

雨滴物理特性的粒子成像测量技术研究*

郭明航^{1,2} 展小云^{1,2} 赵军^{1,2} 林奇³

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100;

3. 西安敦瑞测量技术有限公司, 西安 710065)

摘要: 雨滴形状、直径、降落速度等是表征雨滴特性的重要物理量。为了获取雨滴物理特性参数,基于粒子成像的瞬态测量可视化技术,研制了降雨环境下拍摄雨滴影像的光路系统和成像系统,开发了雨滴影像的识别、提取、量测等软件系统,设计了一种基于面阵电荷耦合元件的自然降雨成像测量系统。钢珠洒落实验发现该技术观测误差小。外场观测实验发现本次降雨主要以中等粒子为主,雨滴直径和降落速度均值分别为 2.00 mm 和 3.52 m/s。雨滴降落速度可由雨滴直径的线性回归方程表达,且该方程的预测准确度和精度较高。可见,该测量技术可以准确地获取雨滴物理特性参数,为降雨特征和土壤侵蚀研究开辟了新途径。

关键词: 雨滴 物理特性 粒子成像 土壤侵蚀

中图分类号: P426 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)09-0144-07

Measurement of Raindrop Physical Properties with Particle Imaging Measurement Technology

Guo Minghang^{1,2} Zhan Xiaoyun^{1,2} Zhao Jun^{1,2} Lin Qi³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Xi'an Dunrui Surveying Technology Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: The shape, diameter and fall velocity are the key physical characteristics of raindrops. Thus it is imperative that we begin to focus on the direction of physical characteristics of raindrops. In order to obtain physical properties of raindrops, light field and imaging system were designed based on the particle imaging transient visual measurement technology. The software for image identification, extraction and measurement were investigated, and a natural precipitation imaging measurement system based on a charge coupled device sensor was established. The result of the experiment on steel ball showed that the measurement technology had small relative error. By the field experiment, we found that medium-sized particles were the predominant contributor in the single rainfall, with the diameter of 2.00 mm and average fall velocity of 3.52 m/s. Mathematic model was developed to calibrate fall velocity and diameter by using linear regression, and the prediction accuracy and precision were reliable. In conclusion, characteristics of raindrops can be measured precisely by the proposed technology, which is a novel method for observing rainfall properties and further researching soil erosion.

Key words: Raindrop Physical property Particle imaging Soil erosion

收稿日期: 2014-12-22 修回日期: 2014-12-26

* 国家自然科学基金资助项目(41371278)和中国科学院科研装备研制资助项目(YZ201163)

作者简介: 郭明航,高级工程师,主要从事科研信息化与装备研究,E-mail: mhgao@ms.iswc.ac.cn

通讯作者: 赵军,高级工程师,主要从事科研信息化与装备研究,E-mail: zhaojun629@vip.sina.com

引言

雨滴是云中宏观、微观过程矛盾的最终产物,尽管雨滴直径通常不足 6 mm,但由于雨滴降落过程中通常具有较大的动能,其对土壤颗粒的打击力却很大,对土壤侵蚀过程中所造成的溅蚀量是不可忽略的^[1]。雨滴的物理特性是研究土壤水力侵蚀动力学过程、计算陆面过程中降雨侵蚀力等工作的基本依据,亦有助于解释云内成雨机制、评估人工增雨云水条件与效果检验,因此雨滴物理特性的研究受到了诸多学者的广泛重视^[2-4]。

反映雨滴物理特性的参数主要有雨滴形状、直径和降落速度等^[5]。近几十年来,国内外诸多学者对雨滴物理特性展开了大量研究,并取得巨大进展,使土壤侵蚀研究工作进入了定量分析阶段。长期以来,人们已经探索出多种雨滴物理特性的观测方法,常见的有色斑法^[6]、面粉团法^[7]、浸入法^[8]、动能冲量法^[9]、摄影法^[10]等。色斑法是基于“雨滴在同一材料上形成的色斑大小与雨滴的粒径大小呈正比”这一假定。该方法操作简便,成本低廉,至今仍被广泛应用^[11-12],但在实践中,雨滴溅落在滤纸上形成的是一群形状极不规则的带毛刺的图案,使得依据色斑形状估计雨滴粒径在很大程度上依靠主观经验。面粉团法是指用盛有面粉的容器接盛雨滴,雨滴渗入面粉形成面粉团,然后通过测量面粉团的质量来确定雨滴的大小。面粉团法须有高精度电子天平称量的过程,不适用于测量粒径太小的雨滴^[7, 13]。浸入法是用盛有油料的容器接盛雨滴,通过测量油中水珠直径来确定雨滴的大小,但是该方法仅适用于测量粒径较小的雾滴或雨滴^[8]。随着电子测量技术的发展,已可采用动能冲量传感器测量降雨场中传感器截面积上雨滴动能冲量^[9]。但由于冲量传感器受尺寸限制,雨滴测量截面积太小(几平方厘米),进而影响该方法雨滴测量的代表性和准确性;另有传感器表面积水,使得该方法无法进行连续观测。已有的摄影法可以直接获取雨滴影像,但是存在景深效应^[14],并且多局限于室内模拟降雨研究,而无法得到自然降雨条件下的雨滴物理特性^[10, 15]。可见,传统的雨滴物理特性测量方法普遍存在测量精度低、劳动强度高、测量实时性差、仅能进行个例研究等问题^[6, 16]。

近年来线阵扫描法被逐渐应用,与上述方法相比,该方法可以直接测量雨滴直径和速度,进而准确计算雨滴动能^[17-18]。但是此类方法仍存在不同程度的误差,例如:基于线阵扫描法的 OTT PARSIVEL 型激光雨滴谱仪^[19]、二维视频雨滴谱仪^[20]等可以

直接获取降雨粒子的剖面信息,但是雨滴降落速度是根据雨滴形状假设进行估计的,并且粒子穿过测量区域存在水平位移时会导致粒子图像的变形^[21];此外,此类方法采样空间小,对小粒子的探测能力较弱。例如,二维视频雨滴谱仪采用双线阵 CCD 和正交电路,采样面积仅为 100 mm × 100 mm,单个 CCD 线阵包含 512 个像元,最小分辨力为 0.19 mm。可见只有通过创新雨滴物理特性监测方法,才能进一步准确研究雨滴的物理特性。

为了实现雨滴的连续、自动化和精细化测量,在已有的基于线阵电荷耦合元件 (Charge coupled device, CCD) 扫描技术的基础上,采用改进的面阵 CCD 粒子成像测量技术,研制降雨环境下拍摄雨滴影像的光路系统和成像系统,基于计算机视觉识别技术开发雨滴影像获取、数字影像纠正、计算机图像深度处理等软件系统,并进行实际观测,重点分析雨滴直径和降落速度这 2 个雨滴物理特性参数,从而为推动土壤侵蚀及其控制机制的研究奠定基础。

1 工作原理与系统组成

1.1 工作原理

利用 CCD 工业相机所具有的高帧率、高分辨率、可控程等性能对降落雨滴进行快拍(曝光时间短)和慢拍(曝光时间长)操作,采集同一时刻的雨滴“静止”和“拖尾”影像,确定其在特定的时间序列上的空间位置和形状,进而解算雨滴直径和降落速度。

1.2 系统组成

雨滴物理特性的粒子成像测量系统由 3 个子系统组成,即投影系统、采集系统和采集控制系统,具体包括 6 个工作单元,分别为点光源、光学菲镜、投影幕布、CCD 工业相机、相机同步控制器和计算机终端,如图 1 所示。该系统可实现图像数据的实时

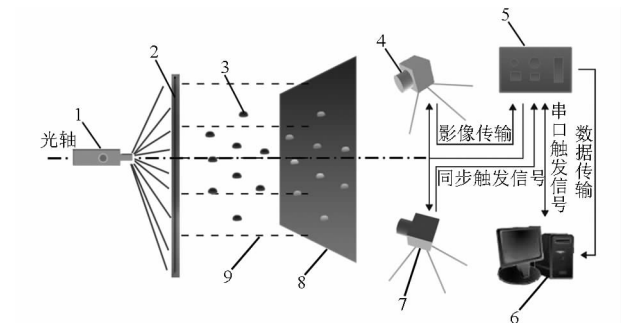


图 1 雨滴物理特性的粒子成像测量系统组成示意图
Fig. 1 Structural diagram of particle imaging measurement system for raindrop physical properties
1. 大功率点光源 2. 光学菲镜 3. 雨滴 4. 高速拍摄相机
5. 相机同步控制器 6. 影像采集控制解算计算机 7. 低速拍摄相机 8. 投影幕布 9. 观测现场

采集、信息提取、存储等功能。

1.2.1 投影系统

光学投影系统主要为采集系统提供一个可靠、稳定、足够强度的平行光场。该系统由 5 模块组成:飞利浦银战士卤素灯、焦距为 220 mm 的非涅尔聚光镜、H7 陶瓷耐高温插座、四芯防水接头、光学投影外壳和相关配件。飞利浦银战士卤素灯能够产生一种色温为 4 300 K 左右且光线指向性明显的白光,可近似为点光源;非涅尔聚光镜接受点光源发出的光后滤波成高亮度、高平行度的面光源(20 cm × 20 cm),进而照射观测视场(20 cm × 20 cm × 20 cm)。

1.2.2 采集系统

采集系统主要负责影像采集、触发信号接收、影像传输等。该系统由 2 台德国 BASLER acA 1600 - 20gm 型相机、RJ45 千兆网口防水接头、四芯防水接头、投影幕布、直流电源、采集模块外壳和相关配件组成。其中,2 台 CCD 工业相机分辨率为 1 624 像素 × 1 234 像素;投影幕布为灰白色,采用高透光性的 PVC 材质制成,厚度为 0.55 mm,可视角达 180°,增益系数为 2.0,光线可透性极强,足以保证画面的清晰度。雨滴通过观测视场的瞬间会在投影幕布上成像,相机在幕布的背后进行观测。投影幕布边缘布设一圈黑色的圆形标靶,一方面是为了检校相机,另一方面是为后期数字影像的纠正提供标准。采集系统的命令和数据的传输均采用 TCP/IP 网络协议、同步触发、千兆网硬件接口构建。

1.2.3 采集控制系统

采集控制系统是整个雨滴物理特性观测系统的中枢,主要用来管理影像采集模块,负责影像采集计算机的命令收发、管理、高效率数据传输等。采集同步控制模块由 D-Link 千兆五端口交换机、同步触发板、四芯航空接头、串口转换装置、采集同步控制模块外壳及相关配件组成。D-Link 千兆五端口交换机用于数字影像的高速传输、高低速相机的通信管理以及主控机的关联;同步触发板负责高、低速相机的供电、串口同步信号命令收发、采集帧率控制等。在采集过程中,操作人员把数字影像采集模块和影像采集控制计算机进行相应的连接,配合光学投影系统和影像采集系统即可进行雨滴物理特性观测。

2 数字影像解算

CCD 工业相机可以直接获取雨滴影像,但是影像照度太低,噪声太大。因此采用计算机视觉识别技术,根据雨滴区域和非雨滴区域的灰度差异、雨滴图形结构等特征量对雨滴和噪声进行辨识,继而勾画二值化的雨滴图形,在此基础上匹配快拍和慢拍

得到的同名雨滴影像,并设计合理的算法,确定雨滴的位置、形状和拖尾长度,最终解算雨滴的直径和降落速度。

2.1 影像提取

2.1.1 统计滤波

雨滴在观测视场中的出现是随机的,因此把雨滴的影像灰度视为随机变量,在一个很长的时间序列里探索该变量的统计特征,最终确定该像素亮度的分布为正态分布。在此基础上,计算图像空间上每个像素沿着时间轴的统计参数,然后用统计参数评估其出现的概率。本系统中,如果像素亮度的概率分布在 3 倍置信区间(99%)之外,则视为雨滴影像,否则为背景影像。通过统计滤波检测雨滴影像凸显,同时伴随着一些离散的、随机分布的噪点。

2.1.2 滚动滤波

离散的噪点在空间上的分布是随机的,因此一个随机的序列在排列上只要相差一个空间位置,他们的相似性就急速下降。利用这一特性,把统计滤波检测过程中判定为雨滴影像的像素值设为 1,其余为 0,然后分别在横轴和纵轴上把图像滚动 1 ~ 5 个像素,为了保证图像相似性的前提下最大程度地降低离散噪声的空间相似度,把滚动后的图像和原始图像相乘。在这一过程中离散的、随机的噪声被快速消除,而连续的、稳定的雨滴影像则得到保留。该算法类似于形态学中的腐蚀和膨胀,其利用了噪声孤立点的空间随机性和空间离散性,把带有离散噪声的图像作为一个冲击算子,具有很好地保护细节的特点。

2.1.3 邻域平滑滤波

滚动滤波处理后的影像仍有少量噪点残留。针对此类噪点,进行邻域平滑滤波,即利用 Box 模版(模版中所有系数都取相同值)对图像进行模版操作(卷积运算),其优点是算法简单、计算速度快。本系统中选择 11 × 11 的邻域大小进行如上操作。

2.1.4 二值化

经过上述滤波处理后的影像,采用全局二值化方法勾画二值化的雨滴影像,即设定一个全局的阈值。本系统中把阈值设置为最大像素亮度和最小像素亮度之和的一半,将大于该阈值的像素群的像素值设定为白色,小于该阈值的像素群的像素值设定为黑色。在此基础上,利用“凸包问题”算法,遍历整个雨滴影像区域,逐像素比较,最终得到二值化的雨滴影像。

2.2 同名雨滴的辨识

快拍和慢拍会生成 2 张雨滴影像,利用观测视场布设的定位标靶,将快拍得到的“静止”雨滴影像

和慢拍得到的“拖尾”雨滴影像归一化到同一坐标系中,这样同一雨滴就会重叠,并且雨滴的“拖尾”部分也会显示出来,之后根据雨滴影像的几何形态便可辨识同名雨滴。雨滴影像示意图如图 2 所示,其中,图 2a 为高速快门拍摄时的“静止”雨滴影像,图 2b 是低速快门拍摄时的“拖尾”雨滴影像。

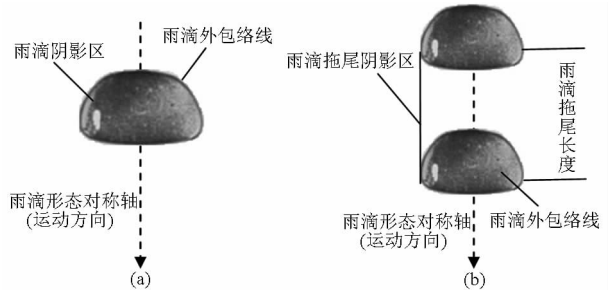


图 2 雨滴影像示意图

Fig. 2 Schematic diagram of raindrop image
(a) “静止”影像 (b) “拖尾”影像

2.3 物理特性参数计算

2.3.1 直径

为了准确计算雨滴直径,尝试了 2 种解算方法,即等效圆面积变换算法和几何均值算法。前者是指将“静止”的雨滴形状近似为圆形,将闭包面积视为圆面积,反推对应圆的直径作为雨滴直径。几何均值算法是指在“静止”的雨滴轮廓上寻找距离最远的 2 个点,其连线作为雨滴最大直径,经该直径的中点作垂线,交于雨滴轮廓上 2 点,该 2 点之间的距离即为雨滴第 2 直径,最大直径和第 2 直径的几何均值即为雨滴直径。相对于等效圆面积变换算法而言,后者计算流程简单,在平面上充分利用了几何均值的特点,误差较小,因此本研究采用几何均值算法计算雨滴直径。

2.3.2 降落速度

雨滴的降落过程虽然是一个变加速的过程,但是由于本研究中采用的是一种瞬态测量可视化技术,因此雨滴近地面的降落过程可视为匀速过程。“拖尾”雨滴影像与同名“静止”雨滴影像之间的相位差即为该雨滴的移动距离,用该距离除以快拍和慢拍相机的曝光时间差就可得到雨滴降落速度。因此,计算雨滴降落速度的重点在于计算雨滴移动距离。本研究中设计了 2 种雨滴移动距离计算方法:外轮廓线提取算法和中心连线算法。前者通过提取雨滴轨迹的外包络线,进而形成一个闭包,该闭包的主轴即为雨滴的拖尾长度,该长度减去对应的“静止”雨滴的直径即为雨滴的移动距离。后者认为雨滴移动轨迹的重心将以最大的概率位于“拖尾”雨滴形状的中心点,视雨滴为匀速运动,那么雨滴重心点和轨迹重心点的连线即为雨滴移动距离的一半。

前者与数字影像的处理流程结合紧密,其在雨滴二值化的过程中便可提取雨滴的外包络线,使得该算法计算效率较高,因此采用该算法计算雨滴降落速度。

3 实例分析

3.1 观测方法的精度和准确度检测

为检测雨滴物理特性观测方法的精度和准确度,进行了钢珠洒落实验。实验采用直径为 2.0、2.5、3.0 mm 的 3 种标准球形钢珠,分别在距离观测设备 1.70 m、2.45 m 和 3.00 m 高度处以初速度为零洒落,每种规格的钢珠在不同的高度上重复 3 次,观测钢珠在各种情形下的直径和下落速度。由于钢珠是以初速度为零洒落,视钢珠为自由落体,其在任一时刻的理论降落速度为

$$V_t = \sqrt{2gh}$$
 (1)

式中 V_t ——钢珠理论降落速度,m/s
 h ——洒落高度,m
 g ——重力加速度,m/s²

将钢珠的实际直径、理论降落速度与粒子成像测量方法的结果进行对比分析(表 1),结果表明钢珠直径相对误差波动范围为 1.32% ~ 6.36%,均值为 3.71%;钢珠降落速度相对误差最大值为 9.65%,最小值为 0.28%,均值为 2.83%。另外,对钢珠样本进行了直径和降落速度相对误差频率分布分析(图 3),发现大部分样本直径和降落速度的相对误差较小,在 3 555 个检测样本中,有 2 756 个样本直径的相对误差在 10% 以下,占样本总数的 78%,同时有 84% 的样本,其降落速度相对误差小于 5%。以上结果表明,该测量方法对检验样本数据的预测准确度达到了较高水平,可准确地监测降雨过程中的雨滴物理特性。

3.2 自然降雨的实测分析

3.2.1 实验设计与统计分析

在 2014 年 9 月 20 日下午 14:00—15:00 时间段内利用该系统采集雨滴影像,从降雨开始至降雨结束进行全程的数字影像采集。高速相机和低速相机采集帧率均为 20 帧/s,曝光时间分别为 1/4 000 s 和 1/500 s。图 4 为采集并处理后的“静止”和“拖尾”雨滴影像,可以看到,雨滴影像具有清晰的边缘和轮廓,据此可以计算雨滴直径和降落速度。

数据采用 SPSS 软件进行统计分析,利用 SigmaPlot 软件进行制图。数学模型的建立和检验的具体步骤为:将 646 个雨滴测量结果按雨滴直径大小排序,并按奇偶编号分为 2 个数据样本,这样可使建模和检验样本都能覆盖雨滴直径变化的动态范

表 1 实物观测与粒子成像测量结果对比
Tab.1 Comparison of actual and measured values

样本数	高度/m	直径			降落速度		
		真实值/mm	测量值/mm	相对误差/%	理论值/(m·s ⁻¹)	测量值/(m·s ⁻¹)	相对误差/%
500	1.70	2.0	2.03 ± 0.24	1.32	5.77	5.22 ± 0.15	9.65
498	2.45	2.0	2.12 ± 0.28	6.09	7.00	7.02 ± 0.17	0.35
515	4.00	2.0	2.13 ± 0.19	6.36	8.85	8.57 ± 0.15	3.26
512	1.70	2.5	2.57 ± 0.10	2.68	5.77	5.72 ± 0.09	0.90
507	2.45	2.5	2.59 ± 0.05	3.72	7.00	7.02 ± 0.05	0.28
212	4.00	2.5	2.63 ± 0.16	5.20	8.85	8.66 ± 0.01	2.22
318	1.70	3.0	2.90 ± 0.16	3.33	5.77	5.69 ± 0.01	1.43
278	2.45	3.0	2.93 ± 0.11	2.35	7.00	6.67 ± 0.01	4.76
215	4.00	3.0	2.93 ± 0.13	2.36	8.85	8.63 ± 0.01	2.53

注:表中测量值为均值 ± 标准差。

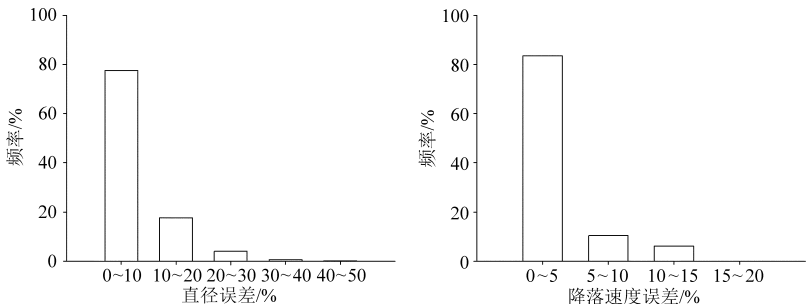


图 3 钢珠直径和降落速度相对误差的频率分布

Fig.3 Histogram for relative error of diameter and fall velocity of steel ball

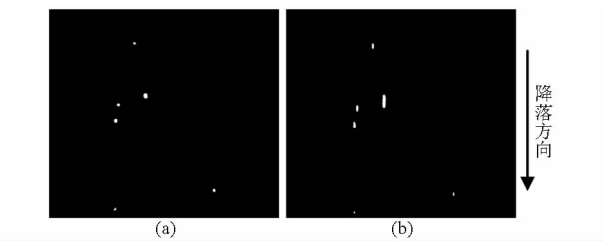


图 4 雨滴数字化影像

Fig.4 Digital images of raindrop

(a) “静止”影像 (b) “拖尾”影像

围,提高模型预测精度。其中单数用于建立关系,双数用作样本检验^[22]。雨滴降落速度与雨滴直径采用线性拟合,并用实测的雨滴降落速度数据检验预测模型,用计算均方差(Root mean squared error, V_{RMSE})、预测精度(Prediction accuracy, V_{PA})与相对误差(Relative error, V_{RE})来评价预测模型。上述参数计算公式为

$$V_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n}}$$
 (2)

$$V_{PA} = \left(1 - \frac{V_{RMSE}}{V_{mean}}\right) \times 100\%$$
 (3)

$$V_{RE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - \hat{x}_i}{\hat{x}_i} \right|$$
 (4)

式中 x_i ——模拟值 $\hat{x}_i$ ——实测值

V_{mean} ——模拟的均值

n ——样本数量

3.2.2 雨滴物理特性参数分析

表 2 给出了雨滴直径和降落速度的统计特征。由表 2 可以看出,雨滴分布以中等粒子为主,即直径

表 2 雨滴直径和降落速度的描述性统计

Tab.2 Descriptive statistics for diameter and fall velocity of raindrop

参数	最大值	最小值	均值	中位数	标准差
直径/mm	4.03	0.31	2.00	2.01	0.03
降落速度/(m·s ⁻¹)	8.03	0.05	3.52	3.42	0.07

在 1.0 ~ 3.0 mm 范围内的雨滴占样本总数的 86.53%,而小雨滴(直径小于 1.0 mm)和大雨滴(直径大于 3.0 mm)分别占样本总数的 7.74% 和 5.73%。雨滴直径波动范围为 0.31 ~ 4.03 mm,均值为 2.00 mm,其变异系数为 1.33%。雨滴降落速度波动范围为 0.05 ~ 8.03 m/s,均值为 3.52 m/s,变异系数为 2.10%。雨滴降落速度随着雨滴直径的增大呈显著的线性增加趋势($R^2 = 0.8585$, $P < 0.001$) (图 5)。本文进行线性拟合后得到降落速度经验关系式为

$$V = 2.5746D - 1.6443 \quad (R^2 = 0.8585, P < 0.001)$$
 (5)

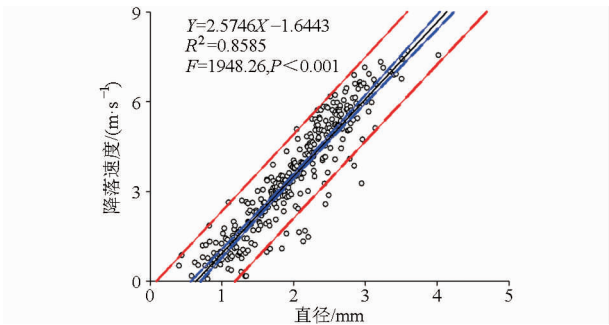


图5 雨滴直径与降落速度的关系

Fig. 5 Raindrop diameter versus fall velocity

式中 V ——雨滴降落速度, m/s
 D ——雨滴直径, mm

该经验方程适用范围为 $0.31\text{ mm} < D < 4.03\text{ mm}$, 对于较小或较大的雨滴该方程均不适用。本文拟合得到的速度略小于文献[23] ($V = 9.65 - 10.3e^{-0.6D}$) 和文献[24] ($V = -0.1021 + 4.932D - 0.9551D^2 + 0.07934D^3 - 0.002362D^4$) 经验关系拟合得到的速度, 这可能是由于仪器本身的架构造成的, 即在仪器采样空间会出现空气扰流或乱流, 从而影响原有的雨滴速度。基于实测的 323 个检验样本的雨滴直径, 利用式(5)计算对应的雨滴降落速度, 然后与实测值进行回归分析, 结果见图 6。由图 6 可以看出, 雨滴降落速度的测量值与模拟值的线性回归方程的斜率高达 0.88, 表明实测值与预测值吻合较好。雨滴直径对雨滴降落速度的预测精度和相对误差分别为 82.96% 和 27.07%。

4 结论

(1) 提出了一种利用精密控制曝光时间的 CCD 工业相机对雨滴直径和降落速度进行同步观测的粒子成像测量方法, 与传统的测量方法相比, 该方法中的观测仪器便携, 操作简单, 软件功能完整, 实现了软件硬件一体化, 可以在不同的降雨强度下监测得到高清晰度的雨滴影像, 在此基础上准确高

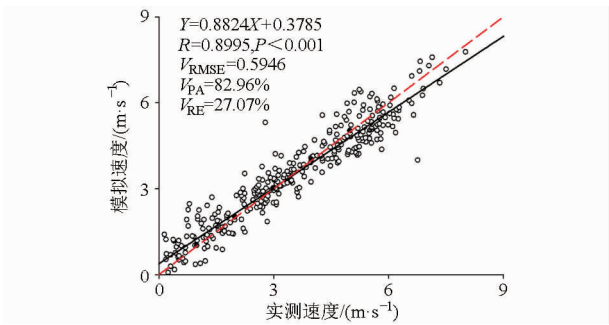


图6 雨滴降落速度实测值与模拟值的关系

Fig. 6 Actual and predicted values of raindrop fall velocity

效的解算雨滴物理特性参数。

(2) 钢珠直径的相对误差均值为 3.71%, 其中相对误差在 10% 以下的样本数占样本总数的 78%; 钢珠降落速度的相对误差均值为 2.83%, 相对误差在 5% 以下的样本数占样本总数的 84%。该结果表明粒子成像测量技术观测误差较小, 可有效、快速、经济地观测雨滴物理特性参数。

(3) 通过外场观测实验研究雨滴直径和降落速度, 结果发现本次降雨的雨滴直径主要以中等粒子为主, 即直径在 1.0 ~ 3.0 mm 范围内的雨滴占样本总数的 86.53%, 雨滴直径和降落速度均值分别为 2.00 mm 和 3.52 m/s。

(4) 得出了具有本地化特征雨滴物理特性参数, 在此基础上发现雨滴降落速度随着雨滴直径的增大呈显著的线性增加趋势, 进而建立了雨滴降落速度经验方程。本研究得出的模拟方程其适用范围较小 ($0.31\text{ mm} < D < 4.03\text{ mm}$), 而对于较小或较大的雨滴该方程均不适用。

(5) 利用这一测量技术, 还可以对雪花、冰雹、霰等不同类型降水粒子的物理特性进行测量, 不仅可以揭示不同降水粒子的物理特征, 而且有助于促进降水微观特征在降水特征、土壤侵蚀及其控制机制评估等方面的应用, 因此该技术具有一定的应用前景。

参 考 文 献

1 孙泉忠, 王朝军, 赵佳, 等. 中国降雨侵蚀力(R)指标研究进展 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(4): 1-5.
Sun Quanzhong, Wang Chaojun, Zhao Jia, et al. Research evolution of rainfall erosivity (R) in China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(4): 1-5. (in Chinese)

2 Schuur T J, Rzhkov A V, Zrníc D S, et al. Drop size distributions measured by a 2D video disdrometer: comparison with dual polarization radar data [J]. Journal of Applied Meteorology, 2001, 40(6): 1019-1034.

3 Szakall M, Mitra S K, Diehl K, et al. Shapes and oscillations of falling raindrops—a review [J]. Atmospheric Research, 2010, 97(4): 416-425.

4 刘西川, 高太长, 刘磊, 等. 雨滴微物理特征研究及测量技术进展 [J]. 地球科学进展, 2013, 28(11): 1217-1226.
Liu Xichuan, Gao Taichang, Liu Lei, et al. Advances in microphysical features and measurement techniques of raindrops [J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(11): 1217-1226. (in Chinese)

5 Michelides S. Precipitation: advances in measurement, estimation, and prediction [M]. Berlin: Springer, 2008.

6 李红, 任志远, 袁寿其, 等. 高度对色斑法测量雨滴粒径影响的试验研究 [J]. 中国农村水利水电, 2006(1): 16-17.

- Li Hong, Ren Zhiyuan, Yuan Shouqi, et al. Experimental study on the height effect on raindrop size in splash method [J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(1): 16–17. (in Chinese)
- 7 刘素媛, 聂振刚. 辽西低山丘陵半干旱地区天然降雨雨滴特性研究初报 [J]. 中国水土保持, 1988(2): 15–17.
- Liu Suyuan, Nie Zhengang. Study on the characteristics of raindrops of natural precipitation in semi-arid rolling country in W. Liao Ning [J]. Soil and Water Conservation in China, 1988(2): 15–17. (in Chinese)
- 8 Mccool D K. Personal Communication [Z]. USDAARS, Agricultural Engineering Department, Washington State University, Pullman, 1982: 67–82.
- 9 王礼先. 侵蚀指数微分算法 [J]. 中国水土保持, 1987(7): 5–6.
- Wang Lixian. Differential algorithm of erosion indices [J]. Soil and Water Conservation in China, 1987(7): 5–6. (in Chinese)
- 10 Szakall M, Diehl K, Mitra S K, et al. A wind tunnel study on the shape, oscillation, and internal circulation of large raindrops with sizes between 2.5 and 7.5 mm [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 66(3): 755–765.
- 11 张颖, 谢宝元, 余新晓, 等. 黄土高原典型树种幼树冠层对降雨雨滴特性的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(4): 70–76.
- Zhang Ying, Xie Baoyuan, Yu Xinxiao, et al. Influence of young growth canopy of several typical tree species on rainfall characteristics in the Loess Plateau [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(4): 70–76. (in Chinese)
- 12 吴光艳, 吴发启, 尹武君, 等. 陕西杨凌天然降雨雨滴特性研究 [J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 48–51.
- Wu Guangyan, Wu Faqi, Yin Wujun, et al. Study on characteristics of natural rainfall in Yangling, Shaanxi Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(1): 48–51. (in Chinese)
- 13 周伏建, 黄炎和. 福建省天然降雨雨滴特征研究 [J]. 水土保持学报, 1995, 9(1): 8–12.
- Zhou Fujian, Huang Yanhe. Study on the characteristics of raindrops of natural precipitation in Fujian [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9(1): 8–12. (in Chinese)
- 14 Saylor J R, Jones B K, Bliven L F. A method for increasing depth of field during droplet imaging [J]. Review of Scientific Instruments, 2002, 73(6): 2422–2427.
- 15 Baumgardner D, Kok G, Dawson W, et al. A new ground based precipitation spectrometer: the meteorological particle sensor (MPS) [C]//The 11th Conference on Cloud Physics, American Meteorological Society, 2002.
- 16 徐向舟, 张红武, 朱明东. 雨滴粒径的测量方法及其改进研究 [J]. 中国水土保持, 2004(2): 22–25.
- Xu Xiangzhou, Zhang Hongwu, Zhu Mingdong. Study on measuring method of particle size of raindrop and its improvement [J]. Soil and Water Conservation in China, 2004(2): 22–25. (in Chinese)
- 17 濮江平, 张伟, 姜爱军, 等. 利用激光降水粒子谱仪研究雨滴谱分布特性 [J]. 气象科学, 2010, 30(5): 701–707.
- Pu Jiangping, Zhang Wei, Jiang Aijun, et al. Characteristics of gamma raindrop size distribution based on the precipitation particle spectrometer [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2010, 30(5): 701–707. (in Chinese)
- 18 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, 2011, 6(6): 403–408.
- Yu Dongsheng, Xu Qingshan, Xu Chidong, et al. Progress of measurement of raindrop size distribution [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2011, 6(6): 403–408. (in Chinese)
- 19 Löffler-Mang M, Joss J. An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2000, 17(2): 130–139.
- 20 高太长, 江志东, 刘西川, 等. 线阵光学降水现象自动测量系统 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(10): 2184–2191.
- Gao Taichang, Jiang Zhidong, Liu Xichuan, et al. Optical precipitation auto-measurement system based on linear image sensor [J]. Optics and Precipitation Engineering, 2012, 20(10): 2184–2191. (in Chinese)
- 21 Nespor V, Krajewski W F, Kruger A. Wind-induced error of raindrop distribution measurement using a two-dimensional video disdrometer [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2000, 17(11): 1483–1492.
- 22 翁永玲, 宫鹏. 黄河三角洲盐渍土盐分特征研究 [J]. 南京大学学报, 2006, 42(6): 602–610.
- Weng Yongling, Gong Peng. Soil salinity measurements on the Yellow River Delta [J]. Journal of Nanjing University, 2006, 42(6): 602–610. (in Chinese)
- 23 Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence [J]. Reviews of Geophysics, 1973, 11(1): 1–35.
- 24 Brandes E A, Zhang G, Vivekanandan J. Experiments in rainfall estimation with a polarimetric radar in a subtropical environment [J]. Journal of Applied Meteorology, 2002, 41(6): 674–685.