

# 陕西杨凌天然降雨雨滴特性研究

吴光艳, 吴发启, 尹武君, 宋向阳, 吴秋菊, 杨晓芬

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**天然降雨雨滴特性是土壤侵蚀的动力因子之一,是研究降雨侵蚀力规律的基本依据。运用虹吸式雨量计记录杨凌的天然降雨过程,同时采用滤纸色斑法观测天然降雨雨滴的特征,结合图形处理软件 Image-J 处理雨滴直径。研究结果表明:该区天然降雨雨滴大小分布符合 Best 函数式;雨滴中数直径、降雨动能与降雨强度呈幂函数关系,但关系式中的系数由于雨型的不同和观测范围的限制而存在一定差异。

**关键词:**天然降雨;降雨强度;雨滴中数直径;降雨动能;陕西杨凌

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2011)01-0048-04

## Study on Characteristics of Natural Rainfall in Yangling, Shaanxi Province

WU Guang-yan, WU Fa-qi, YIN Wu-jun, SONG Xiang-yang, WU Qiu-ju, YANG Xiao-fen

(College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The natural rainfall raindrop characteristic is one of soil erosion power factors, and is the basic study of the rainfall agents of erosion rule. The process of natural rainfall was recorded by siphonic pluviograph, then the natural raindrop was observed with filter-color stain method, and the raindrop diameter was measured by computer software called Image-J. The results indicated that the distribution of natural raindrop size was coincident with Best's function in Yangling. The relationship of the median raindrop diameter and the kinetic energy of rain with rainfall intensity can be expressed significantly degree dependence, but the relationship has some difference because of rainfall difference and observation scope limit.

**Key words:** natural rainfall; rainfall intensity; median raindrop diameter; kinetic energy of rainfall; Yangling of Shaanxi province

土壤侵蚀被认为是气候、地质地貌、土壤、植被和人为活动 5 种因子共同作用下而形成的一种灾害现象。在这些因素中,气候因子常常是引起风蚀和水力侵蚀的动力因子,故风和降雨特征的研究受到了诸多学者的广泛重视。近 30 年来,国内外许多学者对雨滴特性展开了研究,并取得巨大的进展,使土壤侵蚀研究工作进入了定量分析阶段。Best<sup>[1]</sup>研究了天然降雨雨滴分布特征,提出了著名的 Best 雨滴大小分布式。Carter<sup>[2]</sup>、Hudson<sup>[3]</sup>、Park<sup>[4]</sup>、Wishmeier<sup>[5]</sup>研究了降雨强度和降雨能量之间符合幂函数关系。窦葆璋<sup>[6]</sup>、江忠善<sup>[7]</sup>、周佩华<sup>[8]</sup>采用色斑法对天然降雨雨滴特征进行研究,得出雨滴大小特征符合 Best 的分布函数式;雨滴中数直径、降雨能量与降雨强度呈幂函数关系。由于地域差异,降雨类型的差别,天然降雨雨滴

特征各异;且杨凌气象站于 2007 年 12 月建成,2008 年 1 月正式观测,气象资料不足,对降雨的物理特征参数从未进行过研究,为此本研究旨在为该区资料的观测与分析及侵蚀动力因素研究提供一定的参考。

### 1 研究区概况

杨凌地处陕西省关中平原中西部,渭河以北,三面环水,东以漆水河与武功县接界,南依渭河同周至相望,北有沛水和武功,西与扶风接壤。位于东经 107°59′—108°09′,北纬 34°14′—34°24′,海拔 418.0~540.1 m,地势北高南低,由南向北依次形成一、二、三级阶地,整体分为 5 种地貌,即渭河滩地,一级阶地,二级阶地,三级阶地以及沟坡地。气候类型属暖温带半湿润气候区,四季分明,年平均气温 12.9℃,

极端最高气温 42℃,最低气温 -19.4℃,全年无霜期 221 d。年均降水量 637.6 mm,多集中在 7—10 月,占多年平均降水量的 60%,年平均蒸发量 884 mm。土壤特性从南向北,随地势增高,土壤质地由中壤土→轻黏土→黏土过渡,土壤颗粒逐渐变细,土壤稳渗率减弱,容重、含水量呈现增加趋势,孔隙度维持在 50%左右,呈现降低趋势,而 <0.25 mm 的水稳性团粒含量和 <0.01 mm 的物理性黏粒含量明显呈上升趋势。观测地点位于西北农林科技大学科研楼。

## 2 研究内容与方法

天然降雨雨滴特征包括降雨强度、雨滴大小分布、降雨动能特征,以及它们之间的相互关系。本研究采用传统的滤纸色斑法与虹吸式自记雨量计观测相结合的方法。本次试验从 2009 年 7 月到 10 月,共观测降雨 15 场,采集雨滴谱 364 份。

### 2.1 降雨观测

试验采用上海仪器厂生产的 SJ 型虹吸式自记雨量计记录降雨全过程。雨量计主要包括盛水器、记录笔和自记钟筒,自记钟筒上有记录纸。此雨量计可以较完整的记录降雨随时间的变化、次降雨量、降雨历时,雨量计 24 h 时间误差为 5 min。

将雨量计布设在开阔无遮挡物区域,避免降雨受到建筑物和高大树木的影响。当降雨开始时,在记录纸上记下降雨开始的具体时间,在降雨的过程中,只需要检查记录笔是否正常即可,待降雨结束后取下记录纸,进行降雨强度的计算。

### 2.2 雨滴取样及测量

我国目前研究雨滴大小所采用较普遍的方法是滤纸色斑法<sup>[6]</sup>,本研究同样采用此方法观测雨滴直径。滤纸使用新华造纸厂出品的直径为 15 cm 的定性中速滤纸;涂料用天津登峰化学试剂厂生产的曙红和滑石粉的混合粉末,按其重量比为 1:10 混合均匀,用刷子将曙红和滑石粉混合粉末均匀地涂抹在滤纸上备用。在干燥的情况下,滤纸不显色,当雨滴降落在滤纸上时,每个雨滴就产生近似圆形的色斑。

降雨开始后,对应自记纸上的时间取雨滴样,并记下对应的时间,取样间隔 10 min 一次,同一时间取样重复 3 次。同时在观测的过程中针对降雨强度变化十分明显的时刻,雨滴取样立即进行。

将采集雨滴的滤纸按 1:1 扫描进电脑,然后用 Image-J 软件进行处理<sup>[9-10]</sup>,具体步骤如下:

(1)进入 Image-J 界面系统,将扫描文件导入编辑窗口中。

(2)将图片放大到合适大小,用直尺功能测出色

斑直径,每个色斑按垂直方向测两次。测量精度为 0.001 mm。

(3)将测量结果导入 Excel 中,计算色斑平均直径,进而推求雨滴实际直径。

### 2.3 色斑直径和雨滴直径关系率定

用普通医用注射器针管和不同型号的针头充当雨滴发生器,先向针管内注入一定量的水,装上针头,然后将针管内的水通过针头滴在涂有混合粉末的滤纸上,同一针头取 10 个点,滴时保持水滴滴在滤纸上的距离,距离太近水滴在滤纸上浸润相互间有影响,误差大。用万分之一天平称 100 滴水重,每种型号的针头各称取一次,并一一对应,计算出每一滴水的质量  $m_i$ 。假定水滴是球体状的,算出水滴直径  $d/\text{mm}$ ,即:

$$d = \left( \frac{6m_i}{\pi\rho} \right)^{\frac{1}{3}} \times 10 \quad (1)$$

式中: $\rho$ ——水的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。计算出色斑直径  $D_i$ ,这样水滴实际直径和色斑直径形成一一对应关系,用 Excel 进行回归分析(图 1),并得到色斑直径  $D$  与水滴直径  $d$  的关系式:

$$d = 0.37D^{0.74}, \quad R^2 = 0.9443 \quad (2)$$

运用公式(2)可以求得实际雨滴的直径  $d$ ,进而进行以下分析。

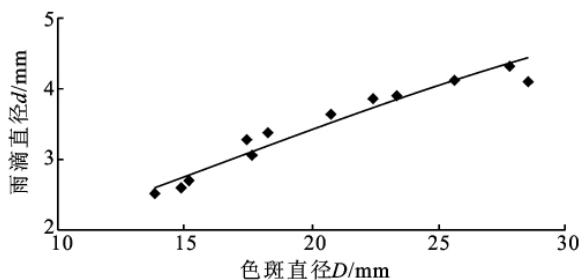


图 1 雨滴直径与色斑直径关系图

## 3 结果与分析

### 3.1 降雨强度特征

本研究运用的是瞬时雨强,即降雨量随时间关系曲线的斜率。在观测的 15 场降雨中,降雨强度位于 0.005~1.0 mm/min。降雨强度主要集中在 0.7 mm/min 以内。次降雨量界于 3~56.5 mm。降雨历时最短为 3.2 h,最长达到 26 h。根据江忠善<sup>[7]</sup>对降雨类型的分类,重点分析其中的普通型降雨特征。

### 3.2 雨滴大小分布

在天然降雨过程中,由于雨滴在降落过程中受到空气阻力和风力等的作用,不可能保持球体,所以,通常所谓的雨滴直径是指与雨滴重量相同的球体体积。

Best<sup>[1]</sup>提出,雨滴大小组成可以用下述分布函数表示:

$$F = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{a}\right)^n\right] \quad (3)$$

$$a = AI^p$$

式中:  $F$ ——雨滴中小于或等于  $d$  的雨滴累积体积(%);  $d$ ——雨滴直径(mm);  $n$ ——取决于雨型的常数;  $I$ ——降雨强度(mm/min);  $a$ ——常数;  $A$ ——系数;  $p$ ——指数。

根据观测结果验证杨凌地区雨滴分布是否属于上述分布,若分布满足此分布式,并求得  $a$  和  $n$  的表达式<sup>[11]</sup>。对等式移项并取对数:

$$\exp\left(\frac{d}{a}\right)^n = \ln(1-F) \quad (4)$$

$$\text{再次取对数可得: } \ln d = \ln a + \frac{1}{n} \ln \ln 1/(1-F)$$

设  $Y = \ln d$ ,  $X = \ln \ln 1/(1-F)$ ,  $M = \ln a$ ,  $N = 1/n$ , 则上式可以写成:

$$Y = M + NX \quad (5)$$

通过雨滴谱资料可以求得雨滴直径和雨滴体积累计百分数,即  $Y$  和  $X$ ,通过回归分析可以得到每份雨滴谱函数的  $M$  和  $N$  值,进而求得  $a$  和  $n$  的表达式。

通过回归分析得出的分布函数  $F$  值与实测  $F$  对比分析,拟合效果较好,说明杨凌区雨滴分布满足 Best 分布式,通过对  $a$  和  $n$  值与雨强之间的分析,得出本地区  $a$ 、 $n$  和  $I$  之间满足以下关系式:

$$a = 2.24I^{0.20}, \quad R^2 = 0.956 \quad (6)$$

$$n = 4.86I^{-0.13}, \quad R^2 = 0.519 \quad (7)$$

式(7)中  $n$  值与降雨强度  $I$  呈显著负相关关系,随着降雨强度的增大, $n$  值减小,这与江忠善得出的普通降雨雨型公式较吻合。由于降雨类型的差异而造成每个地区的  $n$  值都不相同。因此,可以得到杨凌地区天然降雨雨滴分布满足 Best 分布式,关系式如下:

$$F = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{2.24I^{0.20}}\right)^{4.86I^{-0.13}}\right] \quad (8)$$

### 3.3 雨滴中数直径与降雨强度拟合关系

通过雨滴谱资料可以求得雨滴中数直径( $D_{50}$ ),虹吸式自记雨量计可以记录降雨随时间的变化情况,根据自计纸上的曲线可以求得降雨的瞬时大小  $I$ ,通过回归分析,得到两者满足以下幂函数关系(雨滴中数直径与降雨强度散点图见图 2):

$$D_{50} = 2.25I^{0.21}, \quad R^2 = 0.72 \quad (9)$$

式(9)说明雨滴大小随降雨强度的增大而增大,但随降雨强度的增大,雨滴直径增加的趋势变小,即雨滴的大小有一个上限。

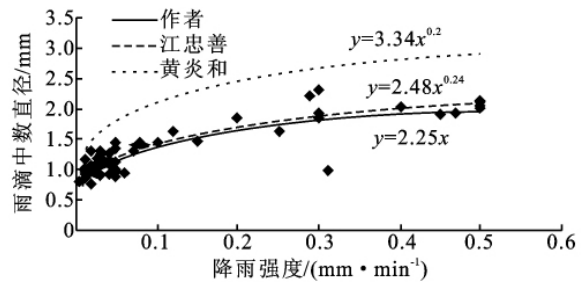


图 2 雨滴中数直径与降雨强度关系

图 2 中实线即是杨凌区降雨强度与雨滴中数直径的模拟曲线,从图中可以看出,此曲线与江忠善得到的关系曲线极为相似,黄炎和<sup>[12]</sup>得到雨滴中数直径偏大。这主要是江忠善观测地点位于甘肃天水,与杨凌地区降雨类型较相似,而黄炎和观测地点在福建,降雨强度与降雨类型较复杂,这也是造成各种经验公式的系数各不相同的主要原因。

### 3.4 降雨动能特征

雨滴动能是根据雨滴大小及其组成计算求得。雨滴的降落速度,根据雨滴大小的不同,分别用不同的公式进行计算。

当雨滴直径  $d < 1.9$  mm 时,用修正的沙玉清公式计算:

$$V = 0.496 \times 10^x \quad (10)$$

$$\text{其中 } x = [28.32 + 6.524 \lg(0.1d) - (\lg 0.1d)^2]^{0.5} - 3.665$$

当  $d \geq 1.9$  mm 时,用修正的牛顿公式

$$V = (17.2 - 0.844d)(0.1d)^{0.5} \quad (11)$$

式中:  $V$ ——雨滴降落速度(m/s);  $d$ ——雨滴直径(mm)。

对于单个雨滴,其动能可表示为

$$e = \frac{1}{12} \pi \rho d^3 V^2 \quad (12)$$

将雨滴谱上每个雨滴的动能累加,得到滤纸上全部雨滴的总动能  $E$ ;再将滤纸上每个雨滴质量累加,除以水的密度和滤纸面积,得降雨深;雨滴的总动能除以降雨深和滤纸面积,即得到该次降雨在单位面积上单位降雨深所具有的能量。这样可以得到降雨动能的计算公式:

$$E = \frac{1}{2} \frac{\sum d^3 v^2}{\sum d^3} \quad (13)$$

式中:  $E$ ——降雨动能[J/(m²·mm)]。

根据实际测量结果进行计算,得到降雨动能与降雨强度满足以下关系(图 3 中实线):

$$E = 26.57I^{0.28}, \quad R^2 = 0.55 \quad (14)$$

式(14)与各个降雨动能经验公式相吻合,即降雨动能随降雨强度的增大而增大,降雨强度的大小和降

雨量的多少在一定程度上决定了降雨动能的大小。同时,由于各地区降雨类型的差异和测量误差导致上述关系式的系数差异。

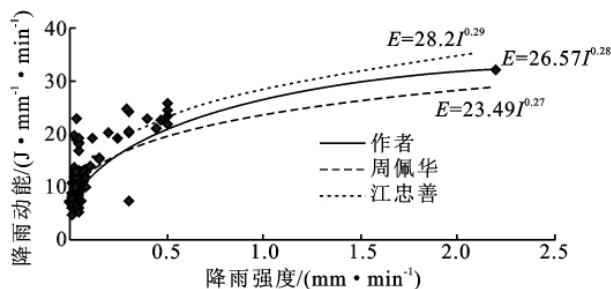


图3 降雨动能与降雨强度关系

图3是几种经验公式曲线,其中实线为杨凌地区降雨动能与降雨强度关系曲线,该曲线位于江忠善和周佩华得出关系曲线之间,较江忠善得出的降雨动能偏小,而较周佩华得出降雨动能偏大;同时,在雨强小于0.5 mm/min时,三种关系曲线重复性较好,当雨强大于1 mm/min时几种关系曲线差别越来越大,这主要是观测的降雨强度主要集中在0.7 mm/min以下,对于大于1 mm/min的降雨观测较少。通过以上分析可以得出杨凌天然降雨雨滴动能与雨强有较强的相关性,呈幂函数关系。

## 4 结论

在前人研究基础上,结合计算机软件研究了杨凌区天然降雨雨滴特性。得到以下结论:

(1)雨滴大小分布符合Best函数分布式,得到了该地区天然降雨雨滴分布的关系式,即

$$F=1-\exp\left[-\left(\frac{d}{2.24I^{0.20}}\right)^{4.86I^{-0.13}}\right]。$$

(2)通过对降雨强度的观测,拟合了雨滴中数直径、降雨动能与降雨强度的关系,即  $D_{50}=2.25I^{0.21}$ ;  $E=26.57I^{0.28}$ ,并将其与以往的经验公式做了对比分析,得出该地区天然降雨雨滴特征与国内其它地区相似。

(3)雨滴分布、雨滴中数直径、降雨动能和降雨强度关系式中的系数与经验公式存在一些差异,是因为降雨雨型的不同和地理位置的差异,以及对于降雨强度大于1 mm/min的天然降雨观测资料不足。因此,在今后的实验中,对于降雨强度大于1 mm/min的降雨将重点观测。

## 参考文献:

- [1] Best A C. The size distribution of raindrops[J]. Quarterly Journal of the Royal meteorological Society, 1950, 76(16):16-36.
- [2] Carter C E, Greer J D, Braud H J, et al. Raindrop characteristics in South Central United States [J]. Transactions of ASAE, 1974, 17(6):1033-1037.
- [3] Hudson N W. The colour pallet method for measuring the size of raindrops[M]. Rehash Bulletin 4, Department of Conservation, Salibuw, Rhodesia, 1964.
- [4] Park S W, Mitchell J K, Bubenzer G D. Rainfall characteristics and their relation to splash erosion [J]. Transactions of the ASAE, 1983, 26(3):795-804.
- [5] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses; A guide to conservation planning[R]. Agricultural Handbook No 537, ARS-USDA, 1978.
- [6] 窦葆璋,周佩华. 雨滴的观测和计算方法[J]. 水土保持通报, 1982, 2(1):44-47.
- [7] 江忠善,宋文经,李秀英. 黄土地区天然降雨雨滴特性研究[J]. 中国水土保持, 1983, 11(3):32-36.
- [8] 周佩华,窦葆璋,孙清芳. 降雨能量试验研究初报[J]. 水土保持通报, 1981, 1(1):51-60.
- [9] 徐向舟. 雨滴粒径的测量方法及其改进研究[J]. 中国水土保持, 2004(2):22-24.
- [10] 舒若杰,高建恩. 基于计算机绘图软件的雨滴谱测定新方法[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(3):65-69.
- [11] 尚佰晓,王瑄,陶伟,等. 沈阳市天然降雨雨滴特征研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(6):139-141.
- [12] 黄炎和,郑添发. 闽东南天然降雨雨滴特征的研究[J]. 水土保持通报, 1992, 12(3):27-33.