暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

DSG5型和D17型国产降水现象仪测量参量对比分析

陶涛 舒志亮 何佳 巴音那木拉 马思敏 滕微

Comparative analysis of measurement parameters between DSG5 and D17 domestic precipitation phenomenon instruments

TAO Tao，SHU Zhiliang，HE Jia， BAYIN Namula，MA Simin，TENG Wei

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-085

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

业务DSG5型降水现象仪与Parsivel降水滴谱仪测量参数对比分析
Comparison of precipitation measurement by DSG5 and Parsivel present weather instrument
暴雨灾害. 2022, 41(4): 434-444 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.008

短时强降水和持续性强降水的雨滴谱特征对比
Comparative analysis on characteristics of raindrop spectrum of short-term and persistent heavy rain
暴雨灾害. 2023, 42(1): 1-12 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-119

四川盆地秋季一次层状云弱降水过程的微物理特征观测分析
Analysis on the microphysical characteristics of weak precipitation process observation of a stratiform cloud in Sichuan Basin in autumn
暴雨灾害. 2022, 41(4): 445-457 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.009

毫米波云雷达观测和反演云降水微物理及动力参数方法研究进展
Reviews on retrieval methods for microphysical and dynamic parameters with cloud radar
暴雨灾害. 2021, 40(3): 231-242 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.03.002

一次冰雹过程的多源资料观测特征分析
Analysis of the characteristics of a hail event with multi-source data
暴雨灾害. 2024, 43(3): 322-331 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-032

2021年5月武汉两次对流性大风天气的多普勒雷达观测分析
Doppler radar observation and analysis of two convective gale weather events in Wuhan in May 2021
暴雨灾害. 2022, 41(2): 119-129 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.002

关注微信公众号，获得更多资讯信息

陶涛,舒志亮,何佳,等.2025. DSG5 型和 D17 型国产降水现象仪测量参量差异分析[J].暴雨灾害,44(3):380−389. TAO Tao, SHU Zhiliang, HE Jia, et al. 2025. Comparative analysis of measurement parameters between DSG5 and D17 domestic precipitation phenomenon instruments [J]. Torrential Rain and Disasters,44(3):380−389 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−085

DSG5 型和 D17 型国产降水现象仪测量参量对比分析

陶涛[1, 2, 3], 舒志亮[1, 2, 3], 何佳[1, 2], 巴音那木拉[4], 马思敏[1, 2, 3], 滕微[1, 2, 3]

(1. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 银川 750002; 2. 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 银川 750002; 3. 六盘山大气科学宁夏回族自治区野外科学观测研究站, 固原 756000; 4. 内蒙古自治区阿拉善盟气象局, 阿拉善盟 750300)

摘　要: 基于 2022 年 7—10 月宁夏六盘山区泾源县气象局布设的 DSG5 型降水现象仪 (以下简称为 DSG5)、D17 新型降水现象仪 (以下简称为 D17) 和 SL3-1 型翻斗式雨量计 (以下简称为 SL3-1) 记录到的 26 次液态降水过程资料, 了解不同型号降水现象仪性能差异, 进一步验证业务降水现象仪的测量效果。首先, 对 DSG5 和 D17 观测稳定性及缺测情况、4 种质控方法对 DSG5 和 D17 计算降水量的影响进行统计分析; 然后, 研究 D17 在计算降水量上较 DSG5 和 SL3-1 的差异; 最后, 对 DSG5 和 D17 在计算微物理参量上的差异进行比较。结果表明: (1) DSG5 和 D17 缺测率较低, D17 的漏报数低于 DSG5, 但空报数较 DSG5 高; 经滤除下落末速度-直径经验公式±60% 的奇异数据后, 可有效降低 DSG5 和 D17 空报数。(2) 与 SL3-1 相比, DSG5 和 D17 计算的降水量均偏小, 但 D17 计算的累积降水量与 SL3-1 累积降水量的相对偏差更小。(3) DSG5 和 D17 计算的粒子数浓度 (N) 相差超过 3 倍, 但雨强 (R)、质量加权平均直径 (D_m)、液态水含量 (Q) 和雷达反射率因子 (Z) 等微物理参量相差不大。(4) 相对于 D17, DSG5 观测到的大粒径的粒子样本较多, 但N较少, 故 DSG5 的D_m平均值更大, R和Z的平均值更小。(5) DSG5 和 D17 观测到的粒子下落末速度较为接近, 在粒径小于 1.3 mm 的情况下, 与 Atlas 等 (1973) 给出的理论值相差不大, 但随着降水粒子直径的增加, 与理论值的偏差越来越大。

关键词: 六盘山; 降水现象仪; 微物理参量

中图法分类号: P412　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−085

Comparative analysis of measurement parameters between DSG5 and D17 domestic precipitation phenomenon instruments

TAO Tao[1, 2, 3], SHU Zhiliang[1, 2, 3], HE Jia[1, 2], BAYIN Namula[4], MA Simin[1, 2, 3], TENG Wei[1, 2, 3]

(1. *Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions*, *China Meteorological Administration*, *Yinchuan* 750002; 2. *Ningxia Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction*, *Yinchuan* 750002; 3. *Liupan Mountain Atmospheric Science Field Observation and Research Station in Ningxia Hui Autonomous Region*, *Guyuan* 756000; 4. *Alxa League Meteorological Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region*, *Alxa* 750300)

Abstract: Based on 26 liquid precipitation processes data recorded by the DSG5 precipitation phenomenon instruments (hereinafter referred to as DSG5), D17 new type precipitation phenomenon instruments(hereinafter referred to as D17), and SL3-1 tipping bucket rain gauge (hereinafter referred to as SL3-1) located at Jingyuan County Meteorological Bureau in Liupan Mountain Area, Ningxia from July to October 2022. This study aims to understand the differences of these types of precipitation phenomenon instruments and further verify the measurement effectiveness of the operational precipitation phenomenon instruments. Firstly, the observation stability and missing reporting of DSG5 and D17, the impact of four quality control methods on the measurements of precipitation in DSG5 and D17 are studied. Then, the differences between DSG5 and traditional rain gauges in calculating precipitation in D17, as well as the differences in measuring and calculating microphysical parameters between DSG5 and D17 are compared. The results are as follows. (1) The missing

收稿日期: 2024−05−08; **定稿日期**: 2024−08−15

资助项目: 宁夏回族自治区自然科学基金项目 (2023AAC03801); 宁夏回族自治区重点研发计划项目 (2022BEG02010)

第一作者: 陶涛, 主要从事人工影响天气及大气物理研究。E-mail: ala.no.4@163.com

通信作者: 舒志亮, 主要从事人工影响天气及大气物理研究。E-mail: 8633204@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

report rate of both DSG5 and D17 is low. The missing reporting of D17 is lower than DSG5 while the false reporting is highers. However, quality control methods by filtering out the empirical formula of falling velocity diameter singular data (over 60%), the number of false alarms in D17 can be effectively reduced. (2) Compared with the SL3-1 tipping bucket rain gauge, based on precipitation data from July to October 2022, the bias of D17 is less than SL3-1 in accumulated precipitation. (3) Except for particle number concentration (the bias is over 3 times), there is little difference in microphysical parameters inverted by the two instruments, rain intensity (R), quality weighted average diameter (D_m), liquid water content and radar reflectivity factor (Z). (4) Compared to D17, DSG5 observed more samples of particles with larger diameters as well as lower particle concentration. (5) Therefore, on the average, DSG5 had a larger mean value of D_m and a smaller mean value of R and Z. The falling velocities of particles obtained by DSG5 and D17 are relatively close. When the particle diameter is less than 1.3 mm, the falling velocity is close to the theoretical value given by Atlas et al (1973), however, with the increase of particle diameter, the bias gets larger as well.

Key words: Liupan Mountain; precipitation phenomenon instrument; micro-physical parameter

引　言

降水现象和降水参数是研究气候变化、分析天气动力的重要数据, 在数值天气预报、人工影响天气等工作中备受关注。降水参数的准确性对于预测天气、应对自然灾害等方面有着重要意义。长久以来, 国内气象观测站一直使用雨量计对降水进行自动观测, 但雨量计仅能观测降水参数, 对降水现象无法观测。近年来, 国内气象观测设备生产商逐渐生产出基于雨滴谱光学测量技术的不同型号的国产降水现象仪, 实现对降水现象和降水参数的同步观测。为加快推进降水现象仪的业务化进程, 中国气象局从 2009 年开始陆续在北京市、江西省、浙江省和湖南省对不同型号的降水现象仪进行外场观测对比试验 (陈冬冬等, 2011; 张晓宇等, 2016; 陈爱莲和丁妙增, 2017), 取得了一批观测试验结果, 为遴选可供业务应用的降水现象仪提供了参考依据。

2016 年 DSG5 型激光滴谱式降水现象仪 (以下简称为 DSG5) 逐渐在国内气象观测站进行部署, 逐步代替地面人工观测, 对降水现象进行自动观测。秦榕等 (2019) 将新疆 103 个台站 DSG5 自动观测数据和人工观测数据进行对比分析, 获得了该型号降水现象仪主要性能的整体情况, 揭示了降水现象仪降水类型识别能力的个体差异。李山山等 (2023) 利用 DSG5 雨滴谱资料对比分析了一次由西南低涡产生的短时强降水和持续性强降水, 给出了两种类型降水的雷达反射率因子-雨强 (Z-R) 拟合关系式。申高航等 (2024a) 发现翻斗雨量计、称重雨量计测量和 DSG5 计算的过程分钟降水量序列具有较好的一致性, 而利用 DSG5 雨滴谱资料能快速灵敏地探测到降水的起始、结束时间, 更准确地反映降水强度的时间变化, 可为中小尺度天气系统的研究提供精准的降水变化信息。赵勇和陈立峰 (2024) 评估了 DSG1 和 DSG5 型降水现象仪在测量降水方面的性能, 发现两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。强德厚等 (2024) 分析了 2020 年 7 月 23 日拉萨降雹过程的微物理特征, 发现雨量计分钟降水量与 DSG5 接近, 此次过程中雨滴、冰雹的平均谱分布拟合曲线呈单调下降, 雨滴谱符合 Γ 分布, 雹谱符合马歇尔-帕尔默 (M-P) 分布。申高航等 (2024b) 利用 DSG5 分析了一次雨雪转换天气, 发现 DSG5 的判识结果与双偏振多普勒雷达和其他观测资料的分析结果相吻合。这些工作为掌握和了解业务降水现象仪测量性能、提高测量精度、推动实际应用提供了重要的参考依据。

随着国产降水现象仪在业务上的持续应用, 宁夏于 2017 年陆续在全区部署了 DSG5, 并于 2021 年底基于科研目的, 安装了一批国产新型激光滴谱式降水现象仪 (D17 型降水现象仪, 以下简称为 D17)。为了解不同型号降水现象仪测量性能差异, 进一步验证业务降水现象仪的测量效果, 本文统计了 2022 年 7—10 月六盘山区泾源县气象局布设的 DSG5、D17 和 SL3-1 型翻斗式雨量计 (以下简称为 SL3-1) 资料, 首先分析 DSG5 和 D17 观测稳定性及缺测情况, 4 种质控方法对 DSG5 和 D17 计算降水量的影响; 其次研究 D17 在计算降水量上较 DSG5 及传统雨量计上的差异; 最后对 DSG5 和 D17 在测量计算微物理参量上的差异进行比较, 了解 D17 的观测性能, 为国产降水现象仪自动观测降水现象提供技术参考, 以便获取更加科学可信的气象数据。

1 仪器、资料与方法

1.1 观测仪器介绍与资料来源

本文选取的 DSG5、D17 和 SL3-1, 位于六盘山大气科学宁夏回族自治区野外科学观测研究站“3 辅助”站点之一的泾源县气象观测站 (106.32°E, 35.5°N, 海拔高度 1 949 m), 其中 DSG5 和 SL3-1 分别布设在常规气象观测场西北角和东部区域 (直线距离 18 m), D17 布设在常规气象观测场西北方向直线距离约 30 m

的人影特种设备观测场内，两种降水现象仪的直线距离约 40 m (图 1)。

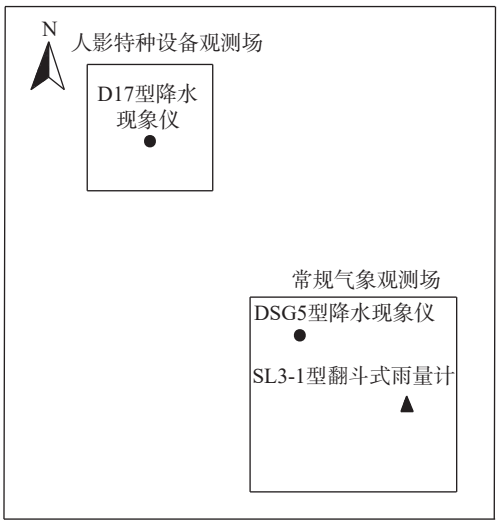


图 1 DSG5、D17 和 SL3-1 观测设备布局示意图

Fig. 1 Sketch map of the layout of DSG5, D17 and SL3-1 observation equipment

DSG5 的核心部件与德国 OTT 公司生产的 Parsivel 激光雨滴谱仪类似，为减少降水粒子破碎对观测的影响，DSG5 在其顶部配有防溅罩。当仪器工作时，降水粒子穿过水平激光束，由粒径遮挡导致接收电压下降及其遮挡光束时间，从而得到降水粒子的粒径大小和下落速度，其直径和速度分级与 Parsivel 的分级标准相同 (付志康等, 2022)。每日生成一个原始文件，每分钟记录一条原始数据，有 32 个尺度通道和 32 个速度通道，其中粒径测量范围为 0.2~25 mm，速度测量范围为 0.2~20 m·s^{-1}。D17 同样是以激光技术为基础的光学测量系统，其工作原理与 DSG5 基本相同，具体参数与 DSG5 基本一致。

SL3-1 是目前我国气象观测业务中主要采用的测雨仪器之一，可以测量降水强度、累积降水量及持续时间，其最小可测累积降水量为 0.1 mm。

考虑到 SL3-1 具有较高的测量精度且长期在业务上应用，本文以同期 SL3-1 观测数据为基准，对比分析 DSG5 和 D17 在计算降水量上的差异。DSG5 在业务上应用时间较长，且目前在国内广泛使用，很多学者已对其优缺点进行了充分分析，所以在研究微物理参量时，以同期 DSG5 粒子谱数据为基础，对比分析 D17 在粒子谱数据上与之的差异。

1.2 研究方法

1.2.1 数据质量控制方法

在进行微物理参量计算前，首先对 DSG5 和 D17 雨滴谱资料进行数据质量控制。考虑到潜在的非降水样本，首先剔除雨强 (R) <0.1 mm·h^{-1} 或 32 个尺度通道和 32 个速度通道观测范围记录的粒子数小于 10 个的分钟样本数据 (Kruger et al., 2002; Wen et al., 2016; Angulo-Martínez et al., 2018)，记为方法 1；由于第 1、2 两个尺度通道 (0.05~0.25 mm) 的雨滴直径很小，很容易受到湍流的影响，信噪比较低不可用 (Tokay at al., 2010)，所以剔除前两个尺度通道的数据，记为方法 2；且自然降水中基本不存在超过 8 mm 的雨滴，所以剔除雨滴直径超过 8 mm 的数据，记为方法 3；此外，由于雨滴的重叠导致仪器的误判或者飞溅效应的影响，降水现象仪输出的部分小粒子的速度会大于大粒子的速度，故本文根据粒子下落末速度-直径经验公式 (Atlas et al., 1973)，滤除超过该经验公式±60% 的奇异数据，记为方法 4。

1.2.2 微物理参量计算

由于 DSG5 和 D17 两种降水现象仪的直线距离约 40 m，且处于同一水平面，海拔高度对降水粒子下落末速度的影响一致，因此本文未考虑海拔高度对于降水粒子下落末速度的影响。经过上述四种质控方法后，得到测量值D_i和V_j，D_i表示第 i 个尺度通道粒子的中位直径 (单位: mm)；V_j表示第 j 个速度通道粒子的下落末速度 (单位: m·s^{-1})。单位体积、单位尺度间隔的雨滴谱数浓度$N(D_i)$ (单位: m^{-3}·mm^{-1}) 的计算公式为

$$N(D_i)=\sum_{i=3}^{32}\sum_{j=1}^{32}\frac{n_{ij}}{A\cdot\Delta t\cdot V_j\cdot\Delta D_i} \tag{1}$$

其中，n_{ij}表示为第 i 个尺度通道和第 j 个速度通道的粒子个数；A 和Δt分别为采样面积 (54 cm^2) 和时间间隔 60 s；ΔD_i表示为第 i 个尺度通道的宽度 (mm)。粒子数浓度 (N) (单位: m^{-3})、雨强 (mm·h^{-1})、质量加权平均直径(D_m) (单位: mm)，广义截距参数(N_w) (单位: mm^{-1}·m^{-3})、液态水含量 (Q) (单位: g·m^{-3})、D_m标准差 (σ_M) (单位: mm)、雷达反射率因子 (Z) (单位: dBz)、雷达等效反射率因子 (Z_e) (单位: mm^{-6}·m^{-3}) 等降水微物理参量参考马思敏等 (2023) 文献中的公式计算。

2 结果与分析

传统雨量计对于降水量的测量结果已经得到气象部门的业务准入并广泛使用。通过对比降水现象仪计算的降水量与雨量计测量的降水量的一致性，可在一定程度上反映出降水现象仪测量结果是否科学可信。因此，首先将 DSG5 和 D17 计算得到的降水量与 SL3-1 测得的降水量分别进行对比分析，然后进一步对 DSG5 和 D17 测量计算的微物理参量进行对比分析，了解 D17 在观测性能上与业务化 DSG5 的差异。

2.1 DSG5 和 D17 对小时降水量的空报、漏报对比

在进行降水量对比分析前, 首先排除由于降水现象仪缺测和数据质量控制导致的降水量差异, 因此对 DSG5 和 D17 数据缺测率和数据质量控制方法进行探讨。对比观测期内的分钟数和两种降水现象仪实际观测分钟数, 并计算总缺测率。总缺测率=(1−实际观测分钟数/观测期内的分钟数)×100%, 计算得到 DSG5 总缺测率为 0.6%, D17 总缺测率为 1.2%。两种设备缺测率较低, 满足数据分析的需要。四种质控方法对于累积降水量的影响如图 2 所示, 方法 1 和方法 2 对于累积降水量没有影响, 方法 3 对于两种设备累积降水量的影响在 5% 左右, 方法 4 对累积降水量影响最大, 对 DSG5 和 D17 的影响分别为 15.69% 和 10.01%。

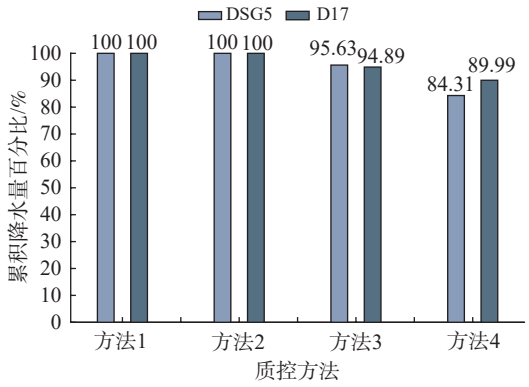


图 2 不同质控方法对 2022 年 7—10 月宁夏泾源县 DSG5 和 D17 计算累积降水量的影响占比

Fig. 2 Influence proportion of different quality control methods on inverting accumulated precipitation by DSG5 and D17 in Jingyuan, Ningxia from July to October in 2022

将 SL3-1、DSG5 和 D17 观测资料时间统一为北京时, 并分别计算小时降水量。在整个统计期内, SL3-1 共观测到 343 h 的降水样本, 降水类型按照贾小芹等 (2019) 关于降水量级划分标准进行划分 (表 1), 其中小雨样本 319 h, 中雨样本 20 h, 大雨样本 4 h。将降水现象仪关于降水量的漏报定义为: 雨量计观测到 0.1 mm 及以上的小时降水量, 但降水现象仪计算出该小时的降水量未达到 0.1 mm 及以上的情况。将降水现象仪关于降水量的空报定义为: 雨量计观测到 0.0 mm 的小时降水量, 但降水现象仪计算出该小时的小时降水量达到 0.1 mm 及以上的情况。由表 1 可见, 与 SL3-1 对比, DSG5 和 D17 在计算降水量时均存在不同程度的漏报和空报现象, 整体来看, D17 在漏报上较 DSG5 为优, 但空报数较 DSG5 高, 且 DSG5 和 D17 仅在小雨条件下出现漏报现象, 由于 DSG5 漏报情况更为严重, 一定程度上降低了其在计算降水上的优势。进一步分析发现,

表 1 2022 年 7—10 月宁夏泾源县 DSG5、D17 对比 SL3-1 在不同降水量级下漏报和空报数

Table 1 Statistical table of misreporting and empty reporting of different precipitation magnitudes measured by DSG5, D17 and SL3-1 in Jingyuan, Ningxia from July to October in 2022

降水量级/(mm·h^{-1})	SL3-1	DSG5		D17	
	样本数量/个	漏报数/个	空报数/个	漏报数/个	空报数/个
小雨 [0.1, 2.5)	319	157	5	105	14
中雨 [2.5, 8.0)	20	0	0	0	0
大雨 [8.0, 16.0)	4	0	0	0	0

DSG5 有 41.9% 的漏报出现在针对小时降水量为 0.1 mm 的降水上, 针对小时降水量为 0.2 mm 和 0.3 mm 降水的漏报分别为 16.1% 和 16.8%, 漏报的最大小时降水量为 1.3 mm。D17 有 55.2% 的漏报出现在针对小时降水量为 0.1 mm 的降水上, 针对小时降水量为 0.2 mm 和 0.3 mm 的漏报分别为 16.2% 和 14.3%, 漏报的最大小时降水量为 0.8 mm。

针对漏报情况, 进一步分析原始资料, 发现 DSG5 和 D17 在漏报时段不同程度观测到了一些降水粒子, 但计算出的 R 都偏低, 这与两种降水现象仪在计算降水时的系统性偏低有关 (刘平等, 2020; 付志康等, 2022)。针对空报现象, 定义两种情况进行讨论: 一种是突发性空报, 即空报小时降水是突发性的, 上一时次和下一时次均无降水记录; 另一种是连续性空报, 即空报小时降水具有连续性, 上一时次或下一时次有连续降水记录。分别统计这两种空报情况, DSG5 突发性空报和连续性空报分别占比为 10.3% 和 89.7%, D17 突发性空报和连续性空报分别占比为 14.3% 和 85.7%。数据质控后, 发现方法 1、方法 2 对两种空报现象基本没有影响, 方法 3 影响较少, 方法 4 能够滤去 90% 以上的空报现象。

综上, DSG5 和 D17 的缺测率较低, 满足数据分析的需要。方法 1 和方法 2 对 DSG5 和 D17 计算的累积降水量没有影响, 方法 3 对于 DSG5 和 D17 计算的累积降水量的影响在 5% 左右, 方法 4 对于 DSG5 和 D17 的影响分别为 15.69% 和 10.01%。D17 在漏报上较 DSG5 为优, 但空报数较 DSG5 高, 且 DSG5 和 D17 仅在小雨条件下出现漏报现象。方法 1、方法 2 对于两种空报现象基本没有影响, 方法 3 影响较少, 方法 4 能够滤去 90% 以上的空报现象。

2.2 降水参数对比分析

进一步对 SL3-1、DSG5 和 D17 测量计算的结果进行对比分析, 从小时降水量随时间的变化 (图 3a) 来看, DSG5 和 D17 在计算降水量上较 SL3-1 明显偏

小, 其中 SL3-1 记录的降水时间为 343 h, DSG5 记录的降水时间为 186 h, D17 记录的降水时间为 238 h。从累积降水量随时间的变化 (图 3b) 来看, SL3-1 测量的累积降水量为 284.8 mm, DSG5 计算的累积降水量为 113.9 mm, D17 计算的累积降水量为 132.2 mm, D17 较 DSG5 在计算累积降水量上较好, 更加接近 SL3-1。

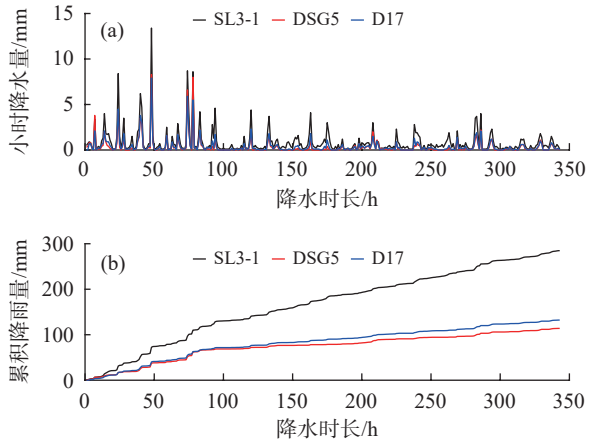


图 3 2022 年 7—10 月宁夏泾源县 SL3-1 和 DSG5、D17 测得的小时降水量 (a) 和累积降水量 (b) 随降水时长的变化曲线

Fig. 3 Temporal variational of (a) hourly precipitation and (b) cumulative precipitation measured by SL3-1 and DSG5, D17 in Jingyuan, Ningxia from July to October in 2022

表 2 给出了 SL3-1、DSG5 和 D17 的平均降水强度和相对偏差。其中, 相对偏差(%)的计算方法为: 首先用降水现象仪测得的平均降水强度减去雨量计测得的平均降水强度, 然后将该差值除以雨量计的平均降水强度, 最后将结果以百分比形式表示。由表 2 可见, 在小雨量级下, DSG5 和 D17 分别低估 −66.04% 和 −58.49%; 在中雨量级下, 分别低估 −53.99% 和−48.40%; 对于大雨的低估情况最好, 分别为−30.47% 和−39.16%。

表 2 2022 年 7—10 月宁夏泾源县 DSG5、D17 与 SL3-1 在不同降水量级下平均降水强度和 DSG5、D17 较 SL3-1 的平均降水强度相对偏差统计

Table 2 Precipitation intensity under different precipitation magnitudes , and the bias of mean precipitation measured by DSG5,D17 and SL3-1 in Jingyuan, Ningxia from July to October in 2022

降水量级/(mm·h^{-1})	SL3-1	DSG5		D17	
	平均降水强度/(mm·h^{-1})	平均降水强度/(mm·h^{-1})	相对偏差/%	平均降水强度/(mm·h^{-1})	相对偏差/%
小雨 [0.1, 2.5)	0.53	0.18	−66.04	0.22	−58.49
中雨 [2.5, 8.0)	3.76	1.73	−53.99	1.94	−48.40
大雨 [8.0, 16.0)	9.78	6.80	−30.47	5.95	−39.16

综上, SL3-1、DSG5 和 D17 计算的降雨强度和累积降水量的变化曲线基本一致, 但是 DSG5 和 D17 在计算累积降水量上较 SL3-1 明显偏小, 均呈现出对于降水量的系统性低估, 这与国内一些科研人员的成果相一致 (胡沁等, 2019; 李艳玉, 2020)。在小雨和中雨量级下, D17 较 DSG5 计算的平均降水强度与 SL3-1 对比, 相对偏差更小; 在大雨量级下, D17 较 DSG5 计算平均降水强度与 SL3-1 对比, 相对偏差更大; D17 较 DSG5 在计算累积降水量上较好, 更加接近 SL3-1。

2.3 微物理参量对比分析

首先对 DSG5 和 D17 各微物理参量平均数进行对比分析, 在此基础上, 进一步比较 DSG5 和 D17 各微物理参量之间的变化关系, 以期得到 DSG5 和 D17 在计算各微物理参量上的差异。将上述与 SL3-1 降水数据匹配的 DSG5 和 D17 的降水数据进一步进行匹配处理, 挑选出 DSG5 和 D17 互相匹配的 8 044 个分钟降水样本, 计算各微物理参量并求平均 (表 3), 可见 D17 的 N是 DSG5 的 3.4 倍, 其 D_m较 DSG5 低 0.14 mm, 而由 DSG5 和 D17 D_m计算出的标准差σ_M相差 0.05 mm。总体上, DSG5 观测的粒子数相对较少, 粒子直径相对较大, 两设备计算的D_m的谱宽基本相同。DSG5 平均R为 0.81 mm·h^{-1}, 略低于 D17; 其计算的Q较 D17 低 0.01 g·m^{-3}, DSG5 计算得出的归一化阶矩参数 ($\log_{10}N_w$) 较 D17 偏低的比率最大, 为 17.5%; 其计算的Z较 D17 结果偏小 1.51 dBz。可见, DSG5 观测到的降水粒子平均尺寸略大于 D17, 但是N明显比 D17 偏低, 导致 DSG5 的Z低于 D17 的计算结果。除N外, 其他各项微物理参量 DSG5 和 D17 计算结果差别较小。

表 3 2022 年 7—10 月宁夏泾源县 DSG5 和 D17 基于分钟降水样本计算的雨滴数浓度 (N)、雨强 (R)、质量加权平均直径 (D_m)、归一化阶矩参数 ($\log_{10}N_w$)、液态含水量 (Q)、D_m标准差 (σ_M) 和雷达反射率因子 (Z) 平均数对比

Table 3 Comparison of raindrop number concentration (N), rain intensity (R), mass weighted average diameter (D_m), normalized moment parameter ($\log_{10}N_w$), liquid water content (Q), standard deviation(σ_M) of D_m, and average radar reflectivity factor (Z) measured by DSG5 and D17 in Jingyuan, Ningxia from July to October in 2022

仪器型号	降水样本	N/m^{-3}	R/(mm·h^{-1})	D_m/mm	$\log_{10}N_w$/(mm^{-1}·m^{-3})	Q/(g·m^{-3})	σ_M/mm	Z/dBz
DSG5	8 044	73.83	0.81	1.02	7.18	0.04	0.39	14.37
D17	8 044	250.07	0.95	0.88	8.44	0.05	0.34	15.88

进一步比较 DSG5 和 D17 微物理参量差异, 图 4 给出 DSG5 和 D17 D_m、$\log_{10}N_w$、Q及Z的概率密度

(PDF) 和累积概率密度 (CDF), 可见 DSG5 和 D17 D_m的 PDF 分布形态基本相似, DSG5 的D_m最大值分布在 0.8~1.0 mm, 而 D17 的D_m最大值分布在 0.6~0.8 mm, 且 DSG5 在 D_m>0.8 mm 时, 均比 D17 的 PDF 要大, 说明 DSG5 计算得到D_m>0.8 mm 的粒子的概率较 D17 更大。除 0.2~0.4 mm 的粒子区间范围外, 同一个粒子区间内 D17 计算得到的D_m的 CDF 均较 DSG5 偏大, 偏差最大出现在 0.6~0.8 mm 的粒子区间范围内, 相差达 0.16, D17 观测到的小粒子直径的比例较高 (图 4a)。而 DSG5的$\log_{10}N_w$分布整体较 D17 偏向左侧, 与D_m的 PDF 分布形态相反, DSG5 的峰值出现在 6.4~6.6 $mm^{-1}\cdot m^{-3}$ 的区间, D17 的峰值出现在 7.8~8.0 $mm^{-1}\cdot m^{-3}$ 的区间, 说明 DSG5 计算得到的N整体较 D17 较少。综合D_m和$\log_{10}N_w$的 PDF 分布来看, DSG5 观测到的大粒径的粒子样本较多, 但是N较少, 故在平均值上 DSG5 的D_m平均值更大 (图 4b)。DSG5 计算得到的Q<0.02 $g\cdot m^{-3}$ 的样本比例明显大于 D17 的计算结果, 但是在Q>0.02 $g\cdot m^{-3}$ 的样本比例均较 D17 小, 故 D17 的平均Q值更大 (图 4c)。从Z的 PDF 及 CDF 分布来看 (图 4d), DSG5 在 0~10 dBz 的范围内回波所占比例较 D17 高, 但 D17 在 10~20 dBz 的范围内回波所占比例较 DSG5 要高, 在其他回波范围内, 两者相差不大, 导致Z的 CDF 最为接近。整体来看, DSG5 虽然计算的N要小得多, 但是其计算的D_m相对于 D17 偏大, 导致两种设备计算的 Z 的 PDF 和 CDF 均较为接近。

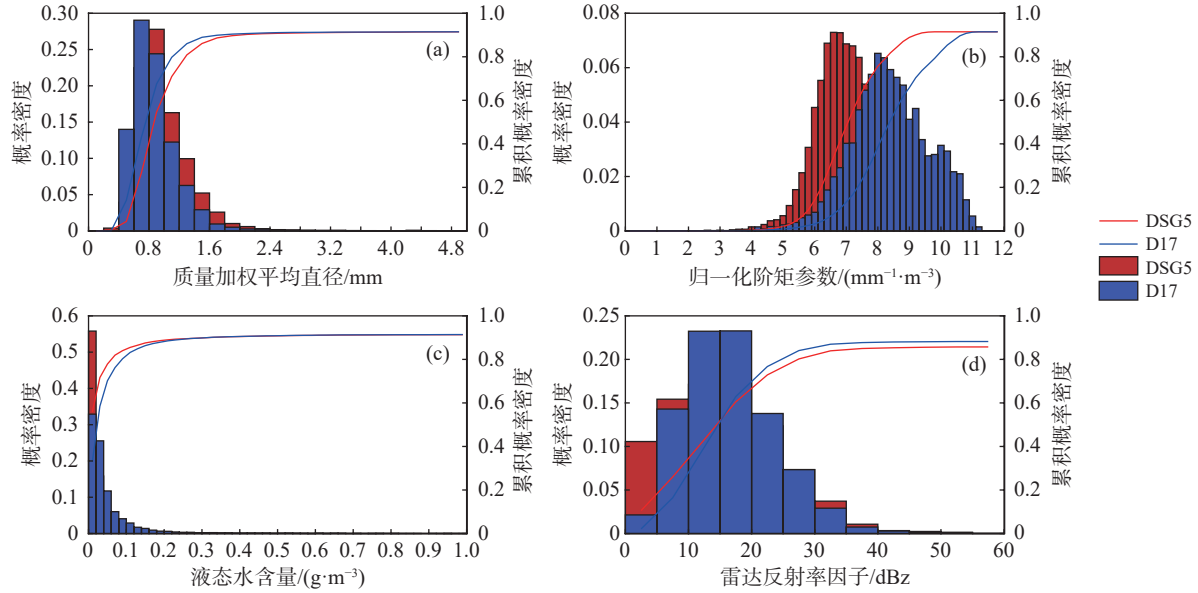


图 4 2022 年 7—10 月宁夏泾源县 DSG5 和 D17 计算的质量加权平均直径 (D_m) (a)、归一化阶矩参数 ($\log_{10}N_w$) (b)、液态水含量 (Q) (c)、雷达反射率因子 (Z) (d) 概率密度(PDF, 柱状) 和累积概率密度 (CDF, 折线) 分布图

Fig. 4 Distribution of probability density functions (PDF, bar chart) and cumulative probability density functions (CDF, line) of microphysical quantities in (a) D_m, (b) $\log_{10}N_w$, (c) Q, (d) Zmeasured by DSG5 and D17 in Jingyuan, Ningxia from July to October in 2022

8 044 个分钟降水样本包括不同 R 的降水, 分析 DSG5 和 D17 计算D_m和N_w随 R 变化关系 (图 5), 可见 DSG5 和 D17 计算的D_m的变化趋势基本一致, D_m在 0.3~2.0 mm 的粒子对 R<10 $mm\cdot h^{-1}$ 降水的贡献最大, 两者都随着 R 的增大而增大, DSG5 的拟合曲线始终位于 D17 的上方, 同等 R 下 DSG5 的计算D_m总体大于 D17 的计算 (图 5a); 在 R<10 $mm\cdot h^{-1}$ 的情况下, D17 的N_w较 DSG5 明显偏大, 且两者分布范围基本相同, 在同等 R 的情况下 D17 的计算N_w总体大于 DSG5 的计算, 说明 D17 计算得到的N与 DSG5 的差距较两者观测到的粒子直径的差距更大。

综上, 对于 R<10 $mm\cdot h^{-1}$ 的降水, R 的增大主要是由于N的增长, 对于 R>10 $mm\cdot h^{-1}$ 的降水, R 的增大主要是由于粒子平均尺寸的增大。而 D17 平均 R较 DSG5 更大的原因, 是 D17 与 DSG5 计算的N的差值较两者直径的差值更大所造成。

进一步将降水样本进行细分, 按照 0.1≤R<5.0 $mm\cdot h^{-1}$、5.0≤R<10.0 $mm\cdot h^{-1}$、10.0≤R<15.0 $mm\cdot h^{-1}$、15.0≤R<20.0 $mm\cdot h^{-1}$、R≥20.0 $mm\cdot h^{-1}$ 及不区分 R 的降水等级将 8 044 个分钟降水样本进行平均滴谱分布计算 (图 6), 可见随着 R 的增大, 计算得到直径大于 3 mm 的N变大。对于 0.1≤R<5.0 $mm\cdot h^{-1}$ 降水, DSG5 和 D17 的滴谱基本一致 (图 6a)。对于 5.0≤R<15.0 $mm\cdot h^{-1}$ 降水, 直径 0.5 mm 以下部分的小粒子, D17 计算 N高于 DSG5 计算的 N, 对于直径 [0.5~1.3) mm 区间粒子 DSG5 和 D17 计算N基本一

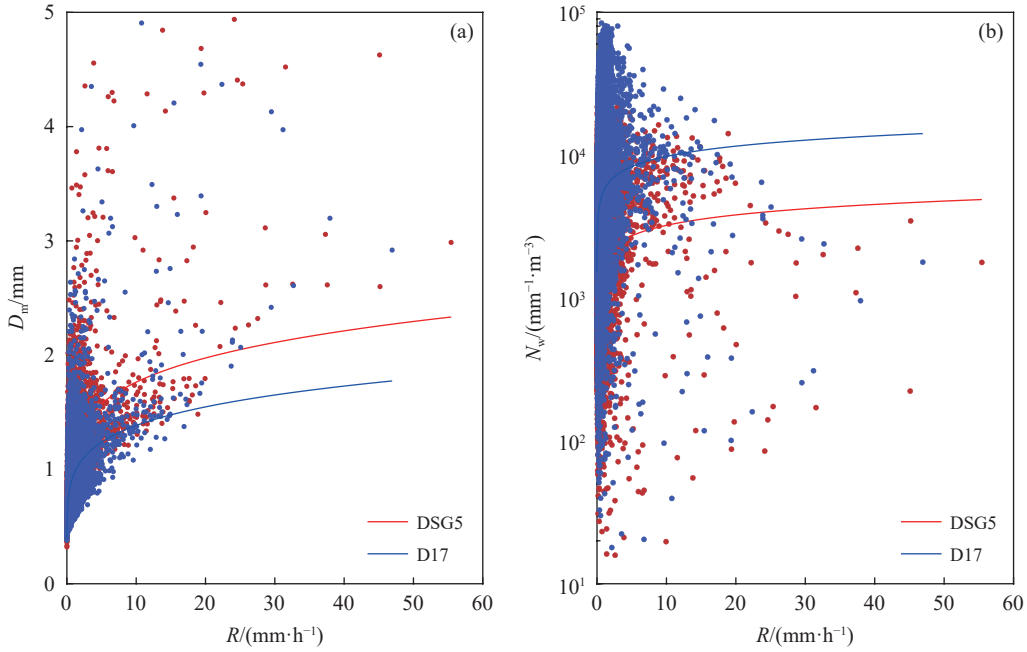


图 5 2022 年 7—10 月宁夏泾源县 DSG5 和 D17 质量加权平均直径(D_m) (a) 及广义截距参数 (N_w) (b) 随雨强 (R) 变化关系

Fig. 5 Relationship between the (a) D_m, (b) N_w and (c) R of DSG5 and D17 in Jingyuan County, Ningxia from July to October 2022

致, 对于直径大于 1.3 mm 的粒子, D17 计算N高于 DSG5 (图 6b—c)。在 15.0≤R<20.0 mm·h^{-1} 的情况下, DSG5 对于直径小于 4 mm 的降水粒子的N计算高于 D17, 对于直径大于 4 mm 的降水粒子的N存在部分计算低于或高于 D17 的情况; 当 R≥20.0 mm·h^{-1}, DSG5 计算的N均大于 D17, 这也是 DSG5 D_m高于 D17 的原因。对于整体样本, D17 计算得到直径小于 (大于) 1.2 mm 粒子的N比 DSG5 的更多 (少), 这种差异导致 DSG5 和 D17 计算的Z相差大约 1.51 dBz (表 3), 这比付志康等 (2022) 比较 DSG5 和 Parsivel 计算得出的 Z 相差 2.7 dBz 的结论低一半左右, 比 Tokay 等 (2014) 比较 Parsivel 一代与二代设备计算得出的 Z 相差 3.4 dBz 的结论偏少一倍以上, 说明 DSG5 和 D17 在计算微物理参量时的精度相差不大。

Z_e和R之间的幂律关系 ($Z_e = a \cdot R^b$) 是单偏振雷

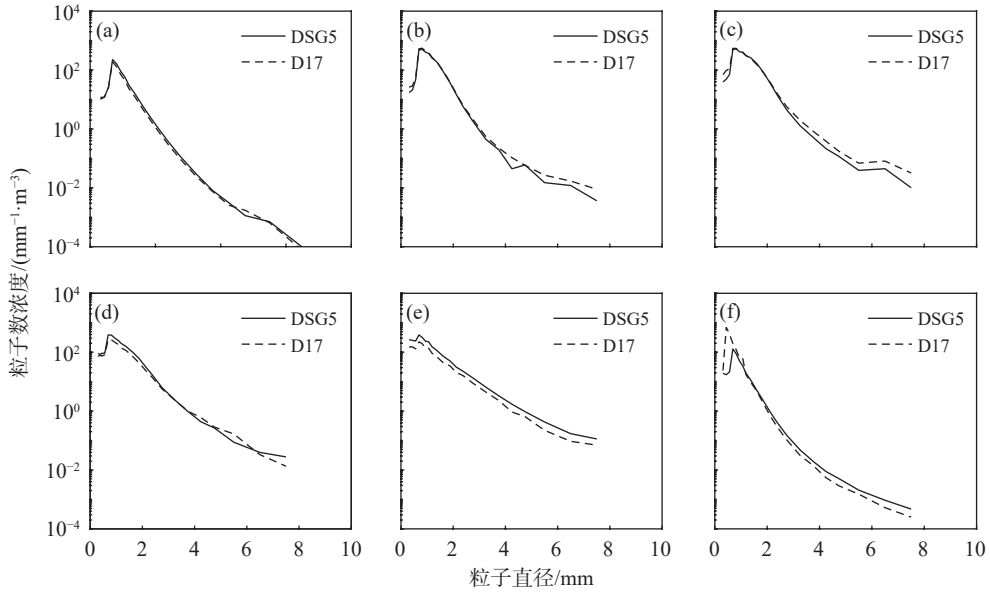


图 6 2022 年 7—10 月宁夏泾源县在雨强 (R) 为[0.1, 5) mm·h^{-1} (a)、[5, 10) mm·h^{-1} (b)、[10, 15) mm·h^{-1} (c)、[15, 20) mm·h^{-1} (d)、≥20.0 mm·h^{-1} (e)、整体样本 (f) 下 DSG5 和 D17 平均粒子数浓度随粒子直径变化

Fig. 6 Comparison of mean droplet number concentration and particle diameter of DSG5 and D17 with different rainfall intensities of (a) [0.1, 5) mm·h^{-1}, (b) [5, 10) mm·h^{-1}, (c) [10, 15) mm·h^{-1}, (d) [15, 20) mm·h^{-1}, (e) ≥20.0 mm·h^{-1} and (f) overall sample in Jingyuan, Ningxia from July to October in 2022

达估算降水量最广泛使用的方式, 其中系数 a 和指数 b 与地理位置、大气条件、降水类型和仪器型号等密切相关 (Seela et al., 2018)。选取$R \geqslant 2.5$ mm·h^{-1} (即中雨以上) 的降水样本, 采用最小二乘法分别进行$Z_e - R$关系拟合 (图 7), 进一步探究 DSG5 和 D17 在计算$Z_e - R$关系上的差异。DSG5 和 D17 拟合结果分别为$Z_e = 323.9 \cdot R^{1.67}$, $Z_e = 161.2 \cdot R^{1.86}$。

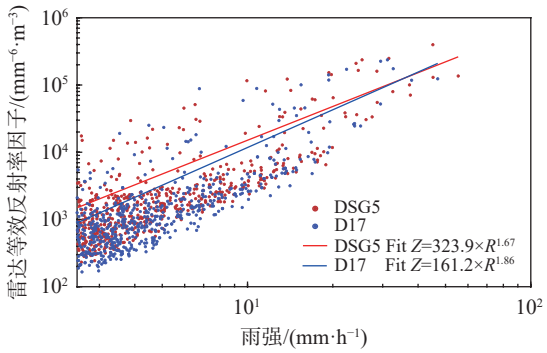


图 7 2022 年 7—10 月宁夏泾源县 DSG5 和 D17 两种国产设备雷达等效反射率因子 (Z_e)-降水强度 (R) 关系拟合

Fig. 7 The $Z_e - R$ fitting using data produced by two domestic precipitation phenomenon instruments (DSG5 and D17) in Jingyuan, Ningxia from July to October in 2022

在$R \leqslant 10$ mm·h^{-1} 时, DSG5 计算的Z_e比 D17 偏大, 且随着 R 的增大, 两者的偏差逐渐趋于一致。由于 DSG5 观测到的粒子直径较 D17 的更大, 且Z_e与粒子直径的 6 次方成正比, 这可能导致 DSG5 计算的 Z 在$R \leqslant 10$ mm·h^{-1} 的情况下较 D17 差别最大, 这与图 4d 中 DSG5 在 0~10 dBz 范围内 PDF 较 D17 更大相一致。随着 R 增大到 $10 \leqslant R < 20$ mm·h^{-1} 的范围内, D17 计算得到的大粒径的N较 DSG5 更多, D17 计算的Z_e较 DSG5 更大。总体来看, 随着 R 的增大, D17 计算的Z_e也越来越大, 两者的差别越来越小, 最终导致 D17 计算的平均Z大于 DSG5 (表 3)。

降水粒子的下落末速度直接关系到降水现象仪粒子相态的识别, 也与N的估算密切相关, 所以降水粒子下落末速度的准确与否非常重要。将 DSG5 和 D17 相匹配的 32 个尺度通道和 32 个速度通道数据按照粒子下落末速度-直径图谱进行排列, 挑选出观测到粒子对应的尺度通道和速度通道, 计算不同平均直径粒子对应速度的标准差, 同时以 Atlas 等 (1973) 统计的下落末速度-直径关系作为理论值进行比较 (图 8), 可见对于直径 2.1 mm 以下的降水粒子, DSG5 和 D17 观测的下落末速度完全一致, 随着直径的增加, DSG5 和 D17 观测的下落末速度也出现了不同程度的偏差, DSG5 的下落末速度较 D17 几乎均偏高, 最多偏高 0.78 m·s^{-1}, 这种高估现象在一定程度上可能造成

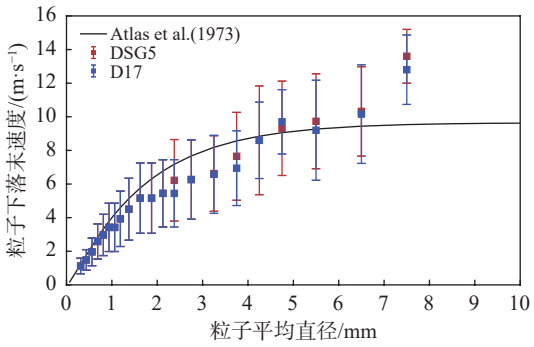


图 8 2022 年 7—10 月宁夏泾源县 DSG5 和 D17 降水粒子下落末速度-直径与 Atlas 等 (1973) 统计的理论值误差

Fig. 8 Bias of raindrop mean diameter-falling velocity between theoretical values by Atlas et al. (1973) and measured values obtained by DSG5 and D17 in Jingyuan, Ningxia from July to October in 2022

该直径范围内计算的N的高估。

DSG5 和 D17 计算得到的下落末速度随着直径的增加与理论值偏差越来越大, 经历了与理论值比较接近 (直径 1.3 mm 以下), 较理论值越来越偏低 (直径 1.3~3.7 mm), 随后又增加至较理论值偏高的过程, DSG5 和 D17 对直径 7.5 mm 降水粒子的下落末速度较理论值高估最大, 分别高估 43% 和 34%。DSG5 的下落末速度较 D17 来说总体上较为接近理论值。

总的来说, 除N外, 其他各项微物理参量 DSG5 和 D17 计算结果差别较小。DSG5 和 D17 D_m和 $\log_{10}N_w$的 PDF 分布形态基本相似且形态相反, 且 DSG5 和 D17 计算的N的差距较两者直径的差距更大, 说明 DSG5 观测到的大粒径的粒子样本较多, 但是N较少。DSG5 和 D17 观测到的下落末速度较为接近理论值。

3　结论与讨论

本文以 2022 年 7—10 月宁夏回族自治区六盘山泾源县 26 次液态降水过程为例, 选取泾源县气象观测站 SL3-1 型翻斗式雨量计降水资料、DSG5 型降水现象仪和 D17 新型降水现象仪测量的降水粒子谱及计算的微物理参量, 分析 DSG5 和 D17 观测稳定性及缺测情况、4 种质控方法对 DSG5 和 D17 计算降水量的影响, 研究 D17 在计算降水量上较 DSG5 及传统雨量计上的差异以及 DSG5 和 D17 在测量计算微物理参量上的差异, 得出以下主要结论:

(1) DSG5 和 D17 缺测率较低, 满足数据分析的需要; 滤除超过粒子下落末速度-直径经验公式±60% 的奇异数据这种质控方法, 对于 DSG5 和 D17 计算降水的影响最大, 均超过 10%, 且可以将 DSG5 和 D17 90% 以上的空报现象进行过滤。D17 的漏报数

较 DSG5 少，但空报数较 DSG5 多，且 DSG5 和 D17 仅在小雨条件下出现漏报。

(2) DSG5 和 D17 与 SL3-1 在观测降水上的变化趋势基本一致，但 DSG5 和 D17 均呈现出对降水量的低估现象，D17 计算的累积降水量较 DSG5 更接近 SL3-1。

(3) 从 8 044 个分钟降水样本的平均值来看，DSG5 计算的粒子数与 D17 差别最大，仅为 D17 的 1/3。DSG5 计算的雨强 (R)、归一化阶矩参数 ($\log_{10}N_w$)、液态含水量 (Q) 和雷达反射率因子 (Z) 四种微物理参量较 D17 偏低。但 DSG5 计算的质量加权平均直径 (D_m) 较 D17 高。DSG5 和 D17 计算的 N 相差超过 3 倍，其他各项微物理参量差别不大。

(4) DSG5 和 D17 计算的 D_m 和 $\log_{10}N_w$ 的 PDF 分布形态基本相似且形态相反，两者 N_w-R 拟合曲线的差距较 D_m-R 拟合曲线的差距更大，说明 DSG5 观测到的大粒径的粒子样本较多，但是 N 较少，DSG5 与 D17 计算的 D_m 的差值较两者计算的 $\log_{10}N_w$ 的差值更小，故在平均值上 DSG5 的 D_m 平均值更大，Z 和 R 的平均值更小。

(5) DSG5 和 D17 观测到的下落末速度较为接近。在粒子直径小于 1.3mm 以下时，与 Atlas 等 (1973) 统计的理论值相差不大，随着直径的增加，与理论值的偏差越来越大，最大偏差分别为 43% 和 34%。

上述研究结果有助于加深质控方法对于 DSG5 和 D17 空报及计算降水量的影响认识，为了解 D17 新型降水现象仪测量性能和验证 DSG5 降水现象仪的测量效果提供科学参考。但本研究还存在一些不足，例如未开展与雨滴谱主流研究设备 Parsivel 激光雨滴谱仪在测量计算微物理参量上的差异进行比较。下一步将对 DSG5 和 D17 与 Parsivel 激光雨滴谱仪在测量计算微物理参量上的差异进行比较。通过 DSG5、D17 和 Parsivel 获取更多更加科学可信的气象数据，并基于其雨滴谱资料，对降水粒子下落末速度与滴谱的关系特点做更深入分析研究，并将粒子滴谱和粒子下落末速度等观测特性应用于模式物理方案改进中。

参考文献 (References):

陈爱莲,丁妙增.2017.降水现象仪的比对与分析[J].气象水文海洋仪器,34(1):8-12. Chen A L, Ding M Z. 2017. Comparison and analysis of precipitation phenomenon meter [J]. Meteorological, Hydrological and Marine instruments,34(1):8-12 (in Chinese). doi:10.19441/j.cnki.issn 1006−009x.2017.01.002

陈冬冬,施丽娟,李肖霞,等.2011.天气现象自动化观测现状调研[J].气象科技,39(5):596−602. Chen D D, Shi L J, Li X X, et al. 2011. Status investigation of automatic weather observation [J]. Meteorological Science and Technology,39(5):596−602 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.2011.05.011

付志康,万蓉,肖艳姣,等.2022.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,41(4):434−444. Fu Z K, Wan R, Xiao Y J, et al. 2022. Comparison of precipitation measurement by DSG5 and Parsivel present weather instrument [J]. Torrential Rain and Disasters,41(4):434−444 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2022.04.008

胡沁,曾杨,李毅聪.2019. DSG5 型降水现象仪观测资料的对比分析[J].气象水文海洋仪器,36(4):12-15. Hu Q, Zeng Y, Li Y C. 2019. Comparative analysis for observation data of DSG5 precipitation instrument [J]. Meteorological, Hydrological and Marine instruments, 36(4):12-15 (in Chinese). doi:10.19441/j.cnki.issn.1006−009x.2019.04.004

贾小芹,郑丽娜,张子涵,等.2019.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,39(1):123−130. Jia X Q, Zheng L N, Zhang Z H, et al. 2019. Comparative analysis of precipitation detected by an optical disdrometer and observed by the automatic weather station [J]. Journal of Marine Meteorology,39(1):123−130 (in Chinese). doi:10.19513/j.cnki.issn2096−3599.2019.01.013

李艳玉.2020. DSG5 型降水现象仪的数据评估分析[J].气象研究与应用,41(2):93−96. Li Y Y. 2020. Data evaluation and analysis of DSG5 precipitation phenomenon instrument [J]. Journal of Meteorological Research and Application,41(2):93−96 (in Chinese). doi:10.19849/j.cnki.CN45−1356/P.2020.2.19

刘平,王磊,祁生秀,等.2020.天气现象仪降水观测分析[J].成都信息工程大学学报,35(1):104−110. Liu P, Wang L, Qi S X, et al. 2020. Analysis of precipitation observation of weather phenomenon instrument [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 35(1):104−110 (in Chinese). doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2020.01.014

马思敏,舒志亮,常倬林,等.2023.宁夏六盘山区地面雨滴谱特征统计分析[J].干旱区研究,40(8):1203−1214. Ma S M, Shu Z L, Chang Z L, et al. 2023. Statistics and analysis of surface raindrop spectrum characteristics in Liupan Mountain area of Ningxia [J]. Arid Zone Research,40(8):1203−1214 (in Chinese). doi:10.13866/j.azr.2023.08.01

强德厚,刘俊卿,丁建芳,等.2024.青藏高原夏季一次冰雹过程的微物理特征[J].气象,50(6):701−710. Qiang D H, Liu J Q, Ding J F, et al. 2024. Microphysical characteristics of a summer hailstorm in Tibetan Plateau [J]. Meteorological Monthly,50(6):701−710 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2024.020201

秦榕,杨霰,陈艳丽,等.2019.新疆地区降水现象仪平行观测对比分析[J].沙漠与绿洲气象,13(4):117−123. Qin R, Yang X, Chen Y L, et al. 2019. Comparative analysis of parallel observations of precipitation measurement instrument records in Xinjiang [J]. Desert and Oasis Meteorology,13(4):117−123 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2019.04.017

李山山,王晓芳,李国平,等.2023.短时强降水和持续性强降水的雨滴谱特征对比[J].暴雨灾害,42(1):1−12. Li S S, Wang X F, Li G P, et al. 2023. Comparative analysis on characteristics of raindrop spectrum of short-term and persistent heavy rain [J]. Torrential Rain and Disasters,42(1):1−12 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−119

申高航,高安春,王子悦,等.2024a.一次冰雹过程降水量观测对比分析[J].

气象科技,52(1):10−18. Shen G H, Gao A C, Wang Z Y, et al. 2024. Comparative analysis of precipitation observation during a hail process [J]. Meteorological Science and Technology,52(1):10−18 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.20230026

申高航,刘婷婷,王子悦,等.2024b. DSG5 降水天气现象仪对一次雨雪转换天气过程的识别分析[J].气象科技,52(6):787−796. Shen G H, Liu T T, Wang Z Y, et al. 2024. Particle spectral characterization of a Rain-to-Sonw evert and identification process of DSG5 precipitation weather phenomenometer [J]. Meteorological Science and Technology, 52(6):787−796 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.20230364

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]. Meteorological Science and Technology,44(4):548−554 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.2016.04.005

赵勇,陈立峰.2024. 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,48(1):108−114. Zhao Y, Chen L F. 2024. Evaluation of the performance of two different types of precipitation phenomenon meters in precipitation observation [J]. Journal of Mountain Meteorology,48(1):108−114 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1003−6598.2024.01.016

Angulo-Martínez M, Beguería S, Latorre B, et al. 2018. Comparison of precipitation measurements by OTT Parsivel^2 and Thies LPM optical disdrometers [J]. Hydrology and Earth System Sciences,22(5):2811−2837. doi:10.5194/hess−22−2811−2018

Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S, 1973. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence [J]. Reviews of Geophysics and Space Physics,11(1):1-35.

Kruger A, Krajewski W F. 2002. Two-dimensional video disdrometer: A description [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,19(5): 602−617. doi:10.1175/1520−0426(2002)0192.0.CO;2

Seela B K, Janapati J, Lin P P, et al, 2018. Raindrop size distribution characteristics of summer and winter season rainfall over North Taiwan [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,123(20): 11602-11624. doi:10.1029/2018JD028307

Tokay A, Bashor P G. 2010. An experimental study of small-scale variability of raindrop size distribution [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,49(11):2348−2365. doi:10.1175/2010JAMC2269.1

Tokay A, Wolff D B, Petersen W A. 2014. Evaluation of the new version of the laser-optical disdrometer, OTT Parsivel^2 [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,31(6):1276−1288. doi:10.1175/JTECH−D−13−00174.1

Wen L, Zhao K, Zhang G, et al. 2016. Statistical characteristics of raindrop size distributions observed in East China during the Asian summer monsoon season using 2-D video disdrometer and Micro Rain Radar Data [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121(5):2265−2282. doi:10.1002/2015JD024160

(责任编辑　唐国瑛)