

全自动称重式雨量计的研制及性能分析

展小云^{1,2}, 赵军^{1,2}, 税军峰^{2*}, 赵向辉³, 郭明航^{1,2}

(1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100;
2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 3. 西安三智科技有限公司, 西安 710075)

摘要: 为了精准刻画降雨过程特征, 研制了一种具有野外复杂条件下普遍适用的全自动称重式雨量计, 该仪器以 STM32 单片机为核心, 利用 A/D 转换芯片对称重传感器的电压信号进行放大处理, 获取分辨率为 0.01 mm 的分钟级别的降雨数据。试验结果表明, 该雨量计测量标准差为 0.02 mm/min, 测量准确度最高为 98.67%, 说明该仪器监测精度高且适用范围广。称重式雨量计分辨率高, 对微小雨滴反应灵敏, 使得其监测结果较翻斗式雨量计大。此外, 利用称重式雨量计在王东沟小流域进行野外自然降雨观测, 发现该小流域自然降雨集中在 5—9 月, 主要以次降雨量 ≤ 5 mm 的降雨为主, 而次降雨量为 > 10~25 mm 的降雨对降雨总量贡献最大。该仪器可以实时准确地监测降雨全过程, 可为提高降雨监测技术的精准化和自动化水平提供参考。

关键词: 降水; 传感器; 雨量计; 自动化监测

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.19.014

中图分类号: S161; P426

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-19-0122-07

展小云, 赵军, 税军峰, 等. 全自动称重式雨量计的研制及性能分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 122-128.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.19.014 <http://www.tcsae.org>

Zhan Xiaoyun, Zhao Jun, Shui Junfeng, et al. Development and performance analysis of an automatic weighing rain gauge[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(19): 122-128. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.19.014 <http://www.tcsae.org>

0 引言

降雨作为水循环的关键组成部分, 是全球气候变化背景下重点关注的核心要素之一, 与农、林、牧等多个领域都密切相关^[1-2]。雨量计作为降雨监测的重要手段, 其精度高低直接影响着获取数据的可靠性, 因此, 雨量计精确与否, 对于开展天气预报、预防气象灾害、指导工农业生产、深入土壤侵蚀研究等至关重要^[3-4]。

目前国内外用于监测降雨的仪器从传统的人工观测雨量桶^[5]、翻斗式雨量计^[6-8]、虹吸式雨量计^[9-11]发展到基于敏感器件及电子技术的超声雨量计^[12-13]、光学式雨量计^[14-16]、压力式雨量计^[17-19]等多种类型的雨量监测仪, 为降雨的精准监测提供了多元化的选择。降雨发生的时间和空间具有很大的不确定性, 并且野外环境复杂, 使得现有的技术难以满足不同情境下的降雨准确监测要求^[20-22]。例如, 在水文站应用较多的虹吸式雨量计需要定期现场记录和人工维护, 难以达到遥测要求, 而且虹吸管容易被降尘污染导致虹吸失常, 精度低, 测量误差大^[11, 23-24]。翻斗式雨量计克服了虹吸式雨量计不易将降雨量信息进行

远距离传输的缺点^[25], 但是其存在异物易堵塞翻斗口、强降雨时翻斗翻转不及时等问题^[8, 26]。超声雨量计则由于超声波的传播速度受介质密度、浓度、外界温度等因素影响而发生折射和衰减现象, 其测量精度和准确性均较低^[27-28]。光学式雨量计和压力式雨量计测量误差主要由雨滴重叠跌落和信号噪声干扰引起的, 并且成本过于昂贵, 无法大面积布设^[15, 29-31]。可见, 已有雨量计测量精度容易受雨强大小影响, 测量范围小, 对强降水测量误差大。

近年来, 测量精度高、功耗小的 Pluvio 称重式雨量计被逐渐应用于降雨监测^[32-33]。Pluvio 雨量计的采样桶采用了敞开式设计, 所以必须加设风盾配件, 以消除风沙的影响。此外, 该仪器集成了温度传感器, 主要用于补偿平衡系统内的温度变化。但是, 该类仪器价格昂贵, 并且采样桶面积有 200 和 400 cm² 两种规格, 采样口径与中国的标准不一致。使用最受限的一点是该仪器不能有效地自动排水, 在采集的雨水达到采样桶总体积的 80% 时必须进行人工清洁, 如未及时倾倒采样桶内雨水, 则会造成雨量漏测。

为了实现降雨过程的连续化、自动化和精细化监测, 本研究将称重法和精准传感、自动测控等现代化科学技术相结合, 研制基于 STM32 单片机的全自动、高精度的降雨监测仪, 以期实现降雨过程观测和数据的远程传输, 为降雨监测的网络化提供新的技术手段, 提升国产仪器设备的研发能力。

1 材料与方法

1.1 测量原理及参数计算

称重式雨量计主要通过称重传感器测量测量舱中降

收稿日期: 2021-06-13 修订日期: 2021-09-15

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA20040202); 国家重点研发计划 (2017YFA0604803); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室重要方向创新项目 (A314021403-C3)

作者简介: 展小云, 博士, 副研究员, 研究方向为水土流失过程与水土保持。

Email: zhanxiaoyun2005@163.com

*通信作者: 税军峰, 博士, 助理研究员, 研究方向为科研信息化。

Email: jfshui@ms.iswc.ac.cn

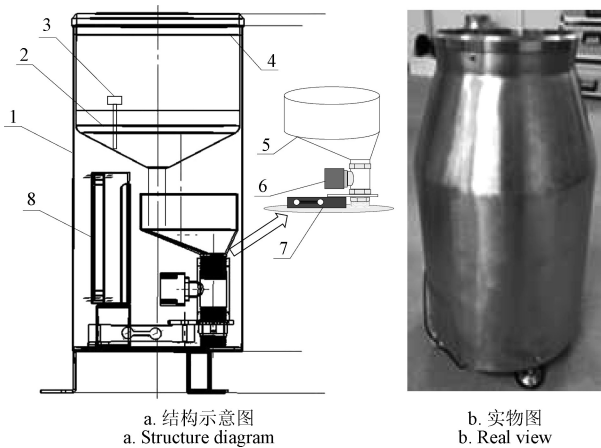
雨的质量数据，经信号放大处理后将质量数据实时返回至单片机 STM32 中，从而经过自动换算获得降雨量数据，并进行存储和远程无线传输。降雨量计算公式如下：

$$h = \frac{(G_h - G_0)}{\pi r^2 \rho} \times 10$$

式中 h 为降雨量，mm； G_h 为当前测量舱质量，g； G_0 为初始测量舱质量，g； r 为测量舱半径，cm； ρ 为水的密度，g/cm³；10 为换算系数。其中， ρ 一般取值为 1 g/cm³，但是为了提高测量结果的准确度， ρ 取温度传感器测得的实时水温所对应的水的密度。

1.2 仪器结构与组成

该雨量计主要由 3 部分构成，即采集系统、称重（质量）系统、测控系统，具体包括不锈钢筒体、盛雨器、温度传感器、测量舱、称重（质量）传感器、测控系统等（图 1a）。仪器的设计高度为 40 cm，外壳防护等级 IP54，电气防护等级 IP65，可适应降雨监测的恶劣环境。设备机架选用优质不锈钢 304，并采取焊接和刚性连接，以增加其光滑性和密闭性（图 1b）。仪器由太阳能电池（12V/200AH，光伏板 180 W）或 AC 220V/50HZ 市电供电。此外，仪器的监测数据会实时传输至站点/数据管理平台。



1.筒体 2.盛雨器 3.温度传感器 4.滤网 5.测量舱 6.排样开关 7.称重传感器 8.测控系统
1.Cylinder 2.Rain collector 3.Temperature sensor 4.Filter 5.Measuring chamber 6.Outlet switch 7.Weighing sensor 8.Measurement and control system

图 1 称重式雨量计结构图和实物图

Fig.1 Structure diagram and real view of weighing rain gauge

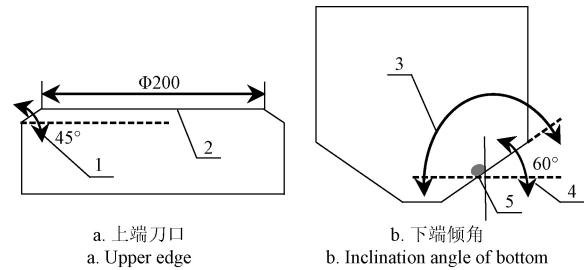
1.2.1 采集系统

样品采集部分主要由滤网、温度传感器和盛雨器组成。孔径为 2 mm 的滤网安装在筒体最上端，防止杂物进入盛雨器而造成管路堵塞。Pt100 温度传感器通过惠斯登电桥获取温度变化的电压信号，通过高精度运算放大器，输入到控制系统，并进行 24 位 A/D 转换，将电压信号解析出降水温度，降水密度则由实测的水的温度对应的水的密度进行实时矫正，以消除降水温度引起的误差，提高降雨量计算结果的准确性。样品采集所使用的盛雨器尺寸设计和传统雨量筒一致，直径为 20 cm。此外，为了提高测量结果的准确性，盛雨器的设计还考虑了以下几个因素：

1) 上端刀口设计：为了使不同大小的雨滴更精准地落入盛雨器中，设计了盛雨器和雨滴线性接触的 45° 倾斜角刀口（图 2a），最大程度地防止刀口切掉的雨滴溅到盛雨器中，确保盛雨器的有效采样直径为 20 cm。

2) 下端倾角设计：当水滴与盛雨器下端接触面形成的接触角大于 90° 时，则表现为疏水性，反之则表现为亲水性。如要确保雨滴降落到盛雨器后具有好的疏水性，只要满足接触角大于 90° 即可。盛雨器下端倾角设计为 60°，接触角为 120° 呈现疏水状态，而水滴前部的接触角大而后部的接触角小，均超过亲水性的临界接触角，使得雨滴自然流动，避免附着在盛雨器内壁（图 2b）。

3) 内壁表面处理：盛雨器内壁经过抛光表面光洁度达 0.8 以上，增加了雨滴的流动性，减少了雨滴挂壁现象。此外，盛雨器内壁上涂有低表面能的疏水材料，通过表面氟化处理，可以减少盛雨器表面浸湿和蒸发带来的测量误差。



a. 上端刀口 a. Upper edge b. 下端倾角 b. Inclination angle of bottom
1.刀口倾角 2.盛雨器直径 3.接触角 4.下端倾角 5.雨滴
1.Inclination angle of edge 2.Diameter of rain collector 3.Contact angle 4.Inclination angle of bottom 5.Raindrop

图 2 盛雨器刀口和倾角设计

Fig.2 Design of upper edge and inclination angle of rain collector

1.2.2 称重系统

称重系统主要是完成样品的测量，由导流管、测量舱、排样开关和称重传感器组成（图 1a）。导流管通径为 DN15，安装在盛雨器底端，紧贴测量舱的内壁，防止雨水流动对称重系统带来的扰动，同时把样品导入测量舱（图 1a）。测量舱容积为 1 L，口径为 10 cm，满舱时对应的降雨量为 30 mm。排样开关为铜质结构的电动球阀，采用螺纹连接置于测量舱底部，其运转为回转电动驱动，单次运转时间 4 s，1 L 样品完全排出（从排样开关开始开启到排样完成后排样开关完全关闭）所需时间约 10 s。排样开关设计有两个状态，一是排样开关处于开启状态，则执行排放样品的功能（开启动作执行时即可开始排样）；二是排样开关的处于完全关闭状态，则作为样品测量舱的下底使用。称重传感器选用 METTLE-TOLEDO 梁式传感器，其可实时将测量舱重量信号输出至 PLC 进口端，经处理后传输至数据处理系统。传感器量程为 5 kg，灵敏度为 (2±10%) mV/V，测量精度为 1/10 000，零点输出 ≤ ±10% R·C（额定载荷，Rated Capacity），工作温度为 -20~65 °C。此外，由于称重传感器处于长期压力状态而形成零基准点的漂移，为此需进行零点自动校正，使其测量更加精确。

1.2.3 测控系统

称重式雨量计采用 STM32 控制芯片，形成了集数据

采集、模型计算、数据处理、远程发送等功能为一体的测控系统。测控系统主要包括数据采集模块、软件系统构架智能运算控制模块、数据发送及储存模块、WIFI手机互联人机对话 APP 模块和数据通讯扩展模块(图3)。数据采集模块由称重传感器模块和 24 位 A/D 转换 HX711 模块组成。其中, A/D 转换芯片对称重传感器 mV 级电压信号进行采样放大, 采样频率 10 Hz, 128 倍增益放大, 使称重分辨率达到 0.01 g 以上。软件系统构架智能运算控制模块由 32 位 MCU STM32F107VCT6 控制模块组成, 是整个测控系统的中枢神经, 采用结构化程序设计, 运用 C 语言嵌入式开发系统编程, 通过智能优化设计进行雨量计的自动化和信息化控制。数据发送及储存模块包含 GPS/GPRS 模块参数和上位机云平台通讯设置及本地 USB 数据存储。在通讯信号较弱或无信号的偏远山区, 需要增加中继器或直接使用卫星通道, 以确保数据的远程传输, 但是成本将大大增加。WIFI 手机互联人机对话 APP 由安卓系统手机 APP 通过 WIFI 模式与系统相连, 可进行参数、功能、显示等通讯及操控。数据通讯扩展模块根据实际需要可进行扩展, 系统开放 RS485 通讯端口可与各种模块例如其他类型的雨量计进行对接。

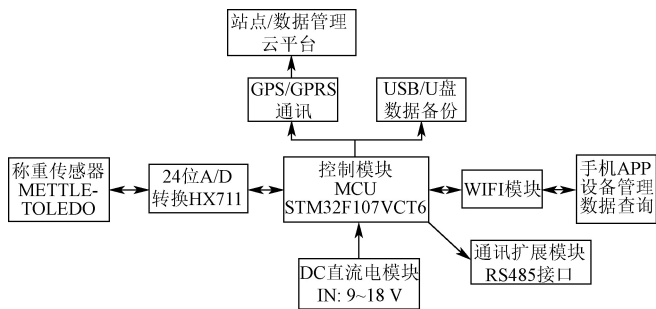


图3 测控系统结构图

Fig.3 Schematic diagram of measurement and control system

1.3 工作流程

仪器平时处于休眠状态, 一旦盛雨器接到降雨信号, 设备开始工作。仪器启动, 首先进行零点校正, 然后盛雨器收集的样品进入测量舱, 由称重传感器称取样品质量, 测控系统将质量值换算成降雨量值, 将测量的数据进行储存并实时传输至站点/数据管理云平台。若此后测量舱中样品继续增加, 直至其容积累计达到 1 L 时(测量舱最大量程), 测控系统则得到指令触发排样开关打开进行排样, 排样完毕后对测量舱进行称量, 确保排样干净, 从而进入下一个测量周期。测量时间间隔可设定为 1 min 测量一次(时间间隔可调, 需要根据降雨大小考虑测量频率和测量精度间的权衡)。以此类推, 周而复始, 直至 10 min 内称重传感器获取的样品质量增量 < 0.01 g, 则视为降雨结束, 仪器进入休眠状态。仪器工作流程如图 4 所示。

1.4 试验设计

1.4.1 标准样品法

蠕动泵可以精准地控制水流流速, 而称重式雨量计的采样面积已知, 因此可以通过控制蠕动泵的水流流速

设计不同的降雨强度情景。为了兼顾自然降雨和模拟降雨强度变化, 本研究设置了不同的标准降雨强度, 即 0.02、0.08、0.17、0.25、0.50、0.67、0.83、1.67 和 3.33 mm/min。其中, 0.83 mm/min 的降雨强度采用称重式雨量计重复测量 30 次, 对测量的结果进行 K-S (Kolmogorov-Smirnov) 检验判断测量结果是否属于正态分布, 并选取标准差作为衡量仪器测量精度的指标。此外, 其余降雨强度则重复测量 5 次, 采用相对误差来评价仪器测量的准确性。

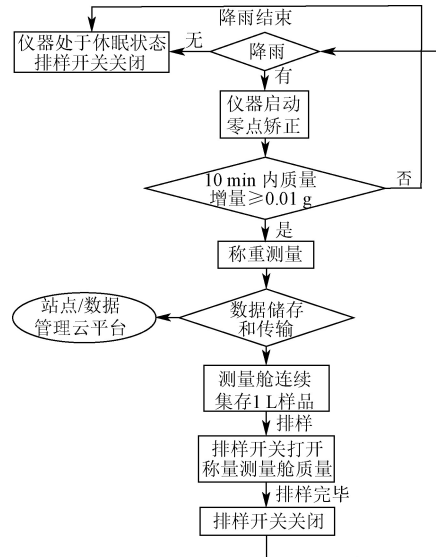


图4 工作流程

Fig.4 Flow chart for the operating procedure

1.4.2 翻斗式雨量计法

目前的降雨观测多采用翻斗式雨量计, 在本次检测中将翻斗式雨量计测得的结果与称重式雨量计的观测结果进行比较分析。本研究选取 JDZ05L 型翻斗式雨量计, 是国内水文部门常用的一款雨量计, 分辨率为 0.5 mm。在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室的模拟降雨实验大厅下喷区布设一个 3 m×6 m 雨量观测场, 称重式雨量计和翻斗式雨量计各 3 台, 成对等间距布设, 以排除单个雨量计测量代表性问题。利用以上两种雨量计同步观测某一未知降雨强度的模拟降雨, 降雨历时 60 min, 分析仪器开始/结束时间(以翻斗式雨量计工作时间为标准, 正值表示晚于翻斗式雨量计, 负值表示早于翻斗式雨量计)、有效降雨率(降雨时长内非零值的时长占降雨总时长的百分比)、降雨总量和降雨强度的差异。

1.4.3 自然降雨观测

通过以上方法验证仪器测量结果是否可靠的基础上, 为了检测称重式雨量计对野外复杂环境的适应性和运转情况, 利用该仪器在长武王东沟小流域进行自然降雨观测。王东沟小流域位于黄土高原南部地区, 海拔 940~1 220 m, 流域面积 8.3 km², 年平均气温 9.1℃, 属暖温带半湿润大陆性季风气候。仪器放置于王东沟小流域的裸地监测点(107°41'E, 35°14'N), 试验观测时间为 2020 年 1—12 月。

2 结果与分析

2.1 标准样品法

试验结果表明,称重式雨量计对 0.83 mm/min 的降雨强度重复测量的均值为 0.85 mm/min, 标准差为 0.02 mm/min (图 5a)。同时进行 K-S 检验, 得出样本的偏度值 (S) 和丰度值 (K) 分别为 0.31 和 -0.49, 均小于 1, 且 P 值为 0.15, 大于 0.05, 说明测量结果服从正态分布, 仪器测量精度高。此外, 在不同的降雨强度条件下对测

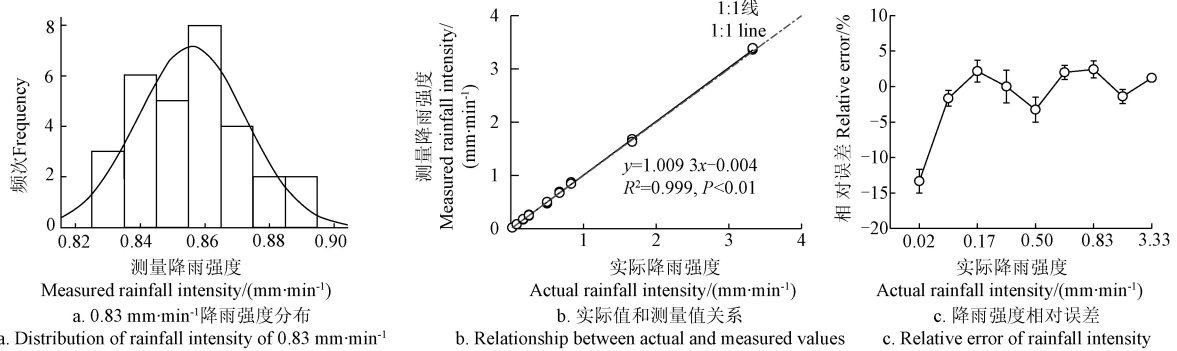


图 5 称重式雨量计精度和准确性检测
Fig.5 Precision and accuracy test for weighing rain gauge

2.2 翻斗式雨量计法

称重式雨量计和翻斗式雨量计的观测时间差为 3.5 min (表 1), 说明称重式雨量计对降雨响应较为灵敏。这主要是因为称重式雨量计的分辨率 (0.01 mm) 远远低于翻斗式雨量计的翻斗感量 (0.5 mm), 使得称重式雨量计在翻斗式雨量计达到 0.5 mm 之前已开始计量降雨, 而在降雨结束时, 翻斗式雨量计因未达到 0.5 mm 而不翻动, 导致称重式雨量计的开始时间比翻斗式雨量计早, 而结束时间比翻斗式雨量计晚。此外, 称重式雨量计的有效降雨率为 73.33%, 高于翻斗式雨量计的有效降雨率 56.67%, 可见, 随着雨量计分辨率的减小, 降雨监测的持续时间增加, 从而有效降雨率也增大。称重式雨量计测量的降雨总量为 28.24 mm, 高于翻斗式雨量计测得的结果 (27.20 mm) (表 1)。称重式雨量计测量结果偏大, 可能是因为它分辨率高达 0.01 mm, 对微小雨滴捕捉敏感, 可以更加精确地量化降雨特征。翻斗式雨量计测量结果比称重式雨量计结果偏低, 可能是其内部结构浸润损失、翻斗内雨量残留损失等造成的。相对于降雨总量, 两者测得的有效降雨率和最大降雨强度差异均较大, 这可能是因为本次模拟降雨强度较大, 使得翻斗翻转不及时或翻斗口比较浅造成大量溅水, 从而低估了有效降雨率和最大降雨强度。

表 1 翻斗式雨量计和称重式雨量计观测结果对比

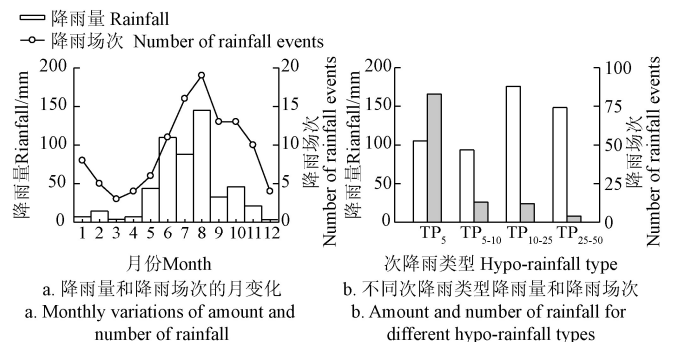
Table 1 Comparison of tipping bucket rain gauge and weighing rain gauge observation results

参数 Parameter	翻斗式雨量计 Tipping bucket rain gauge	称重式雨量计 Weighing rain gauge
开始时间 Start time/min	0 (基准)	-1.5
结束时间 End time/min	0 (基准)	2
有效降雨率 Effective rainfall rate/%	56.67	73.33
降雨总量 Total rainfall/mm	27.20	28.24
最大降雨强度 Maximum rainfall intensity/(mm·min ⁻¹)	0.50	0.56

量结果的准确性进行分析可知, 降雨强度的测量值和实际值回归系数接近 1, 决定系数高达 0.999 (图 5b)。此外, 分析测量结果的相对误差表明, 相对误差均值为 -1.32%, 最大为 -13.33%, 最高测量准确度可达 98.67%, 并且大部分相对误差较小且在 0 附近分布, 相对误差 < 5% 的样本占样本总数的 85% 以上 (图 5c)。可见, 称重式雨量计对降雨强度的观测是准确可靠的, 且适用观测范围较广。

2.3 自然降雨观测

在为期 1 a 的野外应用中, 仪器运转正常, 未出现堵塞、断电等情况。此外, 基于获取的观测数据可知, 2020 年王东沟小流域的降雨总量为 522.80 mm, 降雨主要集中在 5-9 月, 累计降雨量为 419.43 mm, 占年降雨总量的 80.23%, 仅 8 月份的降雨量最高达 144.82 mm (图 6a)。按降雨间隔时间不超过 6 h 划分为 1 次降雨事件^[34], 全年共计 112 场降雨, 8 月降雨频次最高, 7 月次之, 3 月最低 (图 6a)。单次最大降雨量为 48.82 mm, 最小为 0.23 mm。从降雨量场次分配来看, 全年以次降雨量 ≤ 5 mm 的降雨 (TP₅ ≤ 5 mm) 为主, 合计 83 场 (图 b), 占降雨总场次的 74.11%, 但是其累计降雨量较少, 仅为 105.22 mm, 占降雨总量的 20.13% (图 6b)。次降雨量为 > 5~10 mm 的降雨 (5 mm < TP₅₋₁₀ ≤ 10 mm) 和 > 10~25 mm 的降雨 (10 mm < TP₁₀₋₂₅ ≤ 25 mm) 场次相近,



注: TP₅ 为次降雨量 ≤ 5 mm 的降雨, TP₅₋₁₀ 为次降雨量 > 5~10 mm 的降雨, TP₁₀₋₂₅ 为次降雨量 > 10~25 mm 的降雨, TP₂₅₋₅₀ 为次降雨量 > 25~50 mm 的降雨。
Note: TP₅ is the rainfall of ≤ 5 mm; TP₅₋₁₀ is the rainfall of >5-10 mm, TP₁₀₋₂₅ is the rainfall of >10-25 mm, and TP₂₅₋₅₀ is the rainfall of >25-50 mm.

图 6 自然降雨统计特征
Fig.6 Statistics of natural rainfall

降雨量分别为 93.43 和 175.81 mm。次降雨量为 $>25\sim 50$ mm 的降雨 ($25\text{ mm}<TP_{25-50}\leq 50\text{ mm}$) 仅出现 4 场, 但是降雨量达到了 148.34 mm, 占降雨总量的 28.37%。可见, 该研究区域降雨主要以次降雨量 ≤ 5 mm 的降雨为主, 但是对降雨总量贡献最大的则为次降雨量为 $>10\sim 25$ mm 的降雨。

3 结 论

1) 基于称重法原理, 以 STM32 单片机为核心, 设计了集样品采集和测量、数据传输和计算、远程控制和诊断等功能为一体的称重式雨量计。该仪器结构简单, 便于携带, 运行成本低, 可以全天候无人值守, 智能化运行, 实现了降雨过程的实时、连续、自动测量, 数据传递快捷, 观测时间达到分钟级别, 分辨率可达 0.01 mm, 可以精细刻画降雨过程特征, 提升降雨过程监测的自动化和信息化水平。

2) 称重式雨量计精度和准确度检测试验表明, 仪器测量结果重复性好, 测量精度高, 降雨强度的真实值与测量值具有较好的一致性, 测量的相对误差均值仅为 -1.32% , 测量准确度最高为 98.67%, 并且相对误差小于 5% 的样本占样本总数的 85% 以上。

3) 与翻斗式雨量计观测结果比较表明, 称重式雨量计分辨率显著高于翻斗式雨量计, 使其开始工作时间比翻斗式雨量计早, 而结束时间滞后, 观测时间长 3.5 min, 并且测得的有效降雨率、降雨量和最大降雨强度均较大。

4) 利用称重式雨量计在王东沟小流域进行为期 1 a 的自然降雨观测, 发现全年降雨量为 522.80 mm, 降雨主要集中在 5—9 月, 且 8 月份的降雨量和降雨场次均最高。该地区的降雨主要以次降雨量 ≤ 5 mm 的降雨为主, 占降雨总场次的 74.11%, 而 $>10\sim 25$ mm 的次降雨对降雨总量贡献最大。

[参 考 文 献]

- [1] Michaelides S, Levizzani V, Anagnostou E, et al. Precipitation: Measurement, remote sensing, climatology and modeling[J]. Atmospheric Research, 2009, 94(4): 512-533.
- [2] Feng Y, Zhao X Y. Changes in spatiotemporal pattern of precipitation over China during 1980-2012[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73: 1649-1662.
- [3] Lanza L G, Vuerich E. 2012. Non-parametric analysis of one-minute rain intensity measurements from the WMO field intercomparison[J]. Atmospheric Research, 2012, 103: 52-59.
- [4] Gray B, Toucher M. Rain gauge accuracy at a high-altitude meteorological station in Cathedral Peak[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2019, 24(2): 04018064.
- [5] 冯讷敏. 雨量仪器综述[J]. 水利水文自动化, 1996(3): 1-6.
- [6] Molini A, La Barbera P, Lanza L G, et al. Rainfall intermittency and the sampling error of tipping-bucket rain gauges[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial and Planetary Science, 2001, 26(10/11/12): 737-742.
- [7] Tapiador F J, Turk F J, Petersen W, et al. Global precipitation measurement: methods, datasets and applications[J]. Atmospheric Research, 2012, 104/105(1): 70-97.
- [8] Mekkonen G B, Matula S, Dolezal F, et al. Adjustment to rainfall measurement undercatch with a tipping-bucket rain gauge using ground-level manual gauges[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2015, 127(3): 241-256.
- [9] Serra Y L, A'Hearn P, Freitag H P, et al. Atlas self-siphoning rain gauge error estimates[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2001, 18(12): 1989-2002.
- [10] 舒大兴, 王志毅. JSP-1 型虹吸校正翻斗雨量计研制与特点[J]. 水文, 2009, 29(6): 73-75.
Shu Daxing, Wang Zhiyi. Development of JSP-1-type tipping-bucket rainfall recorder by siphon correction[J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(6): 73-75. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李弘洋, 李青, 李雄, 等. 全自动远程虹吸式雨量计的研制[J]. 中国计量学院学报, 2010, 21(1): 34-37.
Li Hongyang, Li Qing, Li Xiong, et al. The development of automatic remote siphon rain gauges[J]. Journal of China University of Metrology, 2010, 21(1): 34-37. (in Chinese with English abstract)
- [12] 徐沾伟, 郑贵林. 基于声学自校正原理的超声式雨量计[J]. 自动化与仪表, 2012, 27(3): 13-15, 52.
Xu Zhanwei, Zheng Guilin. Ultrasonic rain gauge based on acoustic self-calibration principle[J]. Automation and Instrumentation, 2012, 27(3): 13-15, 52. (in Chinese with English abstract)
- [13] Zheng G L, Xu Z W, Ding L. An innovative principle in self-calibration by dual ultrasonic sensor and application in rain gauge[J]. Sensor Letters, 2013, 11(3): 617-621.
- [14] Kruger A, Krajewski W F. Two-dimensional video disdrometer: A description[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(5): 602-617.
- [15] Ellis R A, Sandford A P, Jones, G E, et al. New laser technology to determine present weather parameters[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(7): 1715-1722.
- [16] Carollo F G, Ferro V, Serio M A. Reliability of rainfall kinetic power-intensity relationships[J]. Hydrological Processes, 2017, 31: 1293-1300.
- [17] 张艳红, 刘兵武, 刘理天, 等. 一种新型硅基厚膜压力/温度传感器的设计和制作[J]. 传感技术学报, 2006, 19(6): 2376-2379.
Zhang Yanhong, Liu Bingwu, Liu Litian, et al. Design and

- fabrication of a novel silicon pressure/temperature microsensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(6): 2376-2379. (in Chinese with English abstract)
- [18] 蒋凯, 叶树明, 陈杭, 等. 适用于极端环境的高精度压力传感器开发与标定[J]. 传感技术学报, 2007, 20(10): 2230-2233.
Jiang Kai, Ye Shuming, Chen Hang, et al. Developing and calibrating of the high precision pressure sensor applied in extreme environment[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(10): 2230-2233. (in Chinese with English abstract)
- [19] 漆随平, 王东明, 孙佳, 等. 一种基于压力敏感元件的降雨传感器[J]. 传感技术学报, 2012, 25(6): 761-765.
Qi Suiping, Wang Dongming, Sun Jia, et al. The development of a novel automatic rainfall gauge based on the sensitive pressure sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(6): 761-765. (in Chinese with English abstract)
- [20] Overgaard S, EL-Shaarawi A H, Arnbjerg-Nielsen K. Calibration of tipping bucket rain gauges[J]. Water Science and Technology, 1998, 37(11): 139-145.
- [21] Vasvari V. Calibration of tipping bucket rain gauges in the Graz urban research area[J]. Atmospheric Research, 2005, 77(1/2/3/4): 18-28.
- [22] Habib E H, Meselhe E A, Aduvala A V. Effect of local errors of tipping-bucket rain gauges on rainfall-runoff simulations[J]. Journal of Hydrological Engineering, 2008, 13: 488-496.
- [23] 孙贵萍, 巨兰香. 自动传感雨量器与虹吸式雨量计对比分析[J]. 东北水利水电, 2014, 32(8): 36-37.
- [24] 曹洁, 高健, 帅立国, 等. 双桶双虹吸称重雨量计的测报系统设计[J]. 自动化仪表, 2010, 31(7): 72-74, 78.
Gao Jie, Gao Jian, Shuai Ligu, et al. Design of acquisition and transmission system of double-barrel and double-siphon weighing pluviometer[J]. Process Automation Instrumentation, 2010, 31(7): 72-74, 78. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李耀宁, 陶立新, 黄湘. 不同雨量计测值误差分析[J]. 气象科技, 2011, 39(5): 670-672.
Li Yaoning, Tao Lixin, Huang Xiang. Causal analysis of measurement difference between various rain gauges[J]. Meteorological Science and Technology, 2011, 39(5): 670-672. (in Chinese with English abstract)
- [26] 梁朝阳, 李清, 刘浏, 等. 翻斗式雨量计的误差分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2016, 33(1): 68-71.
Liang Chaoyang, Li Qing, Liu Liu, et al. Error analysis of tipping bucket rain gauge[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2016, 33(1): 68-71. (in Chinese with English abstract)
- [27] 洪峰. 基于气介式超声波传感器的雨量液位测量系统设计[J]. 现代电子技术, 2010, 33(23): 149-151, 157.
Hong Feng. Rainfall liquid level measuring system based on air-coupled ultrasonic sensor[J]. Modern Electronics Technique, 2010, 33(23): 149-151, 157. (in Chinese with English abstract)
- [28] 朱亚晨. 基于 STM32 的超声雨量计研制[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
Zhu Yachen. Development of Ultrasonic Rain Gauge Based on STM32[D]. Nanjing: Nanjing University of Information of Science & Techenology, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [29] 展小云, 郭明航, 赵军, 等. 基于粒子成像瞬态测量技术的雨滴微物理特性及降雨动能研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 107-113.
Zhan Xiaoyun, Guo Minghang, Zhao Jun, et al. Microphysical features of raindrop and rainfall energy based on particle imaging transient measurement technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(2): 107-113. (in Chinese with English abstract)
- [30] 唐慧强, 朱家聪. 基于无线传感网络的压力式雨量计[J]. 通信技术, 2009, 42(3): 247-248, 251.
Tang Huiqiang, Zhu Jiacong. Pressure pluviometer based on wireless sensor network[J]. Communications Technology, 2009, 42(3): 247-248, 251. (in Chinese with English abstract)
- [31] Zhan X Y, Zhao J, Feng Q, et al. Particle imaging auto-measurement system for microphysical characteristics of raindrops in natural rain[J]. Atmospheric Research, 2020, 242: 104963.
- [32] Milewska E J, Vincent L A, Hartwel M M, et al. Adjusting precipitation amounts from Geonor and Pluvio automated weighing gauges to preserve continuity of observations in Canada[J]. Canadian Water Resources Journal, 2019, 44(2): 127-145.
- [33] Saha R, Testik F Y, Testik M C. Assessment of OTT Pluvio(2) rain intensity measurements[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2021, 38(4): 897-908.
- [34] 殷水清, 王杨, 谢云, 等. 中国降雨过程时程分型特征[J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 617-624.
Yin Shuiqing, Wang Yang, Xie Yun, et al. Characteristics of intra-storm temporal pattern over China[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(5): 617-624. (in Chinese with English abstract)

Development and performance analysis of an automatic weighing rain gauge

Zhan Xiaoyun^{1,2}, Zhao Jun^{1,2}, Shui Junfeng^{2*}, Zhao Xianghui³, Guo Minghang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

3. Xi'an San Intelligent Technology Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: Precipitation has widely been recognized as a fundamental component of the global water cycle. Accurate measurement of precipitation is very necessary for the main input into hydrological models. Hydraulic structures are then required to adequately design for efficient management of water resources. Several types of automatic rain gauges have been used in recent years, such as ultrasonic and laser rain gauges, but tipping-bucket rain gauges are still the common choice. Particularly, the tipping-bucket rain gauge can provide a better temporal resolution for the rainfall intensity. However, questions still remain on the accuracy of graphical representation for the actual rainfall. In this study, a real-time and automatic monitoring instrument was developed for the weighing rain gauge with high precision for precipitation. Three parts were composed of collector, weighing, measurement, and control subsystem. These subsystems were applied to multi-scenario conditions and performed well under the complex field. As such, the instrument was able to realize sample collection and measurement, data transmission and calculation, remote control, and diagnosis synchronously, compared with the traditional. The A/D conversion chip was utilized in the STM32 single-chip microcomputer to amplify the voltage signal of the weighing sensor. Subsequently, two important parameters of rainfall and rainfall intensity were achieved at a minute level with a resolution of 0.01 mm. Finally, a peristaltic pump was selected to verify the calibration of the developed instrument. The target intensities of rainfall were set as 0.02, 0.08, 0.17, 0.25, 0.50, 0.67, 0.83, 1.67, and 3.33 mm/min. The samples with the rainfall intensity of 0.83 mm/min were measured 30 times, and the rest were run five times. The results showed that the average rainfall intensity was 0.85 mm/min, where the histograms of target rainfall intensity presented a normal distribution, indicating higher precision of developed instrument than before. The best fitting linear regression was also represented by a slope with the R^2 value close to 1. Additionally, the average error of the designed instrument was -1.32%, while the highest accuracy was 98.67%, and the relative error of less than 5% accounted for more than 85% of the total samples. The measured data of the developed instrument was also much larger than that of the tipping-bucket rain gauge under simulated rainfall conditions. The high resolution and sensitivity to light rain were contributed to the increase of effective rainfall rate and total rainfall. Finally, the performance of the developed instrument was verified under field conditions in the Wangdonggou watershed for one consecutive year. It was found that the annual rainfall was 522.80 mm, particularly concentrated from May to September. Correspondingly, the single rainfall ≤ 5 mm was the predominant contributor in natural precipitation, accounting for 74.11% of the total number of rainfall events, whereas, the single rainfall of $>10-25$ mm was the most important to total rainfall. Consequently, the self-designed instrument can widely be expected to automatically monitor the large variation of rainfall in most complex fields.

Keywords: precipitation; sensors; rain gauge; automatic monitoring