

赵勇,陈立峰. 2 种不同型号降水现象仪观测降水性能的评估分析[J]. 山地气象学报,2024,48(1):108–114.

2 种不同型号降水现象仪观测降水性能的评估分析

赵 勇,陈立峰

(山东省枣庄市气象局,山东 枣庄 277800)

摘 要:【目的】为评估 DSG1 型和 DSG5 型国产降水现象仪在测量降水方面的性能。【方法】挑选鲁南地区降水过程、强度和持续时间较一致且相邻 2 个国家气象观测站不同型号的降水现象仪和自动气象站 2017 年 9 月—2020 年 8 月共 5 a 的降水观测资料,对比分析 2 种不同型号降水现象仪和自动气象站观测降水的差异。【结果】(1)2 种降水现象仪和自动气象站观测的降水时间基本相同,但 DSG1 型和 DSG5 型比自动气象站分别偏多约 2.2%、3.7%;(2)2 种降水现象仪分钟降水量、小时降水量和日降水量都比自动气象站偏小;(3)在中等降水强度及以下,2 种降水现象仪观测的降水量大小基本一致,但降水强度较大时,降水量大小不一致且分散;(4)2 种降水现象仪与自动气象站的分钟、小时和日降水量差值百分比均值变化不同,说明其在测量降水方面性能略有差异。【结论】由于测量原理和时间及空间分辨率不同于自动气象站雨量计,2 种降水现象仪在观测业务中有着良好的表现,对降水开始和结束时刻记录的更早更准确。

关键词:降水现象仪;自动气象站;降水量;差值百分比

中图分类号:P414.9 **文献标识码:**B

Evaluation of the Performance of Two Different Types of Precipitation Phenomenon Meters in Precipitation Observation

ZHAO Yong, CHEN Lifeng

(Zaozhuang Meteorological Office of Shandong Province, Zaozhuang 277800, China)

Abstract: To evaluate the performance of DSG1 and DSG5 precipitation phenomenon meters in measuring precipitation, this article uses the precipitation data collected by two types of precipitation phenomenon meters and automatic weather stations of two adjacent national meteorological observatories in southern Shandong Province from September 2017 to August 2020 because of their consistency in precipitation process features, intensity and duration. The evaluation results are as follows: (1) The precipitation time numbers observed by the two precipitation phenomenon meters and automatic weather stations are basically the same, but the observed precipitation time numbers from the two precipitation phenomenon meters are about 2.2% and 3.7% more than those by automatic weather stations, respectively. (2) The minutely precipitation, hourly precipitation and daily precipitation of these two phenomenon meters are all less than those of automatic weather stations. (3) At moderate precipitation intensity and below, the precipitation amounts measured by the two precipitation phenomenon meters are basically the same, but when the precipitation intensity is larger, their measured precipitation amounts are different and scattered. (4) The variations of the percentage mean values of the difference between the two precipitation phenomenon meters and automatic weather stations in the minutely, hourly and daily precipitation show that the performance of the two precipitation phenomenon meters is slightly different in measuring precipitation. In conclusion, the two precipitation phenomenon meters have shown good performance in observation operations due to their difference from the rain gauges of automatic weather stations in measurement principles and

收稿日期:2023-03-16

第一作者简介:赵勇(1976—),男,高工,主要从事人工影响天气和气象信息网络管理工作,E-mail:761491551@qq.com。

资助项目:山东省气象局面上项目课题(2019sdqxm16);雨滴谱资料在雷达定量降水估测中的应用研究。

spatio-temporal resolutions, and they can record the start and end time of precipitation earlier and more accurately.

Key words: precipitation phenomenon meters; automatic weather station; precipitation amount; percentage of difference

0 引言

降水现象是云微物理过程、云动力学过程以及诸多因素综合作用的结果,对自然环境、社会生活、农业生产和交通运输等影响较大。在气象观测业务中,自动气象站主要使用雨量计对降水进行测量,观测内容包括降水量、降水强度和累计时间等宏观量^[1]。为更好地研究降水微物理过程和形成机制,国内外使用过瑞士 Joss-Waldvogel 雨滴谱仪^[2]、德国 OTT Parsivel 雨滴谱仪^[3]、奥地利二维视频雨滴谱仪^[4]和中国降水微物理特征测量仪^[5]。这些仪器除能够测量降水量等宏观量外,还可以测量降水粒子大小、速度、相态和谱分布等微观量。为检验雨滴谱仪在测量降水方面的性能,先后有多人分别对比了 LNM 型、HSC-PS32 型和 Parsivel 型等激光雨滴谱仪与自动气象站观测降水强度的差异。经过对比,上述激光雨滴谱仪与自动气象站观测降水基本一致,但在不同的降水量级和降水强度范围稍有差别^[6-10]。

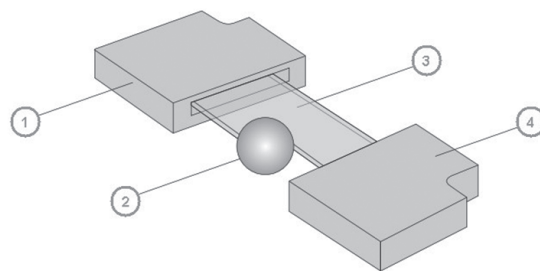
随着我国气象现代化业务体制改革和地面自动化观测业务推进,杜波等^[11-12]从各个方面对多种型号的降水现象仪进行了对比观测试验,结果表明,降水现象仪观测降水现象的数据准确性和各厂家同型号 2 台设备的观测数据一致性都能够满足气象业务需求。目前降水现象仪已在全国气象台站普及应用,为检验其在实际业务中观测降水现象的准确性和可靠性,通过对 DSG1 型、DSG4 型、DSG5 型等降水现象仪观测数据与人工观测数据对比分析得出,上述仪器设备对降水的捕获率较高,记录的降水现象与人工观测基本一致,但记录的降水开始时间和结束时间与人工观测略有不同,需要进行智能识别和质控算法优化^[13-15]。

为评估 DSG1 型和 DSG5 型国产降水现象仪在测量降水方面的性能,本文统计了 2017 年 9 月—2021 年 8 月鲁南地区降水过程、强度和持续时间较一致且相邻 2 个国家气象观测站不同型号降水现象仪和自动气象站的观测降水资料,以自动气象站观测降水量为参照,对比分析 2 种不同型号降水现象仪在测量降水方面的性能,为今后降水现象仪在地面气象观测业务中的应用提供基本参考。

1 仪器与数据

1.1 观测仪器

DSG1 型和 DSG5 型降水现象仪分别是由江苏省无线电科学研究所、华云升达(北京)气象有限公司研制生产的降水现象自动化观测仪器,2 种仪器基于激光衰减原理的降水粒子直径和下落速度检测技术(如图 1),其激光采样面积为 $180\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 。当降水粒子穿越采样空间时,激光接收装置根据接收的激光信号强弱来判断降水粒子的尺度和速度,从而计算降水时间、降水量和尺度谱等参数,进而判断降水天气现象。2 种降水现象仪可观测 32 个尺度通道和 32 个速度通道的降水粒子,粒子尺度范围为 $0.2 \sim 25.0\text{ mm}$,粒子速度范围为 $0.2 \sim 20.0\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,采样间隔时间为 60 s 。



注:①激光发生器;②雨雾粒子;③激光束;④激光接收器。

图 1 降水现象仪工作示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the operation of precipitation phenomenon meters

自动气象站根据不同季节使用翻斗式雨量计或称重式雨量计对降水进行测量。翻斗式雨量计是地面气象观测业务中最常用的测量降水仪器,主要由承水器、上翻斗、汇集漏斗、计量漏斗、计数翻斗和干簧管等组成,可以测量降水强度、累积降水量及持续时间。称重式雨量计采用精密电子秤对降落到承水筒内的降水重量进行自动测量,另外有加热装置来融化雪、雨夹雪或冰雹,可以测量雪、雨夹雪和冰雹等固态降水,通过一定时间内降水重量及其变化来计算降水强度、累积降水量和持续时间。翻斗式雨量计和称重式雨量计的分辨率为 0.1 mm 。

1.2 观测数据

本文挑选鲁南地区降水过程、强度和持续时间

较一致且相邻 2 个国家气象观测站 2017 年 9 月—2020 年 8 月不同型号降水现象仪和自动气象站的观测降水资料,以自动气象站观测降水数据为基准,详细对比分析降水现象仪和自动气象站在分钟

降水量、小时降水量、日降水量的差异。对于小时降水量和日降水量,按照地面气象观测业务规定的降水量级划分标准进行区分(表 1)。

表 1 小时降水量和日降水量划分标准

Tab. 1 Standard for dividing hourly precipitation and daily precipitation

	小雨	中雨	大雨	暴雨及以上
小时降水量/mm	0.1~2.4	2.5~8.0	8.1~16.0	≥16.1
日降水量/mm	0.1~9.9	10.0~24.9	25.0~49.9	≥50.0

降水现象仪生成的数据每日 1 个文件,每分钟 1 条记录,采用定长的随机文件记录方式写入,每条记录 5 124 Byte,包括 32 个尺度范围和 32 个速度范围,记录的雨滴谱数据为 $32 \times 32 = 1\,024$ 个,尺度范围和速度范围分别由小到大编码为 32 个等级。自动气象站的分钟降水量数据为 J 文件,每分钟 1 条记录,采用不定长的随机文件记录方式写入,如未观测到降水则不记录。

1.3 计算方法与数据筛选

由降水现象仪的工作原理得知,单位时间(1 min)内通过激光采样空间的降水粒子体积之和,再除以其面积,即为单位时间的降水量,表达式如下:

$$R_t = \left\{ \frac{\pi}{6} \sum_{i=1}^{32} n(D_i) D_i^3 \right\} / 5400$$

式中, R_t 表示 t 时间(1 min)内的降水量,单位为 mm。 $n(D_i)$ 表示 t 时间(1 min)内通过激光带的某个尺度范围等级(i)降水粒子个数, D_i 表示某个尺度范围等级(i)降水粒子平均直径。

通常情况下,降水粒子的直径和数目与降水量的大小成正比,降水粒子直径越大、数目越多,降水

量就越大。自然降水中很少有超过直径 6 mm 的雨滴^[16],个别超过 6 mm 的降水粒子往往是雨滴合并产生的,因此计算降水量前需剔除直径 >6 mm 的降水粒子。而相同质量的雨夹雪或雪体积(直径)比雨滴要大的多,根据公式,降水现象仪观测的降水量比实际降水量明显偏大,因此本文不对比分析雨夹雪或雪降水过程的数据。

2 分析与结果

2.1 分钟降水量

对 2017 年 9 月—2020 年 8 月鲁南地区 2 个国家气象观测站不同型号降水现象仪和自动气象站的分钟降水量进行对比(如表 2),自动气象站分钟降水量为 0.1 mm 时,DSG1 型和 DSG5 型降水现象仪分钟降水数量分别为 15 169 个、15 212 个,分钟降水量均值分别为 0.089 mm、0.072 mm,平均差值分别为 -0.011 mm、-0.028 mm,差值百分比均值分别为 -10.54%、-27.62%。分钟降水量为 0.2 mm 以上的数据如表 2。

表 2 降水现象仪和自动气象站分钟降水量对比表

Tab. 2 Comparison table of minutely precipitation between precipitation phenomenon meters and automatic weather stations

自动气象站 分钟降水量/mm	降水现象 仪型号	分钟降水量 数量/个	降水现象仪 分钟降水量/mm	平均差值 /mm	差值百分比 均值/%
0.1	DSG1	15 169	0.089	-0.011	-10.54
	DSG5	15 212	0.072	-0.028	-27.62
0.2	DSG1	3 157	0.136	-0.064	-32.01
	DSG5	3 060	0.122	-0.078	-39.08
0.3	DSG1	1 086	0.213	-0.087	-28.92
	DSG5	1 033	0.212	-0.088	-29.12
0.4	DSG1	620	0.302	-0.098	-24.40
	DSG5	609	0.313	-0.087	-21.66
0.5	DSG1	393	0.386	-0.114	-22.79
	DSG5	374	0.420	-0.080	-15.98
0.6	DSG1	288	0.485	-0.115	-19.22
	DSG5	265	0.507	-0.093	-15.42
0.7	DSG1	229	0.567	-0.133	-18.93
	DSG5	143	0.626	-0.074	-10.59

续表 2

自动气象站 分钟降水量/mm	降水现象 仪型号	分钟降水量 数量/个	降水现象仪 分钟降水量/mm	平均差值 /mm	差值百分比 均值/%
0.8	DSG1	172	0.642	-0.158	-19.73
	DSG5	137	0.742	-0.058	-7.23
0.9	DSG1	124	0.764	-0.136	-15.12
	DSG5	109	0.816	-0.084	-9.35
1.0	DSG1	103	0.764	-0.236	-23.63
	DSG5	75	0.970	-0.030	-2.98
1.1	DSG1	83	0.754	-0.346	-31.42
	DSG5	58	1.046	-0.054	-4.90
1.2	DSG1	48	0.916	-0.284	-23.64
	DSG5	43	1.088	-0.112	-9.34
1.3	DSG1	38	0.977	-0.323	-24.81
	DSG5	36	1.234	-0.066	-5.10
1.4	DSG1	36	0.936	-0.464	-33.15
	DSG5	35	1.329	-0.071	-5.07
1.5	DSG1	21	1.065	-0.435	-29.03
	DSG5	13	1.468	-0.032	-2.15
1.6	DSG1	30	1.123	-0.477	-29.83
	DSG5	20	1.532	-0.068	-4.24
1.7	DSG1	14	1.112	-0.588	-34.59
	DSG5	17	1.622	-0.078	-4.59
1.8	DSG1	11	1.415	-0.385	-21.41
	DSG5	14	1.791	-0.009	-0.52
1.9	DSG1	5	1.553	-0.347	-18.25
	DSG5	11	2.208	0.128	6.71
2.0	DSG1	6	1.284	-0.716	-35.77
	DSG5	9	1.896	-0.104	-5.18
2.1	DSG1	5	1.792	-0.308	-14.65
	DSG5	4	1.652	-0.448	-21.33
2.2	DSG1	3	1.845	-0.355	-16.15
	DSG5	3	2.155	-0.045	-2.03
2.3	DSG1	3	1.885	-0.415	-18.06
	DSG5	5	2.303	0.003	0.13
2.4	DSG1	3	1.798	-0.602	-25.10
	DSG5	5	2.600	0.140	5.59
2.6	DSG1	2	1.916	-0.584	-23.36
	DSG5	2	2.606	0.006	0.23
2.7	DSG1	1	1.013	-1.497	-57.58
	DSG5	1	3.395	0.695	25.74
2.8	DSG1	1	1.675	-1.025	-37.96
2.9	DSG5	1	3.270	0.370	12.76
3.0	DSG5	3	2.962	-0.038	-1.27
3.2	DSG1	1	1.171	-2.029	-63.41
3.3	DSG1	1	2.391	-0.909	-27.55
3.4	DSG1	1	2.186	-1.214	-35.71

从降水现象仪和自动气象站分钟降水量对比表(表 2)得知,DSG1 型和 DSG5 型降水现象仪分钟降水量绝大多数比自动气象站偏小;自动气象站分

钟降水量在 0.3 mm 及以下,DSG1 型降水现象仪分钟降水量和与自动气象站差值百分比均值都比 DSG5 型偏大;分钟降水量在 0.3 mm 以上,DSG1 型

降水现象仪分钟降水量和与自动气象站差值百分比均值都比 DSG5 型偏小。

从降水现象仪和自动气象站分钟降水量对比图(图 2)来看,分钟降水量在 0.6 mm 及以下,DSG1 型和 DSG5 型降水现象仪分钟降水量大小基本一致;分钟降水量在 0.6 mm 以上,DSG5 型降水现象仪分钟降水量比 DSG1 型偏大,但也更接近自动气象站分钟降水量。

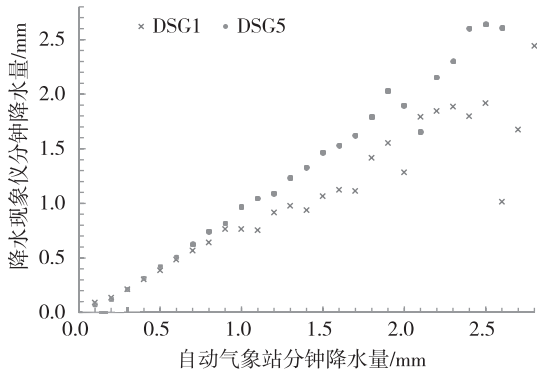


图 2 降水现象仪和自动气象站分钟降水量对比图
Fig. 2 Comparison diagram of minutely precipitation between precipitation phenomenon meters and automatic weather stations

自动气象站观测到降水时,分钟降水时间数量分别为 21 655 个、21 298 个。如表 3 所示,当降水现象仪观测到降水而自动气象站无降水时,DSG1 型和 DSG5 型降水现象仪分钟降水时间数量分别为 485 个、797 个,与自动气象站分钟降水时间数量的比值分别为 2.24%、3.74%,说明 DSG1 型和 DSG5 型降水现象仪观测到降水的时间比自动气象站稍微偏多,但基本相同。

表 3 降水现象仪和自动气象站分钟降水数量对比表			
Tab. 3 Comparison table of minutely precipitation between precipitation phenomenon meters and automatic weather stations			
降水现象仪类型	降水现象仪分钟降水数量/个	自动气象站分钟降水数量/个	百分比值/%
DSG1	486	21 655	2.24
DSG5	797	21 298	3.74

2.2 小时降水量

将鲁南地区 2 个国家气象观测站降水现象仪和自动气象站分钟降水量按照小时时间间隔累计成小时降水量,再按照小时降水量划分标准(表 1)进行对比分析。

表 4 降水现象仪和自动气象站小时降水量对比表						
Tab. 4 Comparison table of hourly precipitation between precipitation phenomenon meters and automatic weather stations						
小时降水量划分标准/mm	降水现象仪型号	自动气象站小时降水数量/个	自动气象站小时降水量均值/mm	降水现象仪小时降水量均值/mm	平均差值/mm	差值百分比均值/%
小雨 (0.1 ~ 2.4)	DSG1	1 653	0.643	0.568	-0.075	-7.95
	DSG5	1 495	0.642	0.447	-0.195	-24.21
中雨 (2.5 ~ 8.0)	DSG1	237	4.432	3.626	-0.806	-17.86
	DSG5	252	4.278	3.209	-1.069	-25.18
大雨 (8.1 ~ 16.0)	DSG1	65	11.580	9.643	-1.937	-16.68
	DSG5	70	11.189	8.849	-2.340	-20.96
暴雨 (≥16.1)	DSG1	47	25.689	20.766	-4.923	-20.85
	DSG5	41	24.802	22.231	-2.571	-12.34

分析降水现象仪和自动气象站小时降水量对比表(表 4)可知,DSG1 型和 DSG5 型降水现象仪小时降水量均值都比自动气象站偏小;小时降水量在大雨强度及以下,DSG1 型降水现象仪小时降水量均值和与自动气象站差值百分比均值都比 DSG5 型偏大;小时降水量在大雨强度以上,DSG1 型降水现象仪小时降水量均值和与自动气象站差值百分比均值都比 DSG5 型偏小。

从降水现象仪和自动气象站小时降水量对比图(图 3)来看,DSG1 型和 DSG5 型降水现象仪小时降水量绝大多数比自动气象站偏小;小时降水量在中雨强度及以下,DSG1 型和 DSG5 型降水现象仪小时降水量大小基本一致;在中雨强度以上,DSG1 型和 DSG5 型降水现象仪小时降水量大小不一致且分散。

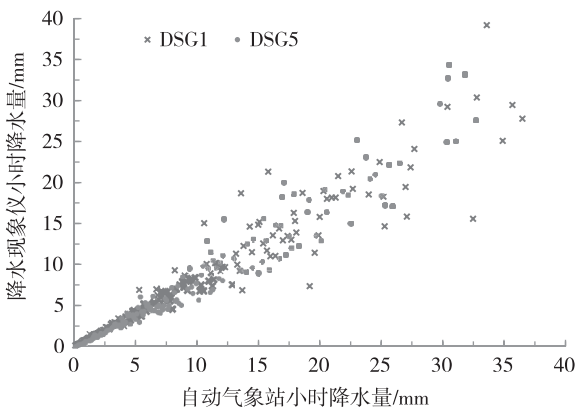


图 3 降水现象仪和自动气象站小时降水量对比图
Fig. 3 Comparison diagram of hourly precipitation between precipitation phenomenon meters and automatic weather stations

2.3 日降水量

将鲁南地区 2 个国家气象观测站降水现象仪和自动气象站分钟降水量按照气象标准日间隔累计成日降水量,再按照日降水量划分标准(表 1)进行对比分析。

分析降水现象仪和自动气象站日降水量对比表(表 5)可知,DSG1 型和 DSG5 型降水现象仪日降

水量均值都比自动气象站偏小;日降水量在小雨强度,DSG1 型降水现象仪日降水量均值比 DSG5 型偏小,但与自动气象站差值百分比均值比 DSG5 型偏大;在中雨强度及以上,DSG1 型降水现象仪日降水量均值和与自动气象站差值百分比均值都比 DSG5 型偏大。

表 5 降水现象仪和自动气象站日降水量对比表

Tab. 5 Comparison table of daily precipitation between precipitation phenomenon meters and automatic weather stations

日降水量 划分标准/mm	降水现象 仪型号	自动气象站日 降水数量/个	自动气象站日 降水量均值/mm	降水现象仪日降 水量均值/mm	平均差 值/mm	差值百分 比均值/%
小雨 (0.1~9.9)	DSG1	210	2.563	2.332	-0.231	10.43
	DSG5	190	2.926	2.394	-0.532	-6.84
中雨 (10.0~24.9)	DSG1	47	16.319	13.214	-3.105	-18.41
	DSG5	41	14.656	11.548	-3.108	-22.10
大雨 (25.0~49.9)	DSG1	25	32.956	29.607	-3.349	-9.54
	DSG5	31	33.907	27.692	-6.215	-18.73
暴雨 (≥50.0)	DSG1	20	95.329	77.213	-18.116	-19.50
	DSG5	18	88.100	68.576	-19.524	-21.00

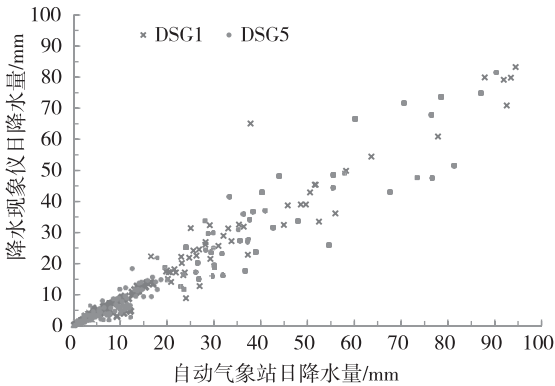


图 4 降水现象仪和自动气象站日降水量对比图

Fig. 4 Comparison diagram of daily precipitation between precipitation phenomenon meters and automatic weather stations

从降水现象仪和自动气象站日降水量对比图(图 4)来看,DSG1 型和 DSG5 型降水现象仪日降水量绝大多数比自动气象站偏小;日降水量在中雨强度及以下,DSG1 型和 DSG5 型降水现象仪日降水量大小基本一致;在中雨强度以上,DSG1 型和 DSG5 型降水现象仪小时降水量大小不一致且分散。

3 结论与讨论

利用 2017 年 9 月—2020 年 8 月鲁南地区降水过程、强度和持续时间较一致且相邻 2 个国家气象观测站不同型号降水现象仪和自动气象站的观测降水资料,详细对比分析了 DSG1 型和 DSG5 型降水现象仪与自动气象站分钟降水量、小时降水量及

日降水量的差异,形成如下结论:

(1)从降水现象仪和自动气象站分钟降水时间数量来看,DSG1 型和 DSG5 型降水现象仪与自动气象站观测的降水时间基本相同,但 DSG1 型和 DSG5 型降水现象仪观测的分钟降水时间数量比自动气象站分别偏多约 2.2%、3.7% 左右。

(2)从降水现象仪和自动气象站观测的降水量来看,DSG1 型和 DSG5 型降水现象仪分钟、小时和日降水量都比自动气象站偏小,这与付志康等^[17]研究得出的结论基本一致;在中等降水强度及以下,DSG1 型和 DSG5 型降水现象仪降水量大小基本一致,但随着降水强度增大,降水量大小不一致且分散。

(3)从降水现象仪和自动气象站降水量差值百分比均值变化来看,DSG1 型与自动气象站分钟和小时降水量差值百分比均值比 DSG5 型先偏大再偏小,而日降水量差值百分比均值比 DSG5 型偏大,说明 2 种降水现象仪在测量降水方面性能略有差异。

(4)DSG1 型和 DSG5 型降水现象仪在地面气象降水观测业务中有着良好的表现,由于设备测量原理不同,降水现象仪相对于自动气象站使用的翻斗式雨量计或称重式雨量计有更高的时间及空间分辨率,对降水开始和结束时刻记录的更早更准确。

本文讨论分析了 DSG1 型和 DSG5 型降水现象仪在测量降水方面的性能,有助于深入了解、认识降水现象仪和自动气象站在测量原理与时间、空间分辨率的不同,特别是不同型号降水现象仪在测量

不同降水强度时性能的差异。但仅使用鲁南地区 2 个国家气象观测站资料存在一定的局限性,今后工作中需要收集不同地区更多观测数据更深入地进行对比验证分析。

参考文献

- [1] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社,2003.
- [2] SARKAR T, DAS S, MAITRA A. Assessment of different raindrop size measuring techniques; Inter - comparison of Doppler radar, impact and optical disdrometer[J]. Atmospheric Research, 2015, 160:15 - 27.
- [3] 余东升,徐青山,徐赤东,等. 雨滴谱测量技术研究进展[J]. 大气与环境光学学报,2011,6(6):403 - 408.
- [4] KREGER A, KRAJEWSKI W F. Two - dimensional video disdrometer;A description [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002,19(5):602 - 617.
- [5] 胡云涛,刘西川,高太长,等. 联合降水微物理特征测量仪、激光雨滴谱仪和雨量计的降水对比观测分析[J]. 气象与减灾研究, 2018,41(2):133 - 139.
- [6] 周黎明,王俊,张洪生,等. 激光雨滴谱仪与自动气象站观测雨量对比分析[J]. 气象科技,2010,38(增刊):113 - 117.
- [7] 贾小芹,郑丽娜,张子涵,等. 激光雨滴谱仪探测降水与自动气象站观测降水的对比分析[J]. 海洋气象学报,2019,39(1):123 - 130.
- [8] 李力,姜有山,蔡凝昊,等. Parsivel 降水粒子谱仪与观测站雨量计的对比分析[J]. 气象,2018,44(3):434 - 441.
- [9] 沙修竹,丁建芳,程博. 地面激光雨滴谱仪反演降水参量的特性探究[J]. 气象,2019,45(11):1569 - 1578.
- [10] 吴宜,刘西川,张军,等. Parsivel 激光雨滴谱仪与雨量计观测降水的一致性分析[J]. 气象科技,2022,48(2):147 - 153.
- [11] 杜波,张雪芬,胡树贞,等. 天气现象仪自动化观测资料对比分析[J]. 气象科技,2014,42(4):617 - 623.
- [12] 杜波,马舒庆,梁明,等. 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,2017,45(6):995 - 1001.
- [13] 杜传耀,尹佳莉,李林,等. 降水现象仪观测应用评估[J]. 气象, 2019,45(5):730 - 737.
- [14] 申高航,高安春,周茂山,等. DSG5 型降水天气现象仪观测数据分析与应用[J]. 气象科技,2021,49(1):40 - 45.
- [15] 周坤论,黄剑钊,陶伟,等. 降水类天气现象自动与人工观测质量对比分析[J]. 气象研究与应用,2022,43(1):112 - 117.
- [16] 王鹏飞,李子华. 微观云物理学[M]. 北京:气象出版社,1989: 406 - 408.
- [17] 付志康,万蓉,肖艳姣,等. 业务 DSG5 型降水现象仪与 Parsivel 降水滴谱仪测量参数对比分析[J]. 暴雨灾害,2022,41(4):434 - 444.