仪采样区域中心距地高度 $200 \pm 10$  cm,大小为 $18 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ 。观测原理(程寅等,2017;张晓宇等,2016)是通过发射器发射一束激光,接收器接收到水平激光信号,将其转换为电压信号,如果有降水粒子通过激光束检测区域,接收器接收到的电压信号就会发生变化。根据电压信号变化的大小就可以检测出粒子的等效直径,通过检测粒子



图1 降水现象仪设备图

Fig. 1 Precipitation phenomenon instrument

经过光束的持续时间,计算粒子下降速度。最后通过粒子等效直径和下降速度来识别降水现象。

## 2 仪器测量性能评估

### 2.1 评估参数定义

降水现象仪的性能评估通过完整性、准确性、一致性三组参数(崔讲学等,2011;李肖霞等,2014),完整性指设备分钟数据缺测率的统计计算。计算式:

$$\text{月缺测率}(\%) = (\text{缺测次数} / \text{应观测次数}) \times 100\%$$

准确性包括捕获率、漏报率、空报率、错报率。捕获率是指仪器正确识别该降水现象发生的过程次数( $a$ )占参考标准观测到实际发生该降水现象过程次数( $A$ )的百分比。计算式:

$$\text{捕获率}(\%) = (a/A) \times 100\%$$

漏报率是指参考标准观测到有某种降水现象发生,仪器未能识别该种降水现象的分钟数( $b$ )占实际发生该降水现象分钟数( $B$ )的百分比。计算式:

$$\text{漏报率}(\%) = (b/B) \times 100\%$$

空报率是指参考标准观测为无降水现象发生,仪器识别有该现象发生的分钟数( $c$ )占无降水现象分钟数( $C$ )的百分比。计算式:

$$\text{空报率}(\%) = (c/C) \times 100\%$$

错报率是指参考标准观测到有某种降水现象发生,仪器错误识别该种降水现象的分钟数( $d$ )占实际发生该降水现象分钟数( $D$ )的百分比。计算式:

$$\text{错报率}(\%) = (d/D) \times 100\%$$

一致性是指如果降水现象发生超过 1 min,对降水现象起、止时间相差 15 min 或以内、15 min 以上的现象次数和比例进行统计分析。

### 2.2 评估结果分析

对 2017 年 9 月至 2018 年 8 月北京地区 20 个国家站仪器测量和人工平行观测降水现象数据的对比统计结果见表 1。缺测率、漏报率、空报率都是以分钟数据统计,捕获率是按降水过程统计。缺测率统计已除去人工维护以及软件升级等人为原因,按照业务数据完整性要求,缺测率应 $\leq 2\%$ ,总体统计结果 0.01% 已满足业务要求,从单站统计结果看(图 2),房山、朝阳、怀柔、霞云岭、观象台、石景山、昌平、海淀站都出现了缺测,从具体数据看,这些站出现缺测的原因均是某几个月出现通信不稳定造成的,并不是每个月都有缺测,从 20 个站总体缺测率上看,设备较为稳定,数据完整性基本满足业务要求。

表 1 2017 年 9 月至 2018 年 8 月评估参数统计(单位:%)

Table 1 Statistics of assessment parameters from September 2017 to August 2018 (unit: %)

统计范围	参数					开始/终止时间一致性
	缺测率	捕获率	漏报率	空报率	错报率	
20 个国家站	0.01	93.5	27.9	0.6	10.0	86/71

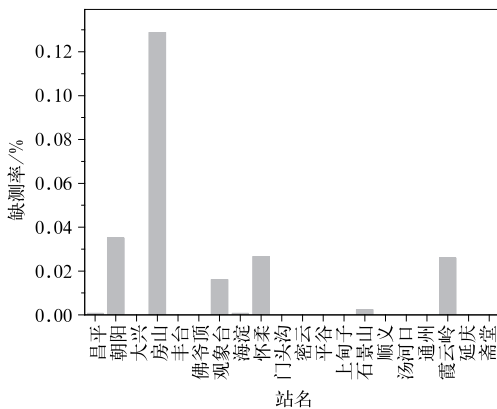


图 2 20 站缺测率

Fig. 2 Statistics of lack of measurement rate at 20 stations

捕获率统计如图 3a 所示,20 个站捕获率均在 85% 以上(图 3a),20 个站中捕获率在 90%~95% 范围的台站比例最大(图 3b),占 55%,反映出了仪器的基本捕获情况分布。出现未捕获的情况一般都出现在降水强度微弱的过程,在这些微弱的降水过程中,存在本身降落到近地面的雨滴粒子密度不大、较为稀疏的情况,或者雨滴粒子等效直径较小不易被捕获的情况,使得降水现象仪捕获的雨滴数量比较少,达不到仪器质控启动输出降水现象的阈值,造成降水现象不能捕获。20 个站整体捕获率为 93.5%,捕获率较高,基本满足业务要求。

漏报率如图 4 所示,20 个站漏报率都在 20% 左右,普遍较大,出现该种情况可能有两方面的原因。

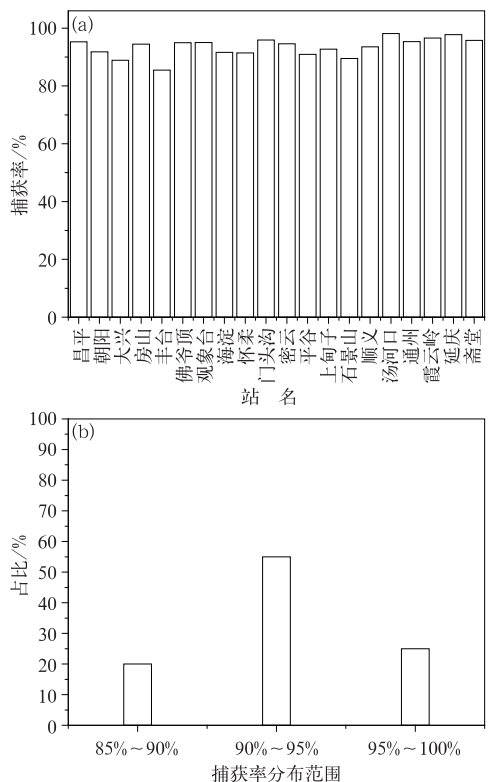


图 3 20 站捕获率(a)和捕获率占比分布(b)

Fig. 3 Statistics of capture rate (a) and capture ratio (b) at 20 stations

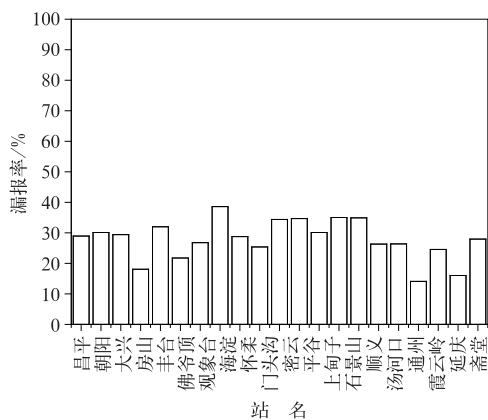


图 4 20 个站漏报率

Fig. 4 Statistical chart of the 20 stations' miss report rates

一是在记录降水过程时,人工无法时刻跟踪降水过程,在实际降水过程出现短暂间歇时,人工记录中并没有去除间歇时间,基本一个过程就是一个到两个起始时间和终止时间,中间全程无间断,这就造成人工记录降水时间比实际偏大,而降水现象仪测量是连续的、实时测量,在一个降水过程的出现间歇时,

立即停止记录。第二个原因:降水现象仪在微弱降水过程中的分钟降水现象捕获率偏低,这也是目前降水现象仪普遍存在的问题(李肖霞等,2012),造成仪器记录的降水时间比实际偏小。人工记录降水时间偏大,降水现象仪记录降水时间偏小,因此造成计算出的漏报率偏大。

空报率主要体现的是在无降水时设备误输出降水现象的情况,统计得到空报率总体值,总体值较低(0.6%),从图 5a 单站统计图可以看出,房山、丰台、密云、门头沟、斋堂、朝阳、延庆空报率较高,其他站都较低。原因:设备扫描频率 100 kHz,是一个相当高的频率,只要有杂物经过基本都能被捕获,由于各站的探测环境不同,有的观测场周边干扰较多,容易引起飘尘,这时引起空报率的机会就会变大。第二是与设备个体差异有关,虽然每个设备出厂前都经过了标定,但每个设备在敏感度上仍存在微小差异。从时间上看(图 5b),这几个站空报率较高的月份集中在 9 和 10 月,其他站也有类似情况,9、10 月秋收季,近地面的蚊虫以及飘尘杂物较多,较容易引起降

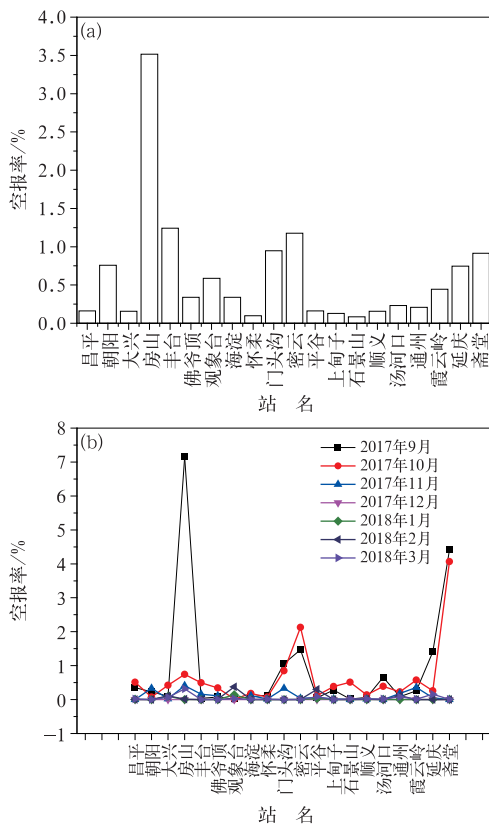


图 5 20 个站空报率(a)和不同月份空报率(b)

Fig. 5 False prediction rate statistics at 20 stations (a) and in different months (b)

水现象的误输出,造成空报。此外,这几个空报率较高的站,在其他月份空报率并不高,这说明其 9、10 月的高空报率还是受周围具体环境的飘尘杂物较多的影响更大。

20 个站错报率总体统计值为 10.0%,该值稍微偏大。从单站统计值(图 6)看,各站错报率也基本在 6%~17%这个范围,都较大。统计中发现,出现错报的原因基本都是设备输出毛毛雨时人工记录为其他现象所致,在降水过程中间或者接近结束变得微弱时,设备测量多输出为毛毛雨,而此时人工判断并没有达到毛毛雨的级别,多判为普通降水,造成设备错报,该问题就是设备测量和人工观测之间存在等级差异,在以往的降水现象仪评估工作中也有类似的发现(陈冬冬等,2010),因此,在观测微降水现象时,设备测量和人工观测需要做一致性调整。

一致性对降水现象仪和人工开始时间和终止时间分别统计。20 个站捕获的 980 次降水过程中,降水开始时间两者相差在 15 min 之内的有 848 次,占比 87%,相差在 15 min 以上的 132 次,占比 13%,降水终止时间相差在 15 min 之内的有 697 次,占比 71%,15 min 以上的 283 次,占比 29%。可见降水过程的起始时间的一致性要比终止时间的一致性要好一些。如图 7 所示,开始/终止时间差为负值代表降水现象仪比人工观测到降水现象起始/终止的时间晚,正值相反。可以看出,差值为负值的较多,也即人工要比降水现象仪提前观测到降水,降水现象仪观测到的降水现象的终止时间却早于人工观测的降水终止时间。究其原因,在降水过程开始时,降水现象仪内部存在一个降水现象输出质控,判断测到的

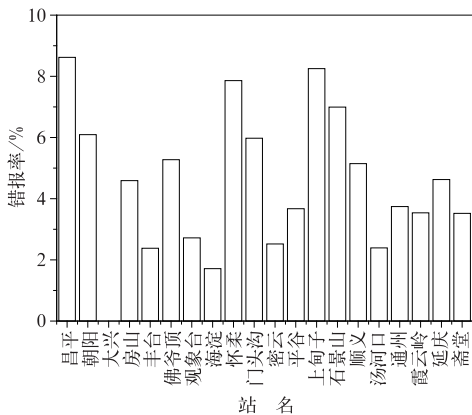


图 6 20 个站错报率

Fig. 6 Misreporting rate statistics at 20 stations

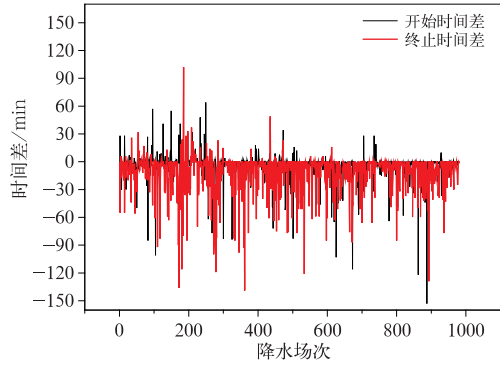


图 7 降水现象仪一致性

Fig. 7 Time consistency rate statistics of precipitation phenomenon instruments

粒子数目和粒子分布,只有达到本身设定的阈值,符合降水谱线规律,才启动输出降水现象,这就造成降水现象仪输出现象时间比实际降水和人工观测降水开始时间都要迟。在降水过程结束时,一般降水强度都较弱,如果降水现象仪测量到的粒子数目小于 5 个(本文设备阈值设为 5,其他可能存在差异),仪器就判为无降水现象,提前结束对本次过程的观测,使得降水现象仪观测到的降水终止时间比实际降水和人工观测降水终止时间都要早。

### 3 降水现象仪测量现存问题总结

#### 3.1 弱降水过程识别率偏低

在降水过程中,降水强度变微弱时,设备本身信噪比会下降,识别率降低(刘俊等,2013;温龙,2016),降水现象仪传感器识别的降水粒子数目低于阈值就会停止输出现象,即使是在连续的降水过程中间。以延庆 2017 年 9 月 21 日 14:02—14:11 降水过程为例,降水现象仪识别的降水粒数与输出现象的对应关系如表 2。降水现象仪在 14:02 识别的雨粒子数大于 15 个时开始输出降水现象雨,14:05 识别粒子数下降到 5 个以下后,停止输出降水现象,输出为无降水,直到 14:11 降水现象仪识别的粒子数再次大于 15,再次启动输出降水现象雨,实际上在 14:05—14:10 这几分钟是有降水的,但由于降水现象仪内部质控算法原因,并没有输出降水现象。这就导致在弱降水过程中识别率偏低,仪器在连续弱降过程中质控算法仍存在需要完善的地方。

表 2 2017 年 9 月 21 日个例粒子数与降水现象输出对应表

Table 2 Correspondence table between the number of particles and precipitation phenomena of the case on 21 September 2017

时间/BT	粒子数目/个	降水现象输出
14:02	20	雨
14:03	5	雨
14:04	6	雨
14:05	3	无降水
14:06	6	无降水
14:07	1	无降水
14:08	5	无降水
14:09	8	无降水
14:10	5	无降水
14:11	45	雨

### 3.2 误输出问题

从 2017 年 9 月数据的统计发现,几乎每个站都存在误输出,误输出即在无降水的情况下,设备输出降水现象的情况。从图 8 中可以看出,房山、怀柔、门头沟、密云、上甸子、顺义、通州、延庆、斋堂等 9 站 9 月出现误输出降水的天数都在 10 d 及以上,比例较高。误输出降水现象多为毛毛雨,其次是雨,时间多为不连续的单分钟输出,在雨滴谱图上看,典型的雨滴谱是呈指数分布的(李洵等,2016;柳臣中等,2015;王可法等,2011;Gunn and Kinzer,1949),如图 9a 所示。误输出降水的雨滴谱属于杂乱无章的非雨型谱分布,以观象台 2018 年 2 月 3 日 14:23 输出的现象为例,此时刻人工观测为无降水现象,取 14:23 前后 5 min 的雨感器降水状态数据、地面相对湿度数据以及降水量数据(表 3),可以看出,相对湿度在 13%~14%,数值较小,且无任何波动,一般在出现降水时,相对湿度会出现一个上升的波动,且在降水过程中相对湿度至少在 30%以上,因此可以判断该分钟不可能出现降水。感雨器是感知降水开始的较为敏感的设备,当有降水时会输出状态“1”,无降水时输出状态“0”,通过此段时间感雨器输出的数据可以看出,也是无降水现象,同时这段时间的降水量也都是 0.0 mm。综合可以判断此时刻是无降水现象的。因此,此时降水现象仪输出得降水现象属于误输出,如图 9b 所示。因此,根据雨滴谱分布有望对误输出降水现象进行质控删除。出现误输出原因:有杂物经过传感器检测区域被误识别。

### 3.3 传感器本身局限性造成的错误识别

降水现象仪在降水强度较大时,会出现错误识别的现象。图 10 是昌平站 2017 年 9 月 10 日 08:08 输出的一张降水滴谱图,图中红色框内,粒子直径和粒子速度都已满足输出冰雹的条件,降水现象仪输出的结果也是冰雹,但实际上此时并没有冰雹。造成这种错误输出的原因是降水现象仪二维传感器的局限性,当传感器检测区域有雨滴叠加时,二维传感器在接收时,无法区分是空间上叠加的,还是雨滴本身就是那么大,这种情况会造成误判。该次误判就

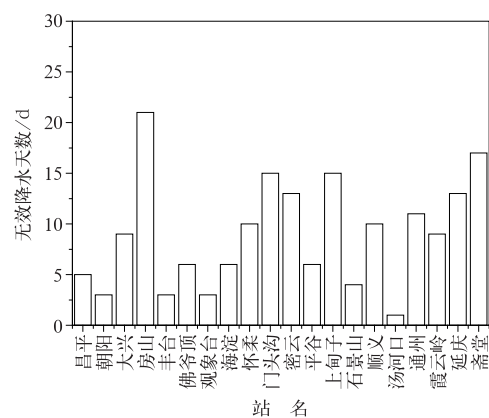


图 8 无效降水天数统计

Fig. 8 Invalid precipitation days

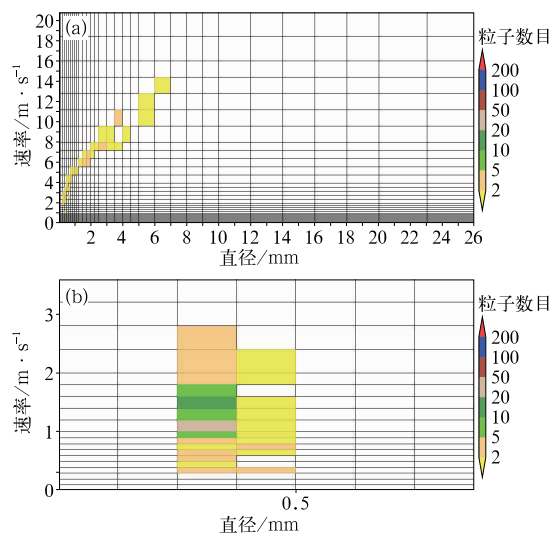


图 9 2018 年 2 月 3 日个例典型降水(a)与非降水(b)粒子谱对比

Fig. 9 Comparison of typical precipitation (a) and non-typical precipitation (b) particle spectra of the case on 3 February 2018

表 3 降水现象判断气象要素对应表  
Table 3 Meteorological element table for precipitation phenomenon judgment

时间/BT	相对湿度/%	雨感器	降水量/mm
2018/2/3 14:18	13	0	0.0
2018/2/3 14:19	13	0	0.0
2018/2/3 14:20	13	0	0.0
2018/2/3 14:21	13	0	0.0
2018/2/3 14:22	13	0	0.0
2018/2/3 14:23	13	0	0.0
2018/2/3 14:24	14	0	0.0
2018/2/3 14:25	13	0	0.0
2018/2/3 14:26	13	0	0.0
2018/2/3 14:27	14	0	0.0
2018/2/3 14:28	14	0	0.0

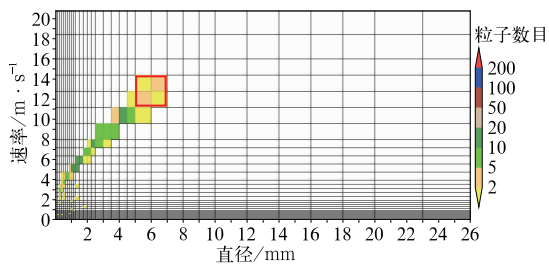


图 10 2017 年 9 月 10 日个例  
降水现象仪误识别图

Fig. 10 Error identification of precipitation phenomenon instrument of the case on 10 September 2017

是因为雨滴叠加,造成粒子直径比实际的大,达到了冰雹的直径阈值,从而输出了冰雹。

## 4 结 论

本文通过对 2017 年 9 月至 2018 年 8 月北京 20 个站降水现象仪采集的 980 场降水数据的分析,从仪器数据完整性、准确性、一致性以及降水现象仪现存问题等方面做了分析,结果表明:

(1) 降水现象仪测量的缺测率、空报率较低,捕获率较高,体现了设备性能良好的方面,同时漏报率和错报率相对偏高,反映出设备仍存在不足,一是设备在降水过程中存在漏识别的情况较多,二是在毛毛雨的判别等级上和人工存在差异,导致错报率偏高。一致性上表现一般,设备质控会影响设备对降水现象开始时间和结束时间的判别。

(2) 降水现象仪硬件设计上,仍存在两个极端问题,在雨强较大时,由于二维传感器的局限性容易

出现雨滴叠加误识别为冰雹的情况;在雨强较小,雨滴细小稀疏时,传感器捕获能力变差。软件设计上,设备为提高现象捕获率,扫描频率设置相对较高,当有干扰杂物经过传感器检测区域时,频繁出现在无降水天气误输出降水现象的情况。因此设备在软硬件上仍需改进。

(3) 降水现象仪质控方法有待改进,主要包括:对降水开始、结束以及降水过程中不同阶段现象输出的启动输出阈值的合理性的改进;对无降水现象误输出降水现象的质控方法的改进;对大雨强降雨滴叠加误识别质控方法的改进。

## 参考文献

- 陈冬冬,魏国栓,马启明,等,2010. 多台国内外先进天气现象仪对比分析[J]. 气象水文海洋仪器,27(4):13-17. Chen D D, Wei G S, Ma Q M, et al. 2010. Comparison of several advanced domestic and overseas present weather instruments[J]. Meteor Hydrol Marine Instru, 27(4):13-17(in Chinese).
- 程寅,刘达新,刘建国,等,2017. 基于光阻原理的降水现象测量系统研制[J]. 大气与环境光科学报,12(4):260-268. Cheng Y, Liu D X, Liu J G, et al. 2017. Development of precipitation measurement system based on light blocking principle[J]. J Atmos Environ Optics, 12(4):260-268(in Chinese).
- 崔讲学,柯怡明,杨志彪,2011. 地面气象观测[M]. 北京:气象出版社. Cui J X, Ke Y M, Yang Z B. 2011. Surface Weather Observation[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 杜波,马舒庆,梁明珠,等,2017. 雨滴谱降水现象仪对比观测试验技术应用分析[J]. 气象科技,45(6):995-1001. Du B, Ma S Q, Liang M Z, et al. 2017. Observational contrast experiment and application of raindrop spectrum precipitation phenomenon instrument[J]. Meteor Sci Technol, 45(6):995-1001(in Chinese).
- 杜波,张雪芬,胡树贞,等,2014. 天气现象仪自动化观测资料对比分析[J]. 气象科技,42(4):617-623. Du B, Zhang X F, Hu S Z, et al. 2014. Automatized observational experiment on several present weather sensors[J]. Meteor Sci Technol, 42(4):617-623(in Chinese).
- 李海,阮征,葛润生,等,2016. 激光雨滴谱仪测速误差对雨滴谱分布的影响[J]. 应用气象学报,27(1):25-34. Li T, Ruan Z, Ge R S, et al. 2016. Impacts of raindrop velocity measurement error on raindrop size distribution estimation from PARSIVEL disdrometer[J]. J Appl Meter Sci, 27(1):25-34(in Chinese).
- 李肖霞,杜波,李翠娜,等,2014. 天气现象自动化观测仪器评估方法[J]. 气象水文海洋仪器,31(4):124-128. Li X X, Du B, Li C N, et al. 2014. Assessment methods for automated present weather observing instruments[J]. Meteor Hydrol Marine Instru, 31(4):124-128(in Chinese).
- 李肖霞,张雪芬,杜波,等,2012. OWI-430 和 PWS-100 型天气现象仪监测降水比对试验研究[C]//2012 年度气象水文海洋仪器学术交流会论文集:100-107. Li X X, Zhang X F, Du B, et al. 2012.

- Experimental study on precipitation comparison of OWI-430 and PWS-100 weather phenomena [C] // Proceedings of the 2012 Meteorological, Hydrological and Marine Instruments Academic Exchange Conference; 100-107 (in Chinese).
- 柳臣中,周筠珺,谷娟,等,2015.成都地区雨滴谱特征[J].应用气象学报,26(1):112-121. Liu C Z, Zhou Y J, Gu J, et al, 2015. Characteristics of raindrop size distribution in Chengdu [J]. J Appl Meteor Sci, 26(1):112-121 (in Chinese).
- 刘俊,马尚昌,杨笔锋,2013.一种激光雨滴谱仪小雨滴检测方法[J].气象科技,41(4):603-607. Liu J, Ma S C, Yang B F, 2013. A method of small raindrop detection in optical disdrometer [J]. Meteor Sci Technol, 41(4):603-607 (in Chinese).
- 王可法,张卉慧,张伟,等,2011. Parsivel 激光雨滴谱仪观测降水中异常数据的判别及处理[J].气象科学,31(6):732-736. Wang K F, Zhang H H, Zhang W, et al, 2011. The detection and elimination of abnormal data for the precipitation observed by Parsivel precipitation particle spectrometer [J]. J Meteor Sci, 31(6):732-736 (in Chinese).
- 温龙,2016.中国东部地区夏季降水雨滴谱特征分析[D].南京:南京大学. Wen L, 2016. Analysis of characteristics of rainfall and rainfall spectrum of summer precipitation in eastern China [D]. Nanjing: Nanjing University (in Chinese).
- 张晓宇,雷勇,王柏林,等,2016. Parsivel 与 LNM 激光雨滴谱仪降水观测的差异[J].气象科技,44(4):548-554. Zhang X Y, Lei Y, Wang B L, et al, 2016. Experiment on precipitation observation differences between parsivel laser raindrop spectrometer and LNM [J]. Meteor Sci Technol, 44(4):548-554 (in Chinese).
- Gunn R, Kinzer G D, 1949. The terminal velocity of fall for water drop-lets in stagnant air [J]. J Meteor, 6(4):243-248.
- Leroy M, 1998. WMO Intercomparison of Present Weather Sensors/ Systems Final Report [R]. WMO/TD-No. 887.