

王振超, 陈雪娇, 刘姝, 等. 微型智能气象站降雨观测对比试验. 应用气象学报, 2023, 34(4): 438-450.

DOI: 10.11898/1001-7313.20230405

微型智能气象站降雨观测对比试验

王振超¹⁾²⁾ 陈雪娇¹⁾²⁾ 刘姝¹⁾²⁾ 花家嘉¹⁾²⁾ 刘文忠^{3)*}

¹⁾(中国气象局雄安大气边界层重点开放实验室, 雄安新区 071000)

²⁾(河北雄安新区气象局, 雄安新区 071000)

³⁾(河北省气象技术装备中心, 石家庄 050021)

摘 要

为了增强对微型(一体式)智能气象站(简称微智站)测雨性能的认识,2021年6—11月河北雄安新区气象局开展了不同测雨原理微智站的对比试验。分析表明:过程雨量不低于10 mm时,翻斗式微智站相对于标准站能够满足观测误差的控制要求,雷达式微智站测值偏大,光电式和压电式微智站测值偏小;过程雨量小于10 mm时,翻斗式微智站和压电式微智站相对于标准站能够满足观测误差的控制要求,雷达式微智站测值偏大,光电式微智站测值偏小。在雨强方面,双翻斗式微智站适合降雨极大值观测,光电式微智站和压电式微智站降雨极大值测值偏小;微智站雨强累积占比大于95%的雨强为 $[0.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}, 0.6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}]$,雨量累积占比大于50%的雨强为 $[0.1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}, 0.4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ 。雷达式微智站对降雨响应比较快。微智站雨量传感器的分辨力越精细,对细微降雨观测越有效,有效降雨率也越大。

关键词: 微型(一体式)智能气象站; 降雨特性; 外场对比观测

引 言

降雨观测数据是开展灾害性天气监测预警预报、气候变化、汛情旱情分析的重要基础数据,始终是气象观测的重点^[1-2]。目前国家级气象观测站使用翻斗式雨量传感器和称重式降水测量仪对地面降水量(液态和固态)进行自动观测^[3-5]。在气候变暖和城镇化加速的背景下,区域性极端暴雨洪涝灾害频发^[6-11],这对城市气象灾害监测服务提出严峻挑战,也对气象降雨精细化观测提出了更高要求^[12-15]。2020年中国气象局印发了《气象观测技术试验指南》,明确未来5年气象观测技术试验以监测精密为总体要求,建设密度较高、布局合理和自动化程度高的地面探测网,提高城市气象观测能力。

微型(一体式)智能气象站(简称微智站)是集气象数据自动采集、存储和传输于一体的全电子新型

小型气象站,可依托智能建筑、地下空间、公共场所和智能灯杆等场所设施,在重点地区科学而广泛地布设微智站,形成智慧气象精密观测网,获取区域高时空分辨率的中小尺度灾害性天气、局部环境和区域气候等观测数据,大幅有效提升城市气象综合观测能力^[16-18]。

综上所述,微智站在未来智慧城市降雨精细化观测中具有广泛应用前景,但目前微智站在气象降雨观测业务应用的可行性尚不清楚。近年关于微智站降雨观测性能开展了一些研究。胡新华等^[19]对比智能气象站与自动气象站降雨资料,指出虽然两种观测数据存在差异,但均在允许精度范围内。吴有恒等^[20]分析多要素自动气象站的降雨资料,指出微智站观测的过程雨量偏小,降雨过程的等级越大与标准站数据间的偏差越小。鲁峻麟等^[21]对4套微型气象站数据进行了评估。但这些对比研究涉及设备类型单一,且评估多针对降雨总量,未综合比较

2023-02-24 收到, 2023-05-15 收到再改稿。

资助项目: 河北省气象局科研开发项目(21kyd07)

* 通信作者, 邮箱: 470807863@qq.com

基于多种测雨原理的微智站降雨特性差异及其原因,不同测雨原理的微智站各有所长,实际使用时可以根据不同测雨需求组合雨量计或优化开发新的测雨设备。2021年6—11月河北雄安新区气象局依据《气象观测技术试验指南》开展了不同厂家的多种类型微智站降雨观测对比试验。本文利用此次试验的观测数据,从雨量和雨强占比以及降雨时间等方面分析不同测雨原理的微智站对降雨的观测能力,旨在为微智站应用于气象降雨观测业务的可行性提供支撑依据,增强对微智站降雨监测性能的认识,有助于科研业务人员根据不同需求选择合适的测量设备获取降雨特性。

1 外场对比观测试验方法

1.1 微智站简介及试验场地布设

为评估各种微智站的降雨监测性能,在河北雄

安新区雄县气象局地面气象观测试验基地内布设了12个型号、6类雨量测量方式的微智站(表1)。其中,6台雷达式原理测雨,1台压电式原理测雨,1台光电式原理测雨,2台双翻斗式原理测雨,1台单翻斗式原理测雨,1台电阻式原理测雨。各微智站东西排列成行、南北布设成列,东西相距3m,南北相距2m,安装高度均为2m。另外观测场内安装1台口径为20cm的SL3-1型翻斗式雨量传感器接入DZZ4自动气象站作为标准站进行对比(图1),同时布设1台人工雨量器用于收集降雨时段的雨量验证标准站测量准确性。微智站及标准站测雨的频率是每分钟采样1次,人工雨量器收集的降雨每日人工定时观测3次,读数精确到0.1mm。外场对比试验中2021年6月15日08:00—10月15日08:00(北京时,下同)出现降水,试验期内全部为液态降水,无固态或混合态降水。

表1 微智站基本信息

Table 1 Basic information of micro-smart stations

微智站编号	分辨率/ (mm·min ⁻¹)	雨强/ (mm·min ⁻¹)	传感器 类型	承水口(翻斗) 直径/mm	设备型号
C00	0.1		电阻感雨		HY-SKY3
C01	0.01	0~24	雷达式		ZY3140
C02	0.01	0~24	雷达式		CY-YTJ-S06
C03	0.1	0~4	单翻斗	159	jy-wx-qx
C04	0.01	0~24	雷达式		WS60
C05	0.01	0~4	光电式		P-IIS-MWS
C06	0.1	0.1~4	压电式		DZZ4-XVSA
C07	0.2	0~4	双翻斗式	200	SAMS-II
C08	0.01	0~24	雷达式		Theaty-II
C09	0.2	0~4	双翻斗式	200	SAMS
C10	0.01	0~24	雷达式		ZQX-36
C11	0.01	0~24	雷达式		SW600

1.2 雨量传感器测量原理

本次外场试验涉及6类降雨观测原理。雷达式测雨基于多普勒频移,雷达模块发送侧连续发送脉冲式电磁波,当雨滴进入雷达模块的采集区域,电磁波遇到雨滴被散射,雷达模块的接收侧采集多普勒频移信息,通过对信息的频率和幅度进行识别,计算单个雨滴的直径及下落速度,得到归一化的雨强,进而计算雨量。雨强的估算公式:

$$I = K \times \sum_{i=0}^{N/2} A_i^2 \times f_i. \quad (1)$$

式(1)中 I 为雨强, A 为快速傅里叶变换(FFT)后的信号幅度, f 为频率, K 为试验测试确定的参数,

N 为FFT点数^[22-24]。

压电式测雨是利用压电振子的压电效应,将机械位移(振动)变成电信号,雨滴冲击能量转变的电压波形,由电压波形的变化得到雨强,测算单个雨滴质量,进而计算雨量^[25-26]。

光电式测雨是通过将光强度的变化转换成电信号的变化实现测量。当雨滴进入采样空间时,雨滴遮挡激光,接收传感器接收到的光信号和由光信号转变的电信号发生改变,当雨滴穿过后,接收传感器的电信号又恢复雨滴进入采样空间之前的状态。对接收传感器的电信号进行处理,得到雨滴穿过采样空间的时间,进而可计算雨滴的下降速度和雨

强^[27-28]。

翻斗雨量传感器主要由承水器、上翻斗、汇集漏斗、计量翻斗、干簧管等组成。双翻斗式雨量传感器的承水器将收集的雨水通过漏斗进入上翻斗,积累到一定量时,重力作用使上翻斗翻转,雨水进入汇集漏斗。雨水从汇集漏斗的节流管注入计量翻斗,通过调节降雨强度降低因不同降水强度造成的测量误差。当计量翻斗的雨量为 0.1 mm 时,将降雨倾倒入计数翻斗,计数翻斗翻转 1 次。计数翻斗翻转时,相关的磁钢对干簧管扫描 1 次,干簧管因磁化瞬间

闭合 1 次。降水量每达到 0.1 mm,对开关信号计数,即测得分辨力为 0.1 mm 的降水量。与双翻斗式雨量传感器相比,单翻斗式雨量传感器少了上翻斗、汇集漏斗。承水器的雨水经过滤后流入计量翻斗,当计量翻斗的雨水积累到一定量时,翻斗翻转,每次翻转通过干簧管转成脉冲信号(1 脉冲为 0.1 mm)传输至采集系统^[29]。

电阻感雨式雨量传感器的工作原理是雨点落在感应面,通过电信号判断是否有雨,一般设计为辅助降水观测传感器。

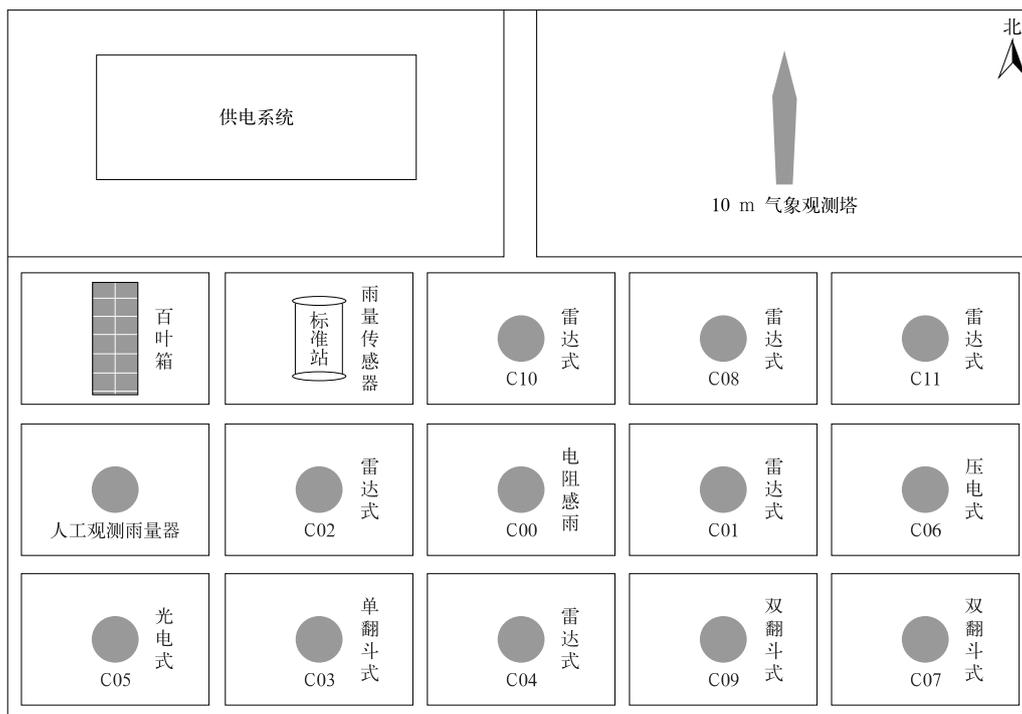


图 1 微型站外场对比试验场地布设示意图

Fig. 1 Schematic layout of comparison experiment for micro-smart weather stations

1.3 分析方法

1.3.1 雨量误差分析方法

对于降雨总量的误差分析一般分为日雨量和过程雨量,为避免跨日界及滞后降雨引起的雨量误差^[30-31],本文的雨量误差分析采用过程雨量方式。目前,对于降雨过程的划分多采用 1 h, 3 h, 6 h, 12 h, 24 h^[32-37]或最小降雨间歇期^[38-39]。本文采用 24 h 作为最小降雨间歇期划分降雨过程,即标准站记录的 0.1 mm 分辨率数据出现第 1 次计数和最后 1 次计数的降雨间歇时间不能超过 24 h,否则认为该次降雨过程结束。降雨过程的时间记录精确到分钟,开始时间为 T_1 ,结束时间为 T_2 。通过人工雨量

器和标准站的对比确定标准站运行正常,2021 年 6 月 15 日—10 月 15 日共得到 22 次降雨过程(表 2),总雨量为 552.6 mm。微智站降雨过程的开始和结束时间与标准站略有不同,因为雷达式和光电式微智站的雨强计量为 $0.01 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,为了更精确地测量微智站的过程雨量,参照廖爱民等^[40]的处理方法,将 $(T_1 - 12 \text{ h})$ 和 $(T_2 + 12 \text{ h})$ 作为微智站降雨过程的开始时间和结束时间。

通过计算过程雨量的相对误差比较各类微智站与标准站的差异。相对误差是测量值与标准站真值的差值与真值之比,以百分数表示,反映测量值的可信程度^[41]。相对误差计算公式为

表2 2021年6月15日—10月15日降雨过程(单位:mm)
Table 2 Rainfall events from 15 Jun to 15 Oct in 2021(unit:mm)

起止时间	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08	C09	C10	C11	标准站
07-01T18:01—21:00	14.2			24.4	2.6	7.2	16.8		21.5	18.2		17.5
07-02T23:01—03T20:00	46.3			53.9	4.4	17.9	38.4		49.6	47.2		39.2
07-10T23:01—12T07:00	101.7		87.9	173.2	18.3	41.9	112.4		142.2	124.9	32.3	111.7
07-18T09:01—19:00	20.6	20.3	18.2	27.7	1.4	8.2	18.6	15.5	21.8	24.5	7.0	18.6
07-21T10:01—22T06:00	19.1	16.7	12.1	15.3	0.3	5.8	15.0	12.4	17.2	20.3	5.9	13.9
07-27T15:01—30T09:00	46.8			35.8	5.8	13.7	42.6		43.8	52.7	13.2	37.0
08-04T03:01—07:00	11.9		9.9	17.0	0.8	5.2	12.2	9.0	15.6	15.3	4.2	11.9
08-05T12:01—14:00	21.4		14.3	24.2	8.2	7.1	17.8	13.6	21.4	22.5	6.4	18.5
08-09T00:01—03:00	3.2		0.0	2.2	0.0	1.6	1.4	2.0	1.6	3.5	1.5	1.2
08-14T06:01—08:00	7.9		30.0	8.2	0.0	3.1	5.6	5.0	6.8	9.9	3.1	5.7
08-16T03:01—17T02:00	2.5	0.0	0.0	0.3	0.0	0.3	1.6	1.6	2.2	2.6	0.9	1.3
08-19T06:01—20:00	19.9		30.0	17.6	0.0	5.9		19.7		23.3	5.6	23.1
08-23T19:00—24T02:00	29.8		54.5	45.3	5.2	12.7	32.0	23.7	31.6	38.6	11.6	32.9
08-26T20:01—21:00	0.7		0.0	0.4	0.0	0.3	0.2	0.5	0.2	0.8	0.5	0.2
08-31T02:01—09:00	4.7		0.9	0.0	0.0		2.0	2.2	2.0	5.9	1.3	1.7
09-04T01:01—06T11:00	10.5		10.8	3.5	0.5	0.0	12.0	8.9	11.6	11.7	2.5	10.6
09-16T08:01—17T00:00	4.5	6.8	0.2	0.5	0.3	0.5	1.6	1.4	1.4	2.1	0.3	1.2
09-18T19:01—20T11:00	51.0	117.8	40.6	47.1	25.9	21.7	67.4		66.6	58.9	9.5	65.3
09-23T22:01—24T22:00	16.1		12.7	10.9	1.2	5.9	11.8	10.7	11.8	17.0	6.1	11.1
09-25T22:01—27T06:00	5.8		14.8	1.0	1.5	0.5	14.4	3.6	13.8	6.7	1.1	12.9
10-03T10:01—07T05:00	131.9			109.5	2.4	69.8	103.8	103.0	104.4		44.0	104.2
10-08T21:01—09T21:00	13.1		14.0	4.6	0.1	3.7	13.8	9.8	13.4		4.0	12.9

$$R = \frac{x_i - y}{y} \times 100\%。 \quad (2)$$

式(2)中, x_i 为第 i 种型号微智站的过程雨量, y 为标准站的雨量。为了排除断电、通讯故障或维护以及服务器重启等原因造成的数据缺测, 舍去数据到报率小于 98% 的降雨过程。由于编号 C00 的微智站为电阻感雨式, 观测数据为 0 和 1, 0 表示无降雨, 1 表示有降雨, 因此对该设备不予分析。

1.3.2 雨强占比

统计各微智站和标准站各降雨过程不同雨强占比 P_i , 为了更好地适应数据采集频率为 1 min 的降雨时间序列, 以 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 为分级步长, 本文的雨强单位取 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ [42-44]。

$$P_i = \frac{N_i}{\sum_{j=1}^n N_j} \times 100\%。 \quad (3)$$

式(3)中, N_i 和 N_j 分别为第 i 级和第 j 级雨强出现的次数。第 i 级雨强 I_i 的雨量在总雨量的占比 q_i 为

$$q_i = \frac{N_i \times I_i}{\sum_{j=1}^n (N_j \times I_j)} \times 100\%。 \quad (4)$$

1.3.3 降雨的时间特征

为比较不同类型微智站的降雨时长, 对于标准

站, 在 $[T_1, T_2]$ 获取的第 1 个和最后 1 个非零雨强的分钟级降雨数据时刻作为降雨的精确开始时间和结束时间, 记为 T_{h1}, T_{h2} 。对于微智站, 在 $[T_1 - 12 \text{ h}, T_2 + 12 \text{ h}]$ 获取的第 1 个和最后 1 个非零雨强的分钟级降雨数据时刻作为降雨的精确开始时间和结束时间。下文采用精确开始时间 T_{h1} 、结束时间 T_{h2} 、降雨时长 T 、有效降雨时长 T_e 和有效降雨率 a 分析降雨过程的时间特性。 T_e 为 $[T_{h1}, T_{h2}]$ 范围内非零雨强的总时间, 单位为 min。

$$T = T_{h2} - T_{h1}, \quad (5)$$

$$a = \frac{T_e}{T} \times 100\%。 \quad (6)$$

2 结果分析

2.1 降雨总量误差

图 2 为微智站雨量相对于标准站的相对误差率。为讨论微智站对不同雨强降雨的观测性能, 将过程雨量分为不小于 10 mm 的较强降雨和小于 10 mm 的弱降雨分别讨论 [45]。由图 2 较强降雨可见, 对于较强降雨过程, 多数微智站过程雨量的误差比较集中, 微智站 C03 和 C07 的相对误差率在 $\pm 4\%$ 误差控制线以内, 说明这两种型号的微智站观

测性能能够满足较强降雨的误差控制要求。6 台雷达式微智站(C01,C02,C04,C08,C10 和 C11)的相对误差率超过 $\pm 4\%$ 误差控制线,表明总体上雷达式微智站对较强降雨过程的雨量观测偏大,但微智站 C08 和 C11 的结果偏小,说明虽然观测原理相同,但不同算法和不同传感器硬件结构设计对观测性能的影响很大,因此开展外场试验并及时调整算法的参数和改善传感器的硬件结构设计十分必要。微智站

C05 和 C06 的相对误差率低于 -4% 的误差控制线,说明较强降雨过程的雨量低测明显。这可能与测雨原理有关,光电式测雨受光线以及杂物的影响很大(如多个大雨滴同时到达检测光区会产生重叠效应,造成雨量观测偏小),压电式测雨受压力感应面积大小的影响很大,因此在较强降雨过程中对不均匀雨束的观测会产生系统性偏差。微智站 C09 的相对误差率偏大,其原因可能是在较强降雨中,双翻斗式

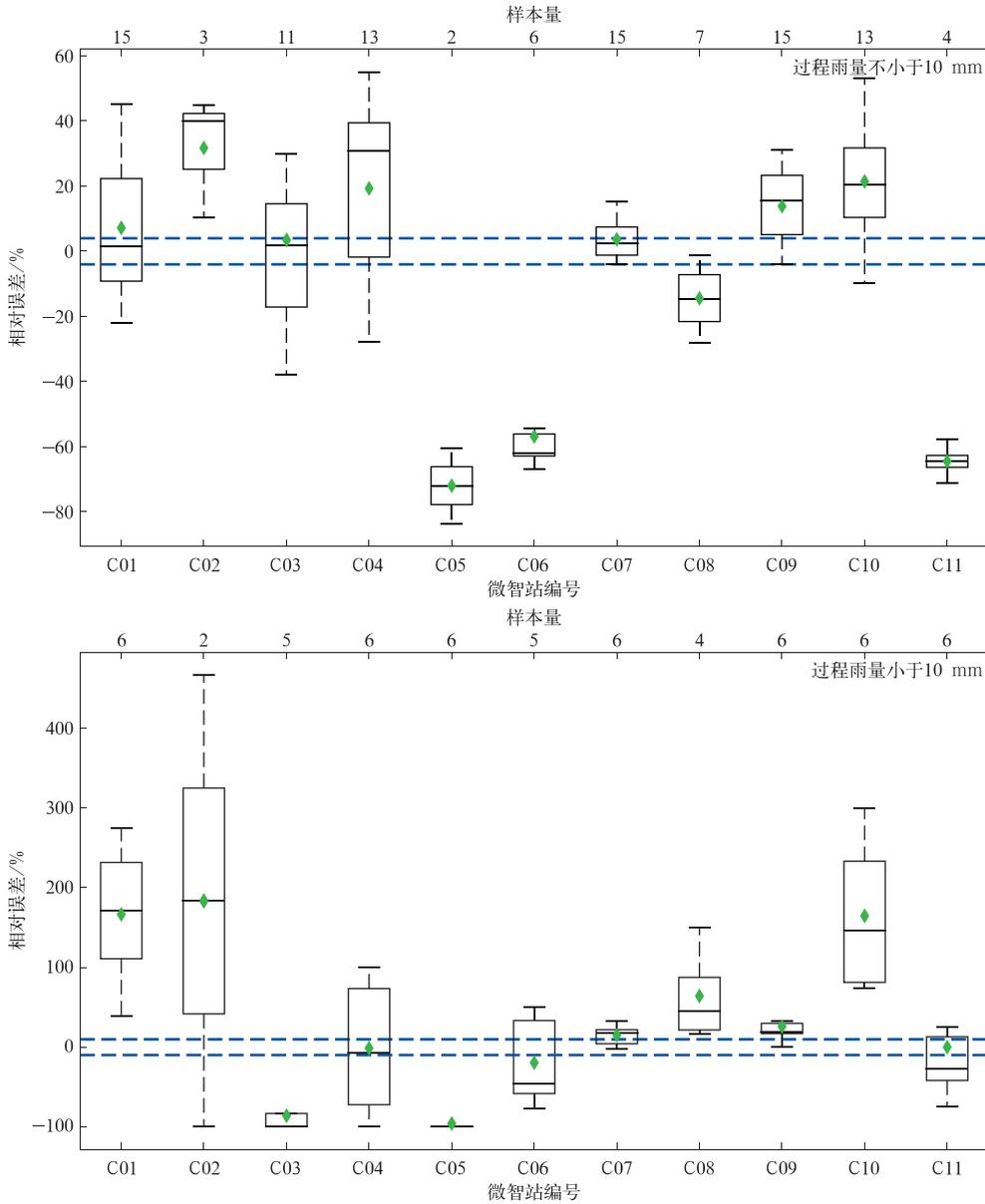


图 2 微智站过程雨量相对误差箱线图

(方框上边界和下边界分别表示总样本的 75%和 25%比例的数值,上下虚线端点分别表示最大值和最小值,方框中黑色横线表示中位数,绿色菱形表示平均值,蓝色虚线为 $\pm 4\%$ 的误差线)

Fig. 2 Box plots of relative error for process precipitation of micro-smart weather stations

(upper and lower boundaries of the box denote 75 and 25 percentiles, top and bottom ends of the whiskers denote the maximum and minimum, the black horizontal line inside the box denotes the median, green diamonds denote the mean, blue dashed lines denote $\pm 4\%$ of bias)

雨量传感器的下翻斗在惯性作用下盛水量减少,计数翻斗的翻动次数增加,甚至出现复翻现象,即因振动导致翻动 1 次产生 2 次计数。

由图 2 较弱降雨可见,整体上各微智站观测的过程雨量相对误差较分散,表明微智站对较弱降雨的观测能力不稳定。雷达式微智站 C04 和 C11 过程雨量相对误差率在 $\pm 4\%$ 的误差控制线以内,其他雷达式微智站过程雨量的相对误差率大于 4% ,说明相同观测原理但算法不同导致测雨结果差异很大。微智站 C05 的测雨结果小于标准站的 4% ,可能是小雨滴造成的光线遮挡不明显或者小雨滴重叠,导致雨量观测偏小。微智站 C06 的测雨结果接近标准站。微智站 C07 和 C09 的雨量相对误差率均在 $\pm 4\%$ 的误差控制线以内,但微智站 C03 的雨量存在明显低测。

总体上,雷达式微智站对过程雨量的观测整体上偏大,雷达式微智站之间的对比表明不同算法和不同传感器硬件结构设计可造成观测结果差异很大,所以开展外场试验并及时调整算法,是提高雷达式微智站观测性能,满足业务要求不可缺少的工作。光电式微智站的测雨误差较大,压电式微智站适合

较弱降雨过程的观测,双翻斗式微智站对过程雨量的观测整体上能够满足误差控制要求。

2.2 雨强差异

统计各微智站和标准站 22 次降雨过程不同降雨时长(1 min,5 min,10 min,30 min,1 h)的最大雨量,结果见表 3。图 3 是 22 次降雨过程不同降雨时长最大雨量的误差散点图。结合表 3 和图 3 可见,微

表 3 标准站和微智站不同雨时的最大雨量(单位:mm)
Table 3 Maximum rainfall of standard and micro-smart weather stations at different duration(unit:mm)

测站	时长				
	1 min	5 min	10 min	30 min	60 min
标准站	2.4	9.8	19.5	44.1	50.2
C01	1.3	7.9	16.5	39.6	49.6
C02	3.5	12.6	29.9	65.1	70.1
C03	2.2	7.6	14.6	34.8	38.0
C04	3.7	14.1	27.8	68.0	76.8
C05	0.6	2.0	3.5	8.9	10.7
C06	0.3	2.7	4.2	11.5	15.1
C07	2.4	8.8	17.4	41.2	47.4
C08	0.4	1.8	0.0	8.1	9.2
C09	3.3	11.7	23.4	55.0	63.2
C10	1.7	7.8	17.7	42.1	50.9
C11	0.6	2.1	4.2	11.1	14.5

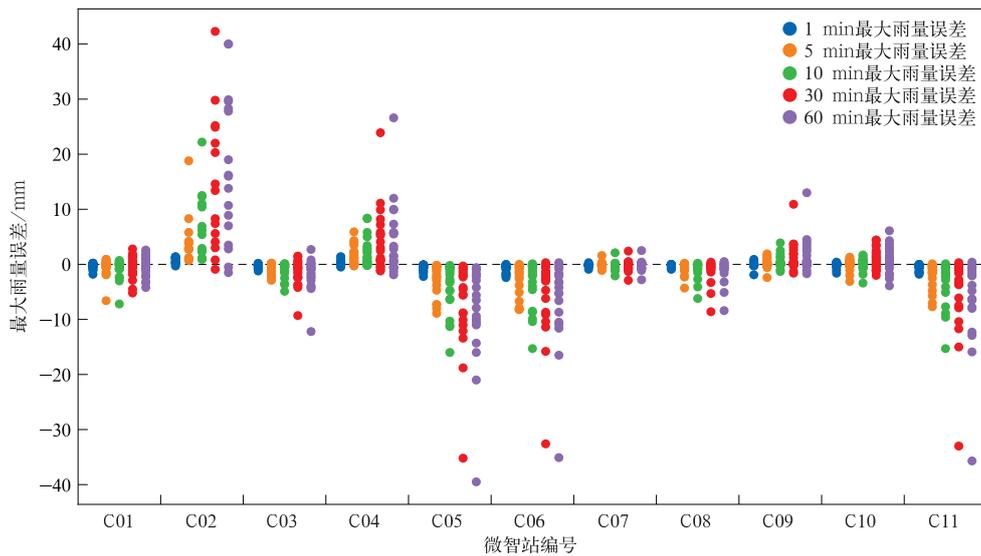


图 3 不同降雨时长最大雨量的误差散点图

Fig. 3 Scatter plot of maximum rainfall bias at different duration

智站 C02 和微智站 C04 不同降雨时长的最大雨量误差均偏大,微智站 C08 和微智站 C11 不同降雨时长的最大雨量误差普遍偏小,以上 4 台微智站的误差随着统计时长增长而越大。两台雷达式微智站 C01 和 C10 的最大雨量误差离散度比其他雷达式微

智站(C02,C04,C08 和 C11)小。微智站 C05 和微智站 C06 不同时长的最大雨量误差整体偏小,但误差的离散度较大。微智站 C07 不同时长的最大雨量误差较小。微智站 C03 和微智站 C09 在 1~10 min 的最大雨量误差较小,整体看优于雷达式、

光电式以及压电式的微智站。

综上所述,微智站 C07 适于降雨极大值的观测,微智站 C01 和 C10 内部算法的相关系数经订正后可用于观测降雨极大值,且订正后的观测性能将得到提升。微智站 C05 和 C06 因观测的降雨极大值偏小,不适于降雨极大值的观测。

2.3 降雨雨强占比

图 4 和图 5 分别是标准站和微智站各级雨强占

比和各级雨强对雨量的贡献。由图 4 和图 5 可见,除微智站 C07 和微智站 C09 的最小雨强为 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 外,其他微智站均能监测到不超过 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的雨强。标准站雨强不超过 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的占比为 82.2%,对雨量的贡献为 49.8%。微智站 C01、微智站 C05、微智站 C06、微智站 C08 以及微智站 C11 雨强不超过 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的占比大于标准站,为 83%~86%,对雨量的贡献相比标准站也

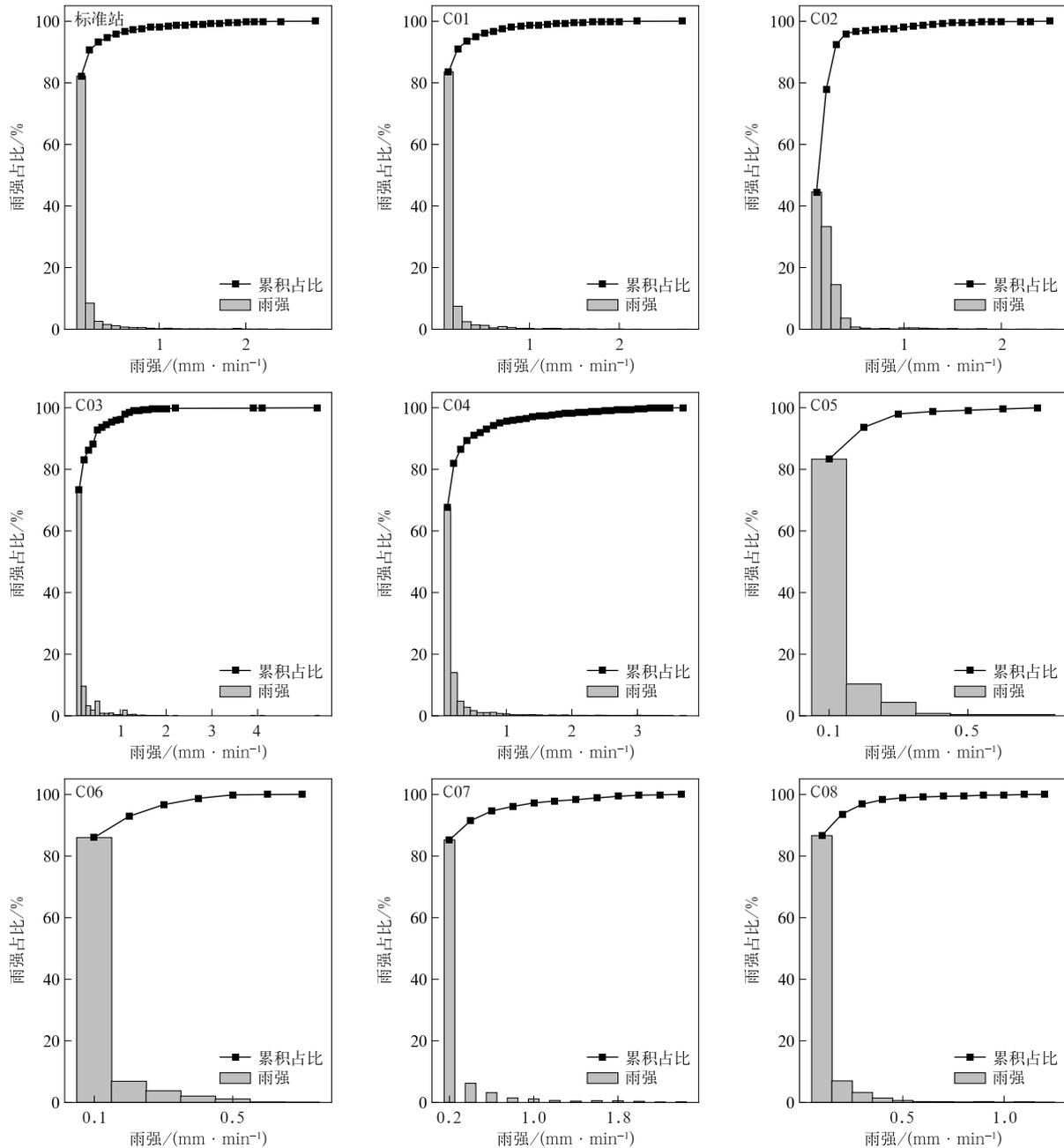
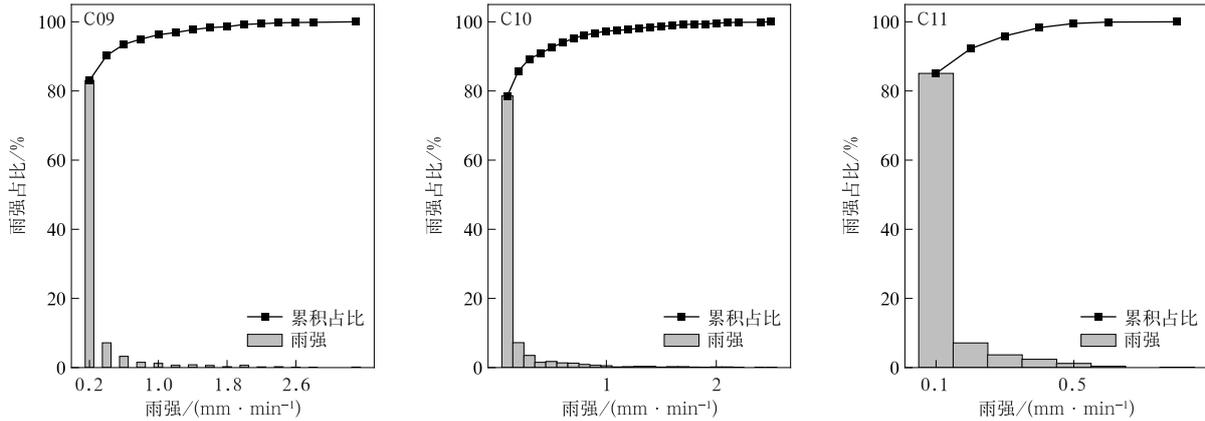


图 4 标准站和微智站的雨强占比及其累积占比

Fig. 4 Proportion and accumulated proportion of rainfall intensity measured by standard station and micro-smart weather stations



续图 4

偏大,分别为 53.1%, 65.4%, 68.2%, 67.5% 和 65.9%。微智站 C02 和微智站 C04 雨强不超过 0.1 mm · min⁻¹ 的占比和对雨量的贡献相比标准站偏小,分别为 44.5%, 21.0% 和 67.8%, 27.1%。微智站 C03 和微智站 C10 雨强不超过 0.1 mm · min⁻¹ 的占比分别为 73.3% 和 78.6%, 但对雨量的

贡献明显偏小,分别为 34.5% 和 39.8%。微智站 C07 和微智站 C09 雨强不超过 0.2 mm · min⁻¹ 占比分别为 85.5% 和 83.1%, 对雨量的贡献分别为 60.2% 和 54.4%。

由图 4 和图 5 还可以看到,标准站雨强累积占比大于 95% 对应的雨强为 0.5 mm · min⁻¹, 对雨量

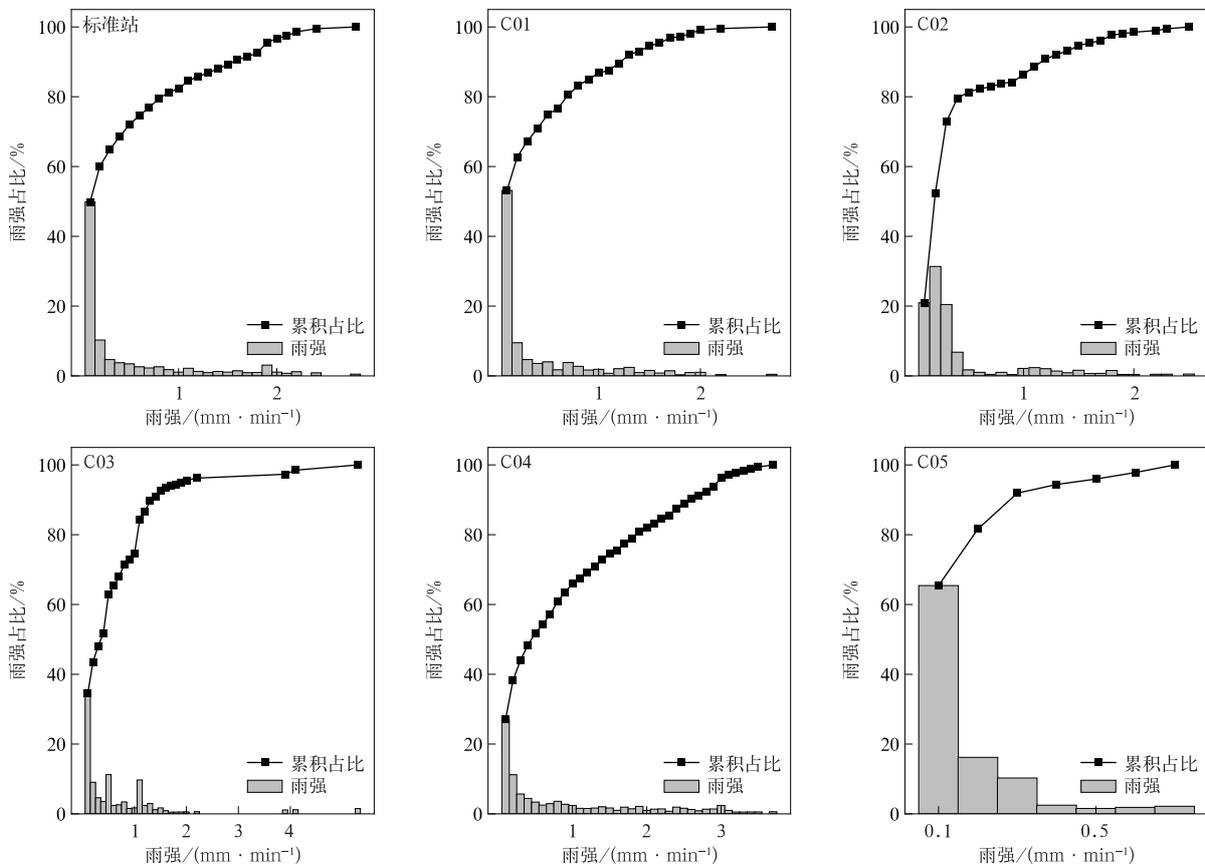
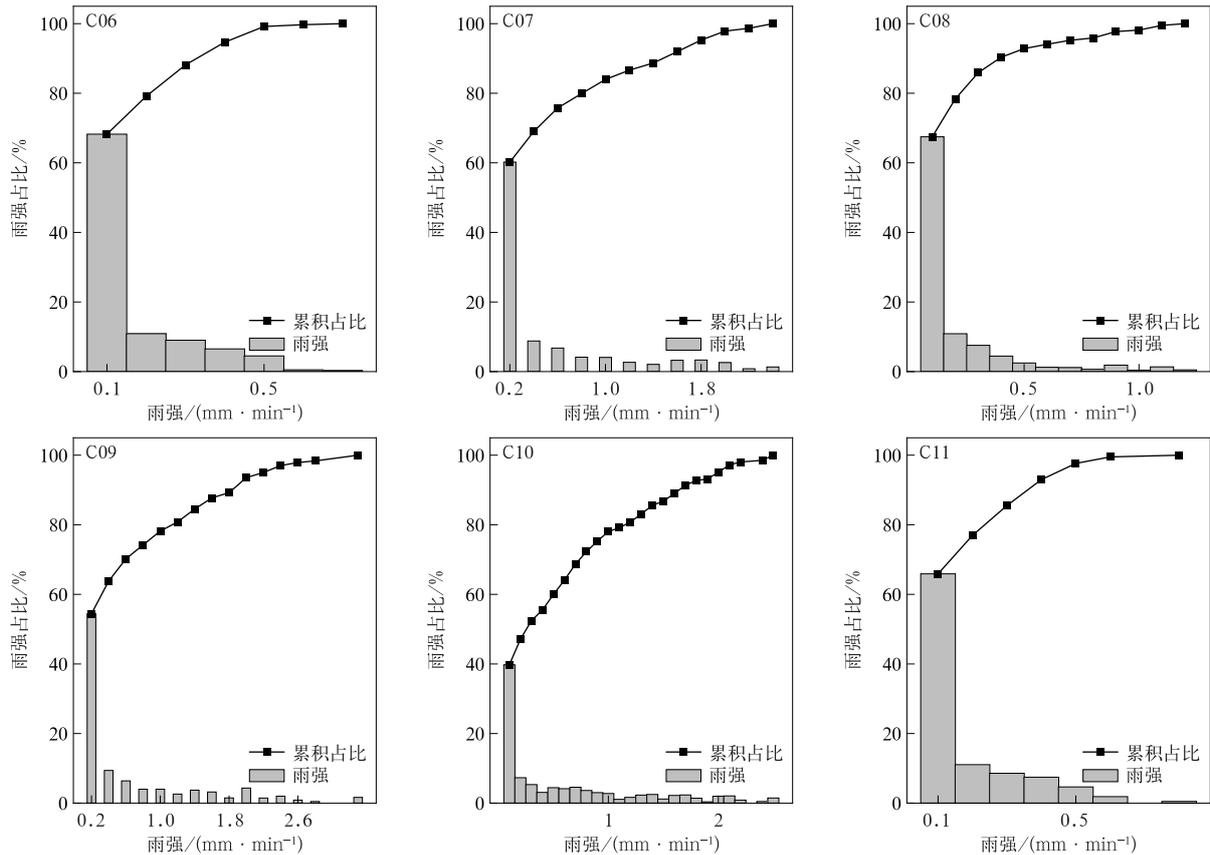


图 5 标准站和微智站雨强对雨量的贡献及其累积占比

Fig. 5 Contribution and accumulated proportion of rainfall intensity to rainfall measured by standard station and micro-smart weather stations



续图 5

贡献累积占比大于 50% 对应的雨强为 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。微智站雨强累积占比大于 95% 对应雨强为 $[0.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}, 0.6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ ，对雨量贡献累积占比大于 50% 对应的雨强为 $[0.1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}, 0.4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ 。这表明对雨强不超过 $0.4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的降雨，所有微智站测得的降雨占比均可达到过程雨量的一半以上，故在业务上翻斗式雨量传感器率定中应更注重小雨强的观测准确性，如考虑将零误差的雨强点定在小雨强位置，如 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 或 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。雷达式雨量传感器的参数优化也应当注重对小雨强的精确测量。光电式和压电式雨量传感器应当从仪器结构上进一步考虑如何减小系统性误差对小雨强降雨过程的观测影响。

2.4 过程降雨时间特征

根据式(5)和式(6)，计算微智站和标准站降雨时间特征参数的差异(表 4)，负值表示微智站早于标准站，正值表示微智站晚于标准站。由表 4 可见，雷达式微智站中除微智站 C04 外，其余 5 台微智站记录降雨过程的开始时间偏早，对应有效降雨率 a 也普遍大于标准站，说明雷达式雨量传感器对降雨响应较快。微智站 C07 和微智站 C09 的开始时间

晚于标准站 20 min 以上，结束时间早于标准站 30 min 以上，这是由于双翻斗式微智站的雨量分辨力为 0.2 mm ，导致降雨开始时需要积累更多的雨量才开始翻动计数，降雨结束时因雨量未达到 0.2 mm 而不被采集，表现为降雨过程提前结束。微智站 C05 和微智站 C06 的开始时间明显晚于标准站，结束时间明显早于标准站。

表 4 标准站和微智站降雨时间特征参数差异

Table 4 Differences in rainfall time parameters between standard station and micro-smart weather stations

测站	开始时间/min	结束时间/min	$a/\%$
标准站	0	0	21.7
C01	-141.4	2.6	22.3
C02	-139.8	173.8	37.3
C03	-111.0	151.1	18.8
C04	98.1	-214.7	34.0
C05	279.0	-221.2	31.6
C06	50.8	-190.1	23.3
C07	60.7	-62.1	17.9
C08	-87.1	2.5	18.6
C09	19.8	-28.9	19.7
C10	-103.0	-4.5	25.6
C11	-1.4	-16.5	9.2

由表4的有效降雨率可知,雷达式、光电式和压电式微智站的测值均大于标准站,超过22%,单翻斗式和分辨力为0.2 mm的双翻斗微智站有效降雨率小于标准站。说明雨量传感器的分辨力越精细,对细微降雨的监测越有效,有效降雨率也更大。

3 结 论

本文从雨量、雨强及其对雨量的贡献和降雨时间特征方面分析不同测雨原理微智站的观测能力,得到如下结论:

1) 翻斗式微智站能够满足误差控制要求,雷达式微智站对过程雨量的观测整体上偏大。雷达式微智站间的对比表明:不同算法和不同传感器硬件的结构设计可造成观测结果差异很大,光电式微智站对过程雨量观测误差较大,压电式微智站适合小雨强观测。

2) 微智站C07适合降雨极大值的观测,微智站C01和微智站C10的雨量传感器内部算法设置的相关系数经订正后可用于降雨极大值观测,且订正后的观测能力得到进一步提升。光电式和压电式微智站测的降雨极大值偏小,不适合观测雨强极大值。

3) 微智站雨强累积占比大于95%对应雨强为 $[0.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}, 0.6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}]$,同时微智站雨量累积占比大于50%对应雨强为 $[0.1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}, 0.4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ 。这说明雨强不超过 $0.4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,所有微智站观测的降雨占比均可达到总雨量的一半以上,故在业务中翻斗式雨量传感器率定应更加注重小雨强的观测准确性。

4) 对过程降雨时间特征参数分析可知,随着分辨力增加,翻斗式微智站的降雨开始时间滞后,结束时间提前。雷达式微智站对降雨的响应较快。雷达式、光电式以及压电式微智站的有效降雨率在22%以上,均大于标准站。单翻斗式和分辨力为0.2 mm的双翻斗式微智站的有效降雨率小于标准站。微智站雨量传感器的分辨力越精细,对细微降雨的监测越有效,有效降雨率也越大。

参 考 文 献

- [1] Singh C V. Relationships between rainy days, mean daily intensity and seasonal rainfall in normal, flood and drought years over India. *Adv Atmos Sci*, 1998, 15(3): 424-432.
- [2] 陈悦丽,赵琳娜,王英,等. 降雨型地质灾害预报方法研究进展. *应用气象学报*, 2019, 30(2): 142-153.
- [3] Chen Y L, Zhao L N, Wang Y, et al. Review on forecast methods of rainfall-induced geo-hazards. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(2): 142-153.
- [4] Uijlenhoet R. Precipitation physics and rainfall observation. *Climate and the Hydrological Cycle*, 2008, 25(4): 59-97.
- [5] 任芝花,冯明农,张洪政,等. 自动与人工观测降水量的差异及相关性. *应用气象学报*, 2007, 18(3): 358-364.
- [6] Ren Z H, Feng M N, Zhang H Z, et al. The difference and relativity between rainfall by automatic recording and manual observation. *J Appl Meteor Sci*, 2007, 18(3): 358-364.
- [7] 李林,范雪波,崔炜,等. 称重与人工观测降水量的差异. *应用气象学报*, 2015, 26(6): 688-694.
- [8] Li L, Fan X B, Cui W, et al. Comparative analysis of precipitation between weighing gauge and manual gauge. *J Appl Meteor Sci*, 2015, 26(6): 688-694.
- [9] Pendergrass A G. What precipitation is extreme?. *Science*, 2018, 360(6393): 1072-1073.
- [10] Salzmänn M. Global warming without global mean precipitation increase?. *Science Advances*, 2016, 2(6): 150-157.
- [11] Trenberth K E. Atmospheric moisture residence times and cycling: Implications for rainfall rates and climate change. *Climate Change*, 1998, 39(4): 667-694.
- [12] 陈隆勋,邵永宁,张清芬,等. 近四十年我国气候变化的初步分析. *应用气象学报*, 1991, 2(2): 164-174.
- [13] Chen L X, Shao Y N, Zhang Q F, et al. Preliminary analysis of climatic change during the last 39 years in China. *J Appl Meteor Sci*, 1991, 2(2): 164-174.
- [14] 何立富,陈双,郭云谦. 台风利奇马(1909)极端强降雨观测特征及成因. *应用气象学报*, 2020, 31(5): 513-526.
- [15] He L F, Chen S, Guo Y Q. Observation characteristics and synoptic mechanisms of Typhoon Lekima extreme rainfall in 2019. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(5): 513-526.
- [16] 陈隆勋,朱文琴,王文,等. 中国近45年来气候变化的研究. *气象学报*, 1998, 56(3): 257-271.
- [17] Chen L X, Zhu W Q, Wang W, et al. Studies on climate change in China in recent 45 years. *Acta Meteor Sinica*, 1998, 56(3): 257-271.
- [18] 金荣花,代刊,赵瑞霞,等. 我国无缝隙精细化网格天气预报技术进展与挑战. *气象*, 2019, 45(4): 445-457.
- [19] Jin R H, Dai K, Zhao R X, et al. Progress and challenge of seamless fine gridded weather forecasting technology in China. *Meteor Mon*, 2019, 45(4): 445-457.
- [20] 毕宝贵,代刊,王毅,等. 定量降水预报技术进展. *应用气象学报*, 2016, 27(5): 534-549.
- [21] Bi B G, Dai K, Wang Y, et al. Advances in techniques of quantitative precipitation forecast. *J Appl Meteor Sci*, 2016, 27(5): 534-549.
- [22] 韦青,李伟,彭颂,等. 国家级天气预报检验分析系统建设与应用. *应用气象学报*, 2019, 30(2): 245-256.
- [23] Wei Q, Li W, Peng S, et al. Development and application of national verification system in CMA. *J Appl Meteor Sci*,

- 2019, 30(2): 245-256.
- [15] 郭学良, 付丹红, 郭欣, 等. 我国云降水物理飞机观测研究进展. *应用气象学报*, 2021, 32(6): 641-652.
Guo X L, Fu D H, Guo X, et al. Advances in aircraft measurements of clouds and precipitation in China. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(6): 641-652.
- [16] 范雯杰, 程昌玉, 余德亮, 等. 国内外微型气象智能观测设备概况//第34届中国气象学会年会智能气象观测论文集, 2017: 12-13.
Fan W J, Cheng C Y, Yu D L, et al. Overview of Domestic and International Miniature Meteorological Intelligent Observation Devices//Proceedings of the 34th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society Intelligent Meteorological Observations, 2017: 12-13.
- [17] 王喆, 周勇, 唐伟, 等. 气象探测设备的微型化智能化发展对传统气象业务的影响分析. *中国信息化*, 2018, 4(3): 67-71.
Wang Z, Zhou Y, Tang W, et al. Analysis of the impact of miniaturization and intelligent development of meteorological detection equipment on traditional meteorological operations. *China Informatization*, 2018, 4(3): 67-71.
- [18] 陈艳莹. 智慧气象服务的研究与展望. *数字通信世界*, 2019, 9(6): 56-58.
Chen Y Y. Research and prospect of smart meteorological services. *Digital Communication World*, 2019, 9(6): 56-58.
- [19] 胡新华, 李嫦, 刘东育, 等. 智能气象站与自动气象站的观测数据对比分析. *气象水文海洋仪器*, 2016, 33(1): 57-60.
Hu X H, Li C, Liu D Y, et al. Comparative analysis of observation data from smart weather stations and automatic weather stations. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2016, 33(1): 57-60.
- [20] 吴有恒, 张杰, 田孟勤, 等. 微型气象站(OITS-03)气温对比观测分析. *收藏*, 2019, 22(7): 80-81.
Wu Y H, Zhang J, Tian M Q, et al. A comparative analysis of temperature observations from a miniature weather station (OITS-03). *Collection*, 2019, 22(7): 80-81.
- [21] 鲁峻麟, 黄惺惺, 顾桃峰, 等. 智慧城市微型自动气象站试验数据对比分析与评估. *气象水文海洋仪器*, 2022, 39(1): 28-31.
Lu J L, Huang X X, Gu T F, et al. Comparative analysis and evaluation of experimental data from miniature automatic weather stations in smart cities. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2022, 39(1): 28-31.
- [22] Atlas D, Ulbrich C W. Path- and area-integrated rainfall measurement by microwave attenuation in the 1-3 cm band. *J Appl Meteor*, 1977, 16(12): 1322-1331.
- [23] Brandes E A, Zhang G, Vivekanandan J. Experiments in rainfall estimation with a polarimetric radar in a subtropical environment. *J Appl Meteor*, 2002, 41(6): 674-685.
- [24] 管理, 戴建华, 陶岚, 等. QVP方法在双偏振雷达冬季降水观测中的应用. *应用气象学报*, 2021, 32(1): 91-101.
Guan L, Dai J H, Tao L, et al. Application of QVP method to winter precipitation observation based on polarimetric radar. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(1): 91-101.
- [25] Ilyas M A, Swingler J. Piezoelectric energy harvesting from raindrop impacts. *Energy*, 2015, 90(8): 796-806.
- [26] Safaei M, Sodano H A, Anton S R. A review of energy harvesting using piezoelectric materials: State-of-the-art a decade later (2008 - 2018). *Smart Mater Struct*, 2019, 28(11): 113001.
- [27] Tokay A, Kruger A, Krajewski W F. Comparison of drop size distribution measurements by impact and optical disdrometers. *J Appl Meteor*, 2001, 40(11): 2083-2097.
- [28] Bhattacharyya S, Dan M, Sen A K. Modelling of drop size distribution of rain from rain rate and attenuation measurements at millimeter and optical wavelengths. *International Journal of Infrared & Millimeter Waves*, 2000, 21(12): 2065-2075.
- [29] 孟庆勇, 丽东. SL3-1型雨量传感器的构件改进和维护方法. *气象科技*, 2014, 42(4): 597-600.
Meng Q Y, Li D. Component improvement and maintenance method of SL3-1 rainfall sensor. *Meteor Sci Technol*, 2014, 42(4): 597-600.
- [30] 张强, 涂满红, 马舒庆, 等. 自动雨量站降雨资料质量评估方法研究. *应用气象学报*, 2007, 18(3): 365-372.
Zhang Q, Tu M H, Ma S Q, et al. Quality assessment of the observational data of automatic precipitation stations in China. *J Appl Meteor Sci*, 2007, 18(3): 365-372.
- [31] Bonta J V, Shahalam A. Cumulative storm rainfall distributions: Comparison of Huff curves. *Journal of Hydrology (New Zealand)*, 2003, 16(2): 65-74.
- [32] Yarnell D L. Rainfall intensity-frequency data. *US Department of Agriculture*, 1944, 204(9): 58-59.
- [33] 殷水清, 王杨, 谢云, 等. 中国降雨过程时程分型特征. *水科学进展*, 2014, 25(5): 617-624.
Yin S Q, Wang Y, Xie Y, et al. Characteristics of intra-storm temporal pattern over China. *Adv Water Sci*, 2014, 25(5): 617-624.
- [34] 郭其蕴, 沙万英. 华南前汛期降水变率的分析. *应用气象学报*, 1998, 30(4): 10-16.
Guo Q Y, Sha W Y. Analysis of precipitation variability during the pre-flood period in South China. *J Appl Meteor Sci*, 1998, 30(4): 10-16.
- [35] 李勇, 金荣花, 周宁芳, 等. 江淮梅雨季节强降雨过程特征分析. *气象学报*, 2017, 75(5): 717-728.
Li Y, Jin R H, Zhou N F, et al. An analysis on characteristics of heavy rainfall processes during the Meiyu season in Jianghuai Region. *Acta Meteor Sinica*, 2017, 75(5): 717-728.
- [36] 赵琳娜, 慕秀香, 马翠平, 等. 冬季稳定性降水相态预报研究进展. *应用气象学报*, 2021, 32(1): 12-24.
Zhao L N, Mu X X, Ma C P, et al. A review on stable precipitation type forecast in winter. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(1): 12-24.
- [37] 汪卫平, 杨修群, 张祖强, 等. 中国雨日数的气候特征及趋势变化. *气象科学*, 2017, 37(3): 317-328.

- Wang W P, Yang X Q, Zhang Z Q, et al. The climatic characteristics and trends of rainy days over China. *J Meteor Sci*, 2017, 37(3): 317-328.
- [38] Bonta J V. Development and utility of Huff curves for disaggregating precipitation amounts. *Applied Engineering in Agriculture*, 2004, 20(5): 641.
- [39] 伍红雨, 邹燕, 刘尉. 广东区域性暴雨过程的定量化评估及气候特征. *应用气象学报*, 2019, 30(2): 233-244.
- Wu H Y, Zou Y, Liu W. Quantitative assessment of regional heavy rainfall process in Guangdong and its climatological characteristics. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(2): 233-244.
- [40] 廖爱民, 刘九夫, 张建云, 等. 基于多类型雨量计的降雨特性分析. *水科学进展*, 2020, 31(6): 852-861.
- Liao A M, Liu J F, Zhang J Y, et al. Analysis of rainfall characteristics based on multiple types of rain gauges. *Adv Water Sci*, 2020, 31(6): 852-861.
- [41] 盛中平, 白玉山, 林正华. 误差率的量化关系. *计量学报*, 1996, 17(3): 203-205.
- Sheng Z P, Bai Y S, Lin Z H. Quantitative relationships for error rates. *J Metrology*, 1996, 17(3): 203-205.
- [42] 贾朋群. 近百年中国降水的测站资料和格点化资料对比. *应用气象学报*, 1999, 10(2): 181-189.
- Jia P Q. Comparison between observational data and grid data of precipitation for the last one hundred years in China. *J Appl Meteor Sci*, 1999, 10(2): 181-189.
- [43] 高洋, 蔡淼, 曹治强, 等. “21·7”河南暴雨环境场及云的宏微观特征. *应用气象学报*, 2022, 33(6): 682-695.
- Gao Y, Cai M, Cao Z Q, et al. Environmental conditions and cloud macro and micro features of “21·7” extreme heavy rainfall in Henan Province. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(6): 682-695.
- [44] 齐道日娜, 何立富, 王秀明, 等. “7·20”河南极端暴雨精细观测及热动力成因. *应用气象学报*, 2022, 33(1): 1-15.
- Chyi D, He L F, Wang X M, et al. Fine observation characteristics and thermodynamic mechanisms of extreme heavy rainfall in Henan on 20 July 2021. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(1): 1-15.
- [45] 中央气象局. 地面气象观测规范. 北京: 气象出版社, 2003.
- China Meteorological Administration. Standard for Ground-Based Meteorological Observations. Beijing, China Meteorological Press, 2003.

Comparison Experiment for Rainfall Observation of Micro-smart Weather Stations

Wang Zhenchao¹⁾²⁾ Chen Xuejiao¹⁾²⁾ Liu Shu¹⁾²⁾ Hua Jiajia¹⁾²⁾ Liu Wenzhong³⁾

¹⁾ (China Meteorological Administration Xiong'an Atmospheric Boundary Layer Key Laboratory,
Xiong'an New Area 071000)

²⁾ (Hebei Xiong'an New Area Meteorological Service, Xiong'an New Area 071000)

³⁾ (Hebei Meteorological Technology and Equipment Center, Shijiazhuang 050021)

Abstract

In order to enhance the understanding of rainfall observation performance of micro-smart (integrated) weather stations and to promote the application in rainfall observation operations, a comparative experiment for the rainfall observation of radar, photoelectric, piezoelectric and tipping bucket micro-smart weather stations is carried out by Hebei Xiong'an New Area Meteorological Service from June to November in 2021. The rainfall observation capability of micro-smart weather stations with different rainfall observation principles are analyzed in terms of total rainfall, rainfall intensity, percentage of rainfall intensity and temporal characteristics. It shows that when the accumulated precipitation exceeds 10 mm, the precipitation measured by the tipping bucket micro-smart weather station can meet observation error control requirements compared with the precipitation observed by the standard station, while results of the radar micro-smart weather station are large and results of the photoelectric and piezoelectric micro-smart weather stations are small. When the cumulative precipitation is less than 10 mm, results of the tipping bucket and piezoelectric micro-smart weather stations can meet observation error control requirements, while results of radar micro-smart weather stations are large and results of photoelectric micro-smart weather stations are small. In terms of rainfall intensity, the double tipping bucket station is suitable for monitoring rainfall extreme, while photovoltaic and piezoelectric stations underestimate the extreme. Radar-based micro-smart weather stations can be calibrated and revised for rainfall extreme monitoring by adjusting internal parameters. Analysis of different rainfall intensities and their corresponding rainfall ratios show that the rain intensity corresponding to a rain intensity accumulation ratio greater than 95% at each micro-smart weather station is $[0.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}, 0.6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}]$ and the rain intensity corresponding to a rainfall accumulation ratio greater than 50% is $[0.1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}, 0.4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}]$. It shows that within $0.4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, the proportion of rainfall measured by any type of rain sensor accounts for more than half of the total rainfall, so more attention should be paid to accuracy for small rain intensity in the operational rain sensor rate determination. As the resolving capacity increases, the tipping bucket type micro-smart weather station becomes less sensitive to the starting time and will identify the ending time earlier. The radar type micro-smart weather station responds to rainfall relatively more quickly. Finer resolving capacity of the rain sensor will enhance the monitoring effectiveness of fine rainfall and the effective rainfall rate.

Key words: micro-smart (integrated) weather stations; rainfall characteristics; field comparison observation