

基于粒子成像技术的陕南地区降雨雨滴特征分析

冯倩¹, 展小云^{1,2}, 郭明航^{1,2}, 赵军^{1,2}, 刘宝元^{1,2}

(1.西北农林科技大学 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; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为了研究陕南地区自然降雨雨滴特征,利用自主研发的粒子成像瞬态测量可视化仪对陕南地区宁强县次降雨进行了观测分析。结果表明:雨滴平均直径为1.08 mm,平均终点速度为3.92 m/s,平均雨滴数密度为141.63个/m³。该次降雨过程中直径0~1 mm的雨滴数密度最大,占到总雨滴数密度的67.22%。直径1~2 mm的雨滴对降雨量的贡献率最大,达到59.31%。实测雨滴谱呈单峰结构,其中大雨及以上的雨滴谱最宽,其次为中雨,小雨的雨滴谱最窄。降雨强度波动范围为0.11~10.95 mm/h,在很大程度上受雨滴大小和数目的双重影响。该次降雨中雨滴直径与雨滴终点速度间存在密切的对数关系,其拟合曲线与Atlas-Ulbrich关系曲线非常相似。综上所述,该次降雨平均雨滴数密度相比南方地区较小,直径小于2 mm的雨滴对该次降雨贡献最大。实测雨滴谱宽度受降雨强度影响,随降雨强度的增大而增大。雨滴大小和数目共同决定降雨强度大小。雨滴直径与雨滴终点速度间关系与常用的经验关系相似。

关键词:雨滴直径;雨滴终点速度;雨滴数密度;降雨强度

中图分类号:P426.62; S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0097-08

Analysis of Raindrop Characteristics of Natural Rainfall in Southern Shaanxi Based on Particle Imaging Technology

FENG Qian¹, ZHAN Xiaoyun^{1,2}, GUO Minghang^{1,2}, ZHAO Jun^{1,2}, LIU Baoyuan^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to study the raindrop characteristics of natural rainfall in southern Shaanxi, in-situ measurement for raindrop characteristics of natural precipitation was conducted in Ningqiang County, Shaanxi Province using a self-developed particle imaging transient measurement instrument. The results show that raindrop diameter, terminal velocity and the number concentration of raindrop are, on average, 1.08 mm, 3.92 m/s and 141.63 Pcs/m³, respectively. Additionally, it can be found that 67.22% of the total number concentration of raindrop is characterized by raindrop diameter less than 1 mm. The largest contribution to rainfall intensity is the raindrops with diameters of 1~2 mm, accounting for 59.31%. For all types of rainfall, the measured raindrop spectrums exhibit the single peaks, which is in good agreement with M-P distribution. Specifically, the spectrum width of heavy rain or above is the widest, followed by the moderate rain and then the light rain. The rainfall intensity decreases gradually, which varies from 0.11 mm/h to 10.95 mm/h. Moreover, there is a remarkable logarithmic relationship between raindrop diameter and terminal velocity, which is very similar to the results of the Atlas-Ulbrich curve. In summary, the number concentration of raindrop is smaller than that in the southern region of China, and raindrops with diameter of less than 2 mm are the main predominant contributor. The spectrum width increases with the increase of rainfall. Additionally, the size and number of raindrops codetermine the rainfall intensity. Moreover, the relationship

收稿日期:2020-08-03

修回日期:2020-09-12

资助项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA20040202);中国科学院“十三五”信息化专项科学大数据工程项目(XXH13505-07);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)

第一作者:冯倩(1996—),女,山西临汾人,硕士研究生,研究方向为雨滴物理特性对土壤侵蚀影响。E-mail:fengq75@163.com

通信作者:刘宝元(1958—),男,陕西佳县人,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:baoyuan@bnu.edu.cn

between raindrop diameter and terminal velocity is very similar to the common curve.

Keywords: raindrop diameter; raindrop terminal velocity; the number concentration of raindrop; rainfall intensity

根据第一次全国水土保持情况普查结果可知,中国是水土流失较为严重的国家之一,水力侵蚀面积占到土壤侵蚀总面积的 43.84%^[1]。水土流失已经成为中国生态环境的严重问题,不但导致土壤退化、土地生产力下降,而且对人类的日常生活环境亦带来严重影响^[2-3]。引发水力侵蚀过程的基础破坏力为降雨,其可形成地表径流并提供地表发生侵蚀的水动力条件,被认为是侵蚀过程中的重要驱动力^[4-5]。水力侵蚀强度、分布特征以及发生频次等都与降雨特征联系十分紧密。以往有研究表明,降雨对地面的打击作用随着降雨强度的增大而增强,并且溅蚀量达到峰值的时间会随着降雨强度的增大而缩短^[6]。此外,当降雨长时间持续对地表进行打击时,表层土壤会变紧实,导致其渗透性减弱,溅蚀强度亦减弱^[7]。可见,多数研究对降雨量、降雨强度及历时等因素关注较多,对雨滴物理特性关注较少。而雨滴作为降雨的基本单元,所产生的能量会对地表土壤结构造成破坏,其对土壤侵蚀的影响同样是不可忽略的^[8]。

由于受监测技术的限制,雨滴直径、终点速度、降雨动能等对水力侵蚀影响的研究相对较少,从而导致土壤侵蚀发生发展过程和机理研究存在不确定性^[9-10]。近年来,利用自动化测量技术发展起来的线阵扫描法可以直接测量粒子大小、形状、速度等特征,从而使得雨滴特征的精确测量成为可能^[11-12]。因此,基于线阵电荷耦合元件(charge coupled device, CCD),我们利用改良后的面阵 CCD 粒子成像测量技术,自主研发了雨滴粒子成像瞬态测量可视化仪,其拥有采样空间大,测量误差小,快速准确且实时地观测雨滴大小、终点速度等雨滴物理特性的优点^[13],为水力侵蚀动力学过程研究提供了新的技术手段。

陕南地区土质疏松,透水性良好,抗冲蚀能力差^[14]。宁强县植被覆盖度小,坡耕地面积占比较大,其水土流失面积已超过 50%,侵蚀方式主要为水力侵蚀,侵蚀强度多数属于中度侵蚀^[15]。因此,本研究利用自主研发的粒子成像瞬态测量可视化仪,对陕南宁强县自然降雨进行连续观测,获得不同降雨类型的雨滴数据,并对雨滴大小分布、雨滴谱特征、雨滴数密度以及雨滴终点速度等参数进行分析。研究结果有助于揭示该地区水力侵蚀动力学过程,为土壤侵蚀防治提供理论依据。

1 研究区概况

宁强县作为汉江的发源地,位于陕西省西南部,且地处秦巴山区。其地理坐标为北纬 32°27′06″—33°12′42″,东经 105°20′10″—106°35′18″。地势多呈“V”字形构造,东南高,西北低,海拔多分布于 1 000~1 800 m(图 1)。该地区气候类型为暖温带山地湿润季风气候,年均气温 13℃,极端最低气温 -10.3℃,极端最高气温 36.2℃,年降水量可达到 1 812.2 mm。土壤主要为黄棕壤,成土母质多以页岩、千枚岩为主。

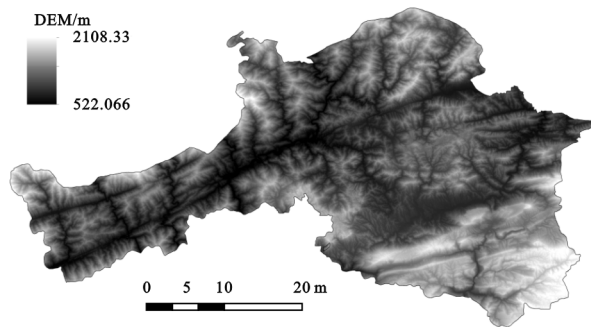


图 1 宁强县位置与地形

2 材料与方法

2.1 试验观测

2.1.1 观测仪器 粒子成像瞬态测量可视化仪主要包括投影系统、采集系统和采集控制系统(图 2)。该仪器的点光源选择了可发出色温为 4 300 K 左右白光的卤素灯,使用菲涅尔聚光镜将点光源转化为平行光以防投影发生变形。当雨滴通过平行光场的瞬间在投影幕布上成像,与此同时 CCD 工业相机对幕布上的投影进行采集。采集同步控制系统作为整个仪器的中枢,对采集系统进行管理并对采集数据进行高效传输。本试验中相机采集帧率为 480 帧/s,若下落的雨滴以 15 m/s 的终点速度通过高度为 200 mm 的观测场,其所需时间为 0.01 s,则相机至少可采集 6 帧同一雨滴影像,即可大大提高同一雨滴匹配的准确度。

该仪器便于携带、在易操作的同时保证了软件功能齐全,并且采样空间大(200 mm×200 mm×200 mm),可以实现雨滴直径和终点速度的同步观测。通过前期钢珠洒落试验已对该仪器的精度和准确度进行了检验,结果表明,不同尺寸的钢珠直径和终点速度均符合正态分布规律,钢珠直径相对误差为 3.71%,终点速度相对误差为 2.83%,说明该仪器测

量精度和准确度均较高,可准确、快速和高效地观测

雨滴物理特性^[13,16]。

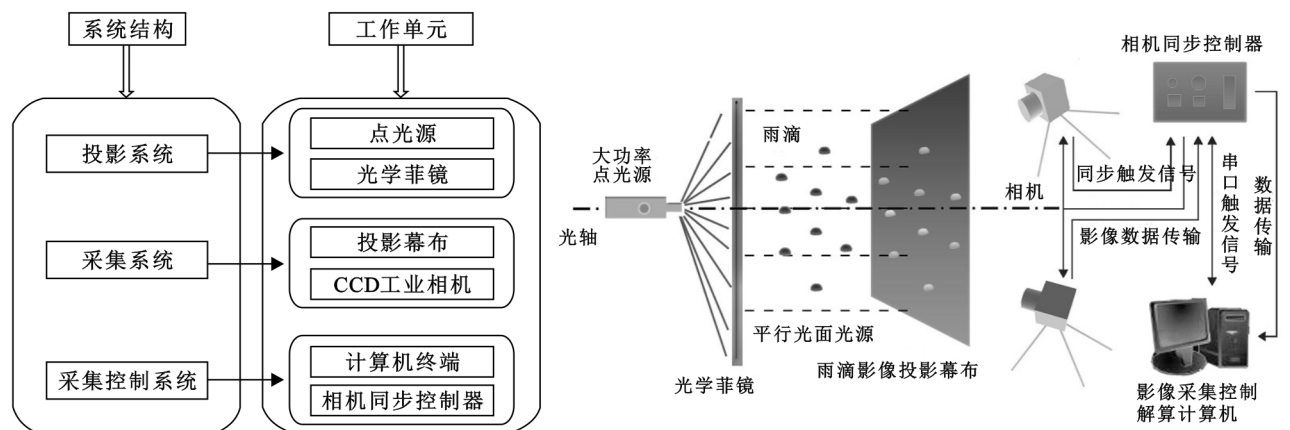


图 2 粒子成像瞬态测量可视化测量仪逻辑结构与组成示意图

2.1.2 数据收集 利用该仪器对宁强县 2018 年 7 月 10 日—7 月 31 日的自然降雨进行了观测,观测点为宁强县体育场。为了减小仪器的测量误差,增加数据的可靠性,依据以下原则对获取的数据进行筛选:(1) 剔除次降雨量未达到侵蚀性降雨标准的数据^[17];(2) 将降雨历时小于 30 min 的降雨视为无效降雨^[18-19];(3) 5 min 内获取的雨滴数目小于 100 的影像视为噪音点,予以剔除;(4) 由于下落的雨滴间会发生碰撞、合并和破碎等现象,导致自然界雨滴的直径一般不超过 6 mm^[20],因此本研究对直径大于 6 mm 的雨滴数据予以剔除。所得数据通过以上原则筛选后,共获得 412 份有效雨滴影像,但多数雨滴影像数据历时短且分散,集成分析又无法展示降雨参数随时间序列的变化特征。因此,本研究最终选取了 7 月 11 日历时 15 h 的连续降雨过程进行分析,其包含了以 5 min 为时间间隔的 158 份雨滴影像。

2.2 参数计算

(1) 雨滴物理特性参数。本研究中利用几何直径代表雨滴直径,几何直径的计算方法简单易行且产生的误差相对较小。选取最大直径(D_1)和第二直径(D_2)进行计算,即雨滴轮廓上相距最远两点间线段(D_1)和过该线段中点所作垂线与雨滴轮廓的交点间线段(D_2),计算方法如下:

$$D = \sqrt{D_1 D_2} \quad (1)$$

式中: D 为雨滴直径(mm); D_1 为最大直径(mm); D_2 为第二直径(mm)。

雨滴终点速度为其移动距离与相机曝光时间的比值,其中移动距离为同一雨滴外轮廓形成的闭合轴长度(L)减去相应的雨滴直径(D),计算方法如下:

$$V = \frac{L - D}{10^3 t} \quad (2)$$

式中: V 为雨滴终点速度(m/s); L 为闭合轴长度

(mm); t 为相机曝光时间(s); 10^3 为单位转化系数。

此外,观测仪器可以捕捉到经过观测区域的所有雨滴,进而可对雨滴数密度(N_t ,个/ m^3)进行统计,即通过观测视场的单位体积雨滴数。

(2) 降雨强度。根据降雨强度定义可知,在已知降雨量和降雨时间条件下即可求得降雨强度,因此其计算公式为:

$$I = \frac{P}{t} \quad (3)$$

式中: I 为降雨强度(mm/h); P 为降雨量(mm); t 为观测时间(h)。

公式(3)中降雨量可利用相应时间段内雨滴累积体积与采样面积的比值求得,即:

$$P = \frac{V_D}{10^6 S} \quad (4)$$

式中: V_D 为累积体积(mm^3); S 为采样面积,约为 0.04 m^2 ; 10^6 为单位转化系数。

本研究中将雨滴视为球体,则相应时间段内雨滴累积体积为:

$$V_D = \frac{4\pi}{3} \sum_{i=1}^n \left(\frac{D_i}{2} \right)^3 \quad (5)$$

式中: D 为雨滴直径(mm); n 为相应时间段内雨滴下落总数(个)。

将公式(3),(4),(5)联立,即可得到降雨强度最终计算公式:

$$I = \frac{P}{t} = \frac{\pi}{20000} \sum_{i=1}^n D_i^3 \quad (6)$$

(3) 雨滴谱参数计算。本研究中采用 1948 年由 Marshall 等^[21] 所提出的 M-P 分布函数和实测的雨滴谱分布进行比较,其中 M-P 分布函数可表达为:

$$N(D) = N_0 \exp(-\lambda D) \quad (7)$$

式中: $N(D)$ 为单位体积单位尺度间隔内雨滴数[个/($\text{m}^3 \cdot \text{mm}$)]; N_0 为广义截距参数[个/($\text{m}^3 \cdot$

mm)]; λ 为斜率参数(mm);可通过包含雨强的下式计算: $\lambda=4.1I^{-0.21}$ 。

3 结果与分析

3.1 雨滴大小分布

雨滴物理特性参数可较好地反映雨滴的变化特征,亦可了解不同大小雨滴在整个降雨过程中的分布

表 1 雨滴物理特性参数统计量

参数	样本数/个	最小值	最大值	平均值	标准误差	变异系数/%
雨滴直径/mm	1,035,939	0.05	5.98	1.08	0.53	49.56
雨滴终点速度/(m·s ⁻¹)	1,035,939	0.07	19.83	3.92	1.99	50.83
雨滴数密度/(个·m ⁻³)	158	12.32	336.30	141.63	5.40	47.96

根据雨滴直径大小,将雨滴分为 $0<D\leq1, 1<D\leq2, 2<D\leq3, D>3$ mm 共 4 个等级,分析不同大小雨滴对雨滴数密度和降雨量的贡献率。本次降雨过程中 $0<D\leq1$ mm 的雨滴的雨滴数密度占总雨滴数密度的百分比最大,达到了 67.22%; $1<D\leq2$ mm 的雨滴次之,其雨滴数密度占到总雨滴数密度的 30.23%; $2<D\leq3$ mm 雨滴的雨滴数密度较小,占到总雨滴数密度的 2.35%; $D>3$ mm 的雨滴虽然存在,但其雨滴数密度极小,仅占到总雨滴数密度的 0.20%(图 3)。从不同大小雨滴对降雨量的贡献率角度来看, $1<D\leq2$ mm 的雨滴为降雨量的主要贡献者,占到总降雨量的 59.31%;其次为 $2<D\leq3$ mm 的雨滴,雨滴数密度占比虽小,但其对降雨量的贡献率可达到 28.57%;相比之下,对雨滴数密度贡献率最大的 $0<D\leq1$ mm 的雨滴对降雨量的贡献率仅为 7.63%; $D>3$ mm 的雨滴对降雨量的贡献率最小,仅有 4.49%(图 3)。

3.2 雨滴谱特征

本研究中实测雨滴谱为单峰状,整体呈先增后减趋势,其峰值直径约为 0.20 mm, $N(D)$ 最小值为 0.001 个/(m³·mm),最大值可达到 190.10 个/(m³·mm)(图 4A)。与 M-P 分布函数进行对比分析,结果表明:M-P 分布函数对 $D\leq2$ mm 的 $N(D)$ 估算值相比实测值略高,随着雨滴直径增大二者间偏差逐渐减小;当 $2<$

情况以及对降雨量的贡献率^[22]。由表 1 可知,宁强县该次降雨过程中,雨滴直径、雨滴终点速度以及雨滴数密度均存在较大的变异性,变异系数分别为 49.56%, 50.83%,47.96%。其中,雨滴直径主要分布在 0.05~5.98 mm,平均值为 1.08 mm;雨滴终点速度主要分布在 0.07~19.83 m/s,平均值为 3.92 m/s;雨滴数密度主要分布在 12.32~336.30 个/m³,平均值为 141.63 个/m³。

$D\leq4$ mm 时, $N(D)$ 的估算值与实测值较为接近;当 $D>4$ mm 时, $N(D)$ 估算值相比实测值偏低,且二者间偏差逐渐增大,即在大雨滴端存在一定的偏差。为了进一步研究此次降雨过程雨滴谱的分布特征,根据国家气象局对降雨强度等级的划分标准^[23]将本次降雨依次划分为小雨、中雨、大雨及以上 3 种类型进行分析,各类雨强下的雨滴谱分布如图 4B 所示。不同类型雨强下,雨滴谱的谱宽和 $N(D)$ 随雨强的增大而显著增加。不同强度降雨的雨滴谱谱型会有所不同,具体表现为小雨和中雨的雨滴谱都近似单峰状,其峰值所对应的直径为 0.44 mm;大雨及以上类型降雨的雨滴谱呈双峰状,谱线逐渐平缓,且雨滴谱谱宽最宽,说明该强度范围内降雨所包含的大雨滴较多。

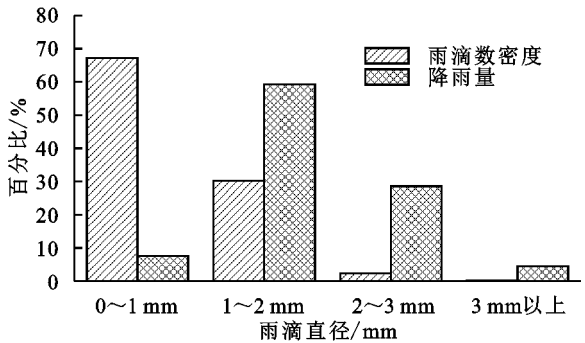


图 3 不同大小雨滴对雨滴数密度和降雨量贡献率

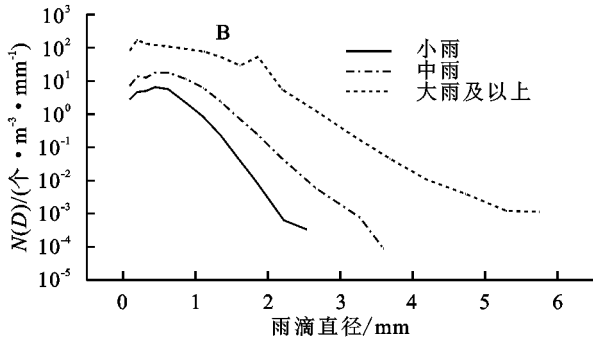
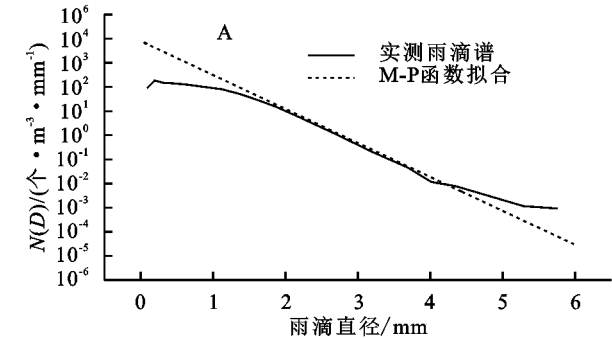


图 4 雨滴谱分布

3.3 雨滴数密度和平均直径与降雨强度的关系

该次降雨共历时 15 h 左右,总降雨量约为 41.47 mm,降雨强度波动范围为 0.11~10.95 mm/h,平均值为 3.15 mm/h(图 5)。降雨强度总体呈递减趋势,大致可划分为以下 3 个阶段:00:01—05:36 为第一阶段,该阶段降雨强度大、维持时间长,在 00:33 时降雨强度达到最大值;05:37—11:06 为第二阶段,该阶段降雨强度大小中等,波动范围为 0.31~6.82 mm/h;11:07—15:01 为

第三阶段,该阶段持续时间短,降雨强度总体偏小,平均降雨强度为 0.95 mm/h,最大仅为 2.37 mm/h。降雨强度是由雨滴数目和雨滴大小共同决定,由图 5 可知,三者随时间的变化趋势较为相似,其达到峰值的时段也基本相似,具体表现为降雨过程中雨滴平均直径最大值为 1.30 mm,出现时间为 00:28;雨滴数密度最大值为 336.30 个/ m^3 ,出现时间为 1:21;降雨强度最大值为 10.95 mm/h,出现时间为 00:33。

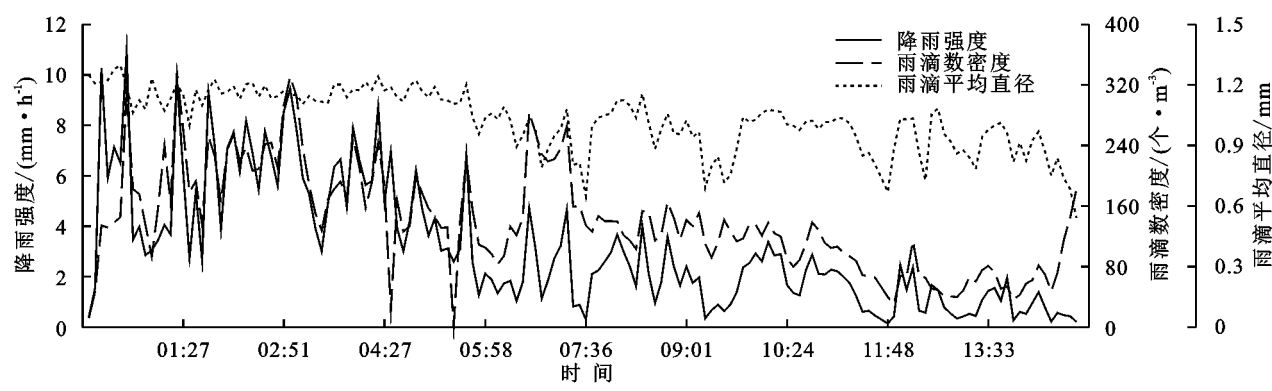


图 5 降雨参数变化特征

此外,通过回归分析发现雨滴数密度和雨滴大小均对降雨强度有显著影响,但影响趋势并不相同。其中,雨滴数密度与降雨强度呈线性关系,即随着降雨强度的

增大,雨滴数密度呈增大趋势(图 6A)。雨滴平均直径与降雨强度呈较好的对数关系,即随着降雨强度的增大,雨滴平均直径变化幅度减小,逐渐趋于稳定(图 6B)。

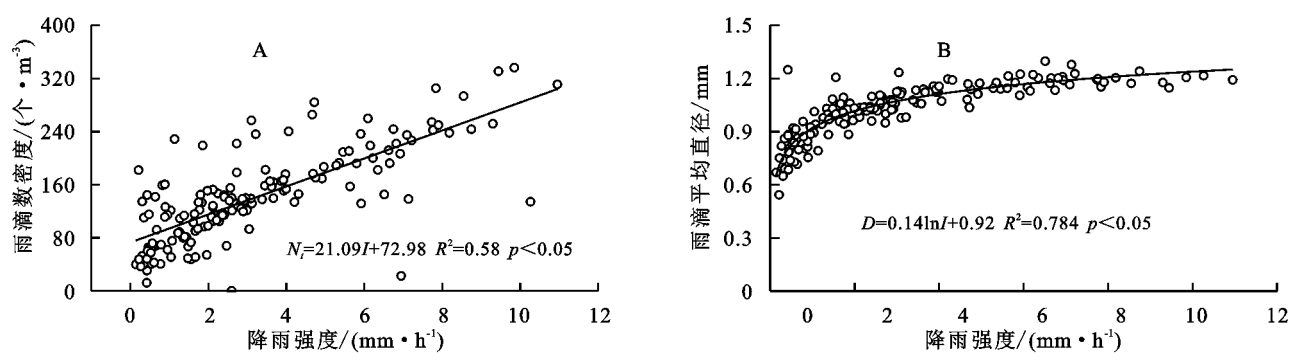


图 6 雨滴数密度和平均直径与降雨强度关系

3.4 雨滴直径与终点速度关系

在本次降雨过程中,雨滴终点速度主要分布在 4~6 m/s,不同大小雨滴所对应的雨滴终点速度并非固定值,而是存在一定波动,即部分雨滴虽小,但其终点速度却大于大雨滴,而部分大雨滴终点速度却远小于小雨滴(图 7)。此外,利用观测到的全部雨滴数据进行分析后发现,雨滴直径和终点速度之间存在密切的对数关系 $[V = -5.10 + 9.28\ln(D + 1.62), R^2 = 0.82, p < 0.05]$ (图 7)。与目前常用的 Atlas-Ulbrich^[19]经验关系曲线进行对比分析可知,以 1 mm 为分界点,当 $D \leq 1$ mm 时,本研究拟合的关系曲线略低于 Atlas-Ulbrich 经验关系曲线;当 $D > 1$ mm 时,本研究拟合的关系曲线高于 Atlas-Ulbrich 经验关系曲线(图 7)。平均而言,本研究拟合曲线值略高于经验关系计

算的相应雨滴直径所对应的终点速度,但两条曲线的变化趋势较为相似,雨滴直径较小时,两条曲线结果均表现为随雨滴直径的增大而显著增大;随着雨滴直径的不断增大,雨滴终点速度的增大趋势逐渐变缓(图 7)。

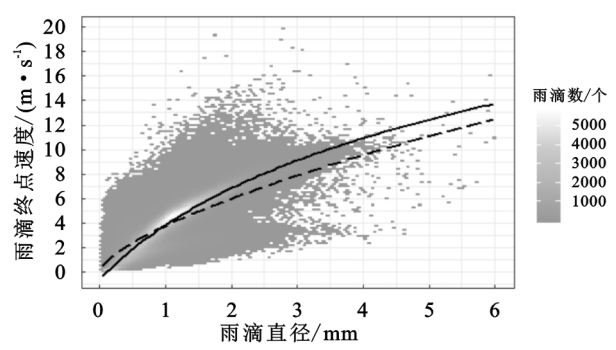


图 7 不同大小雨滴直径和终点速度所对应的雨滴数分布

二维密度图反映散点的密集程度,由大小相同的方块组成,利用颜色差异反映每个方块内包含的雨滴数目。实线表示本研究关系曲线,虚线表示 Atlas-Ulbrich 关系曲线。

4 讨论

不同地区的雨滴物理特性具有一定的差异性,本次降雨过程中雨滴直径的平均值为 1.08 mm,低于我国南京地区(1.40 mm)^[24]和珠海地区(1.47 mm)^[25]自然降雨雨滴直径,但与我国北京地区自然降雨雨滴直径(1.04 mm)^[18]相比差异较小。气温及暴雨持续时间可能是引起本研究区与两地自然降雨雨滴直径差异的原因之一。以往有研究表明,高温地区雨滴直径大于温度相对较低的地区,且持续不到 1 h 的暴雨所产生的雨滴直径相比持续多小时的降雨产生的雨滴直径要大得多^[26]。南京、珠海地区年均气温高于本研究区,并且多为短历时暴雨,所以其自然降雨雨滴直径与本研究区存在一定差异。就雨滴数密度而言,本研究中雨滴数密度(141.63 个/m³)与印度半岛南部(349.2 个/m³)^[27]相比明显偏小,但与 Tang 等^[18]对北京地区的研究结果相比,雨滴平均直径和雨滴数密度(174.7 个/m³)均相差较小。这种空间差异可能是由于地理位置和气候条件的不同而造成的。此外,本研究中小雨滴($0 < D \leq 1$ mm)数量较多,占到雨滴数密度的 67.22%。Carter^[26]同样发现,直径约为 1 mm 的雨滴最为常见;Tang 等^[18]对北京、张北、阳江 3 个地区降雨研究发现,层状雨亦以 1 mm 的雨滴为主。相比之下,本研究中大雨滴($D > 3$ mm)占比极小,仅占到雨滴下落总数的 0.20%。这是因为雨滴在下落过程中受到局部上升气流或下降气流的影响,会发生空气动力学破裂与碰撞破裂,进而限制了雨滴的大小。相较于空气动力学破裂,碰撞引起的雨滴破裂对雨滴大小的影响更强,其中大雨滴的主要消耗方式为包状破裂^[28]。此外,该研究区位于两大山系的交汇地带(图 1),山地对湿润空气的抬升作用可提供足够的凝结水,进而产生大量小雨滴^[29]。

将宁强地区该次降雨过程中雨滴谱与山西汾阳地区雨滴谱比较发现^[30],实测雨滴谱谱型都呈单峰状,但汾阳地区雨滴谱峰值直径大于宁强地区雨滴谱峰值直径。不同雨强下两地雨滴谱分布情况相似,当降雨强度较小时,雨滴谱宽度较窄;当降雨强度逐渐增加后,雨滴谱宽度明显变宽,这表明随着降雨强度的增大,直径较大的雨滴亦在不断增加。在雨滴直径

较小时,不同降雨强度下雨滴谱差异较小,但随着雨滴直径的增大,不同降雨强度下雨滴谱差异增大,由此判断降雨强度的增大与大直径雨滴的存在和雨滴谱的变异有关^[31]。分析降雨强度与雨滴数密度和雨滴平均直径的关系可知,随着降雨强度的增大,雨滴数密度和雨滴平均直径均呈增大趋势,但雨滴平均直径的增大趋势逐渐趋于稳定。该结果说明在本次降雨过程中,小雨和中雨的降雨强度受雨滴数目和雨滴大小的共同影响,但降雨强度逐渐增大后,其主要影响因素发生改变,仅为雨滴数目。对比 Zhang 等^[25]对我国南方降雨分析发现,雨滴平均直径随降雨强度变化趋势的研究结果与本研究相似,而降雨强度与雨滴数密度呈幂函数关系,与本研究结果不同,究其原因主要是由于雨滴下落过程中碰并和破裂发生的频率更高所引起的。关于雨滴数密度和平均直径与雨强关系的研究结果表明,较大的降雨强度条件下,雨滴的碰并与破裂达到相对平衡状态。在这种平衡状态下,雨滴平均直径随降雨强度的增大而趋于稳定,引起降雨强度增大的主要因素为雨滴数密度,而非雨滴平均直径,这说明自然降雨雨强的变化对雨滴数目比雨滴大小更敏感。

雨滴终点速度随雨滴直径增大而变化的过程中,其增大趋势逐渐减缓。这种趋势可能是由于雨滴直径的增大,导致其在下落过程中形状的改变使自身所受阻力逐渐增大,进而使得雨滴终点速度增大的趋势逐渐减缓^[32]。通常情况下,较大的雨滴比小雨滴具有更大的终点速度,诸多学者通过实验室模拟和实地测量提出了一系列经典的雨滴终点速度计算公式,以表示雨滴直径与终点速度间的对应关系,但在实际测量中雨滴直径与终点速度并非呈一一对应的关系。Montero-Martinez 等^[33]研究表明,由于雨滴碰并和破裂的影响,使得小雨滴具有过大终点速度,而较大的雨滴具有过小终点速度。Pinsky 等^[34]通过数值模拟证明了空气湍流可对雨滴终点速度产生大幅度影响,雨滴的碰并和破裂与其终点速度大小密切相关。这种现象可能是由于雨滴碰撞结合在一起形成更大的雨滴,其降落速度会与其中较大雨滴的降落速度保持一致,进而导致碰并后雨滴的终点速度小于相应直径的终点速度;同样,当雨滴在下落过程中破裂形成更小的雨滴后,将保持原来的速度下降,使得破裂后雨滴终点速度大于其直径相对应的终点速度^[33]。将本研究拟合的关系曲线与常用经验关系曲线对比可知,本研究拟合的关系曲线与其存在一定的差异。这

种差异可能是由于气压与气候的不同导致空气密度、空气黏滞阻力等均存在差异,最终影响雨滴终点速度大小^[35-36]。对于大小相同的雨滴,尤其对于较大的雨滴,其终点速度随空气密度减小而增大^[37]。常用经验关系曲线均是基于标准大气压(1 013 hPa)条件下得来的,而宁强县体育场海拔高程约为 803 m(图 1),与其相对应的气压约为 915 hPa。由孙学金等^[35]研究发现相同直径雨滴的终点速度随着气压的减小呈增大趋势,并且随着雨滴直径的增大,该趋势也逐渐增加,与本文的研究结果相似。

由以上讨论可知,雨滴特征会因地理位置和气候条件的不同而具有很大差异。作为水力侵蚀的主要影响要素,雨滴撞击土壤表面产生的土壤颗粒会沉积于土壤表面或通过地表径流进一步运输,其溅蚀能力主要取决于自身的大小和终点速度。雨滴特征差异使得自然降雨条件下溅蚀的研究局限于特定地区条件。通过对雨滴大小和终点速度直接观测可提高降雨参数计算的精确度,有利于溅蚀的研究。因此,连续、直接测量雨滴大小和终点速度,获取详细的雨滴特征资料为溅蚀发生过程的研究提供了数据支持,并为特定地区溅蚀量的估算奠定了基础,这对土壤侵蚀的研究具有重要意义。

5 结论

(1) 宁强县该次降雨过程中雨滴直径主要分布在 0.05~5.98 mm。从雨滴数密度来看, $0 < D \leq 1$ mm 雨滴的雨滴数密度可占总雨滴数密度的 67%以上。从雨滴对降雨量的贡献率来看, $1 < D \leq 2$ mm 的雨滴对降雨量的贡献率将近 60%,而 $0 < D \leq 1$ mm 雨滴的雨滴数密度虽大,但对降雨量的贡献率仅占到 7.63%。

(2) 实测雨滴谱分布呈单峰结构。与 M-P 分布函数相比可知,当 $2 < D \leq 4$ mm 时, $N(D)$ 的估算值与实测值较为接近;随着降雨强度的增大,雨滴谱宽度呈增大趋势,且相同直径所对应的 $N(D)$ 值亦呈增大趋势。

(3) 从时间序列上来看,该次降雨由大暴雨逐渐转变为小雨,平均降雨强度为 3.2 mm/h。该次降雨过程中雨滴数密度与降雨强度间存在线性关系,而雨滴平均直径与降雨强度存在对数关系。随着降雨强度的增大,雨滴大小对降雨强度的影响逐渐减弱,主要由雨滴数目决定。

(4) 雨滴终点速度主要分布在 4~6 m/s,并与雨滴直径呈密切的对数关系,即雨滴直径的增大,会使得雨滴终点速度逐渐增大,但其增大趋势逐渐减

缓。本研究中拟合曲线与 Atlas-Ulbrich 经验关系曲线非常相似。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部.第一次全国水利普查水土保持情况公报[J].中国水土保持,2013(10):2-3.
- [2] Lantican M A, Guerra L C, Bhuiyan S I. Impacts of soil erosion in the upper Manupali watershed on irrigated lowlands in the Philippines[J]. Paddy & Water Environment, 2003,1(1):19-26.
- [3] Marques M J, Bienes R, Pérez-Rodríguez R, et al. Soil degradation in central Spain due to sheet water erosion by low-intensity rainfall events [J]. Earth Surface Processes and Landforma, 2008,33(3):414-423.
- [4] Wu B, Wang Z, Zhang Q, et al. Evaluating and modelling splash detachment capacity based on laboratory experiments[J]. Catena, 2019,176:189-196.
- [5] Wu B, Wang Z, Zhang Q. Modelling sheet erosion on steep slopes in the loess region of China[J]. Journal of Hydrology, 2017,553:549-558.
- [6] 付玉,李光录,郑腾辉,等.雨滴击溅对耕作层土壤团聚体粒径分布的影响[J].农业工程学报,2017,33(3):155-160.
- [7] 卜崇峰,蔡强国,张兴昌,等.黄土结皮的发育机理与侵蚀效应研究[J].土壤学报,2009,46(1):16-23.
- [8] 郑粉莉,高学田.坡面土壤侵蚀过程研究进展[J].地理科学,2003,23(2):230-235.
- [9] Caracciolo C, Napoli M, Porcu F, et al. Raindrop size distribution and soil erosion[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2012,138(5):461-469.
- [10] 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等.降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J].农业机械学报,2014,45(2):169-175.
- [11] Wen L, Zhao K, Wang M. Seasonal variations of observed raindrop size distribution in east China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2019,36(4):346-362.
- [12] Petan S, Rusjan S, Vidmar A, et al. The rainfall kinetic energy-intensity relationship for rainfall erosivity estimation in the mediterranean part of Slovenia[J]. Journal of Hydrology, 2010,391(3/4):314-321.
- [13] 郭明航,展小云,赵军,等.雨滴物理特性的粒子成像测量技术研究[J].农业机械学报,2015,46(9):144-150.
- [14] 王星,李占斌,李鹏,等.宁强县土壤侵蚀的地貌分布特征[J].农业工程学报,2012,28(11):132-137.
- [15] 兰敏.基于 GIS 的秦巴山区土壤侵蚀空间特征分析:以陕西省宁强县为例[J].干旱地区农业研究,2012,30(2):196-200.
- [16] 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.DOI:10.1016/j.atmosres.2020.104963.

- [17] 谢云,刘宝元,章文波.侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持学报,2000,14(4):6-11.
- [18] Tang Q, Xiao H, Guo C, et al. Characteristics of the raindrop size distributions and their retrieved polarimetric radar parameters in northern and southern China[J]. Atmospheric Research, 2014,135/136:59-75.
- [19] 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.
- [20] 李子华,王鹏飞.微观云物理学[M].北京:气象出版社,1989.
- [21] Marshall J S, Palmer W M K. The distribution of rain drops with size[J]. Meteorol, 1948,1(5):165-166.
- [22] 胡子浩,濮江平,濮云涛,等.南海一次海洋性对流云降水雨滴谱特征分析[J].热带气象学报,2014,30(1):181-188.
- [23] 科迪.降雨强度标准划分[J].北京水利,1995(4):49.
- [24] Chen B, Yang J, Pu J P. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the Meiyu season observed in eastern China[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2013,91(2):215-227.
- [25] Zhang A, Hu J, Chen S, et al. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the monsoon season observed in southern China[J]. Remote Sensing, 2019, 11(4).DOI: 10.3390/rs11040432.
- [26] Carter C E. Raindrop characteristics in south central United States[J]. Transactions of the Asae, 1974,17(6):1033-1037.
- [27] Harikumar R, Sampath S, Kumar V S. Variation of rain drop size distribution with rain rate at a few coastal and high altitude stations in southern peninsular India[J]. Advances in Space Research, 2010,45(4):576-586.
- [28] McTaggart-Cowan J D, List R. Collision and breakup of water drops at terminal velocity[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1975,32(7):1401-1411.
- [29] Rosenfeld D, Ulbrich C W. Cloud microphysical properties, processes, and rainfall estimation opportunities[J]. Meteorological Monographs, 2003,30(52):237-258.
- [30] 杨俊梅,崔栋梁,李彦萌,等.山西两种地形雨滴谱统计特征对比分析[J].科技与创新,2017(2):38-42.
- [31] 陈子健,胡向峰,陈宝君,等.河北省中南部暴雨雨滴谱特征[J].干旱气象,2019,37(4):586-596.
- [32] Beard K V, Bringi V N, Thurai M, et al. A new understanding of raindrop shape[J]. Atmospheric Research, 2010,97(4):395-415.
- [33] Montero-Martinez G, Kostinski A B, Shaw R A, et al. Do all raindrops fall at terminal speed[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(11). DOI: 10.1029/2008GL037111.
- [34] Pinsky M B, Khain A P. Simulations of drop fall in a homogeneous isotropic turbulent flow[J]. Journal of Aerosol Science, 1996,40(2/4):223-259.
- [35] 孙学金,孙海洋,江志东.不同大气条件雨滴下落速度的数值仿真[J].计算机仿真,2011,28(12):402-406.
- [36] 张昊,濮江平,李靖,等.庐山地区不同海拔高度降水雨滴谱特征分析[J].气象与减灾研究,2011,34(2):43-50.
- [37] Porcu F D, Adderio L P, Prodi F, et al. Effects of altitude on maximum raindrop size and fall velocity as limited by collisional breakup[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2013,70(4):1129-1134.

~~~~~

(上接第96页)

- [29] 孙倩,吴宏亮,陈阜,等.宁夏中部干旱带不同作物根际土壤真菌群落多样性及群落结构[J].微生物学通报,2019,46(11):2963-2972.
- [30] Dickie I A, Xu B, Koide R T. Vertical niche differentiation of ectomycorrhizal hyphae in soil as shown by T-RFLP analysis[J]. New Phytologist, 2002,156(3):527-535.
- [31] Sun W, Xiao H, Peng Q, et al. Analysis of bacterial diversity of Chinese Luzhou-flavor liquor brewed in different seasons by Illumina Miseq sequencing[J]. Annals of Microbiology, 2016,66(3):1293-1301.
- [32] Liu Z, Fu B, Zheng X, et al. Plant biomass, soil water content and soil N:P ratio regulating soil microbial functional diversity in a temperate steppe: a regional scale study[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(3):445-450.
- [33] Jansa J, Oberholzer H R, Egli S. Environmental determinants of the arbuscular mycorrhizal fungal infectivity of Swiss agricultural soils[J]. European Journal of Soil Biology, 2009,45(5/6):400-408.
- [34] Beare M H, Coleman D C, Pohlard B R, et al. Residue placement and fungicide effects on fungal communities in conventional and no-tillage soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993,57(2):392-399.
- [35] 韩世忠,高人,李爱萍,等.中亚热带地区两种森林植被类型土壤微生物群落结构[J].应用生态学报,2015,26(7):2151-2158.