

紫色土坡面降雨侵蚀试验研究

王玉宽¹, 王勇强¹, 傅 斌^{1,2}, 王先拓¹, 王道杰¹

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 坡面水蚀的主要侵蚀动力来自降雨及其产生的地表径流, 将坡面水蚀过程分为降雨侵蚀和径流侵蚀, 可以从侵蚀动力、侵蚀特征差异与侵蚀规律等方面研究坡面水蚀过程与机理。应用人工模拟降雨及微小区测定技术, 以大田紫色土为研究对象, 模拟和测定不同雨强与不同坡度条件下降雨侵蚀过程和侵蚀量, 揭示以降雨为主要动力的土壤降雨侵蚀特征和规律。研究结果表明: (1) 小雨强 ($< 67.26 \text{ mm/h}$) 下, 紫色土坡面降雨侵蚀率具有稳定性, 随着降雨历时的增加变化微小; 大雨强 (106.57 mm/h) 下, 降雨侵蚀率随降雨历时增加呈上下波动; (2) 紫色土降雨侵蚀率与降雨强度呈线性相关, 随降雨强度增加而直线增加; (3) 降雨侵蚀率与坡度符合二次抛物线关系, 随坡度的增加出现临界坡度, 且临界坡度随雨强的变化而改变。在中小雨强 ($18.06 \sim 67.26 \text{ mm/h}$) 条件下, 临界坡度 SK 的变化范围在 $17^\circ \sim 19^\circ$ 。在大雨强条件下, 临界坡度有逐渐增大的趋势; (4) 当坡度与雨强共同影响产沙效应时, 坡度对降雨侵蚀的影响较小, 雨强能掩盖坡度对产沙的贡献。

关键词: 紫色土; 坡面降雨侵蚀; 人工模拟降雨

中图分类号: S155.2*5, S157

文献标识码: A

紫色土是四川盆地分布面积最广且最为主要的农业和林业土壤, 其面积约 $16 \times 10^4 \text{ km}^2$, 分布于海拔 800 m 以下的丘陵和低山区。该岩成土壤由紫色岩类风化而成, 长期保持初期发育阶段, 土层较薄, 剖面分化不明显, 易遭侵蚀破坏。紫色土分布区降雨较为丰沛, 多年平均降雨在 1 000 mm 左右, 构成紫色土遭受强烈侵蚀的外在动力。同时, 境内紫色土分布多位于为坡耕地或陡坡地, 破碎的地形和较陡的坡度也是引发紫色土壤严重侵蚀的重要原因。据对川中丘陵区腹心地带的琼江流域水土流失调查表明, 全流域面积 $4\,329 \text{ km}^2$, 土壤侵蚀面积高达 $3\,278 \text{ km}^2$, 占流域面积的 75.5%, 土壤侵蚀的年总量为 $1\,850.5 \times 10^4 \text{ t}$, 侵蚀模数的平均为 $645.6 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 属强度侵蚀^[1]。

坡面水蚀过程的主要动力来自降雨及其产生的地表径流。Ellison (1947a, 1947b, 1947c, 1947d)^[2-5] 将坡面水蚀过程分为 4 个部分: 降雨分

散、降雨搬运以及径流分散和搬运。实际上, 由于试验手段的限制, 很难区分分散作用和搬运作用过程, 降雨侵蚀和径流侵蚀也难以区分^[6]。Foster, Meyer (1969, 1975)^[7,8] 提出了细沟间侵蚀以降雨侵蚀为主, 细沟侵蚀以径流侵蚀为主的观点。美国新一代水蚀预报模型 (WEPP) 将侵蚀过程模型分为细沟间侵蚀和细沟侵蚀两个子模。

根据目前坡面水蚀过程研究进展和经验, 考虑坡面水蚀过程中降雨和径流侵蚀动力的差异和侵蚀特征差异, 可以将坡面水蚀过程研究划分为以降雨侵蚀力作用为主的降雨侵蚀和以径流侵蚀力作用为主的径流侵蚀研究。

为搞清坡面水蚀过程中降雨和径流两种不同侵蚀力的侵蚀特征和规律, 设计了两套试验装置: 一套用于测定以降雨为主要侵蚀动力的试验装置, 该装置由人工模拟降雨机和一个微小区 ($0.35 \text{ m} \times 0.35 \text{ m}$) 组成; 一套放水试验装置, 用于测定股流侵蚀和

收稿日期 (Received date): 2006 - 07 - 21。

基金项目 (Foundation item): 国家 973 计划项目 (2003CB415202), 中科院创新项目 (KZCX3 - SW - 330) [Supported by the Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Science (KZCX3 - SW - 330) and National "973" Project (2003CB415202)]

作者简介 (Biography): 王玉宽 (1963 -), 研究员; 研究领域: 土壤侵蚀与水土保持 [Wang Yukuan, Professor, interested in soil erosion and conservation. E-mail: wangyukuan@imde.ac.cn]

片流侵蚀。本文主要介绍应用第一套试验装置研究坡面降雨侵蚀试验结果。

1 材料与方法

1.1 实验区概况

实验区位于中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站。区域地貌为低山丘陵,气候属亚热带湿润季风气候,年均气温 17.3°C ,极端最高温 40°C ,极端最低温 -5.1°C ;多年平均降雨量 825 mm 。土壤为石灰性紫色土和水稻土。自然植被为亚热带常绿阔叶林次生林,主要树种有柏木、青冈、黄荆、马桑等。农作物主要有玉米、小麦、红薯、棉花、油菜和水稻等。

1.2 试验设计

传统降雨侵蚀试验方法是利用溅蚀杯或溅蚀盘收集被雨滴溅蚀出的土壤颗粒,得到降雨和溅蚀量关系^[11]。但由于这种装置只能测定降雨溅离溅蚀盘的降雨侵蚀量(降雨溅蚀量),无法测定降雨雨滴扰动推移土壤颗粒产生的侵蚀量,因而不能反映降雨雨滴打击作用产生的全部侵蚀量。

为了测定降雨雨滴打击侵蚀量(包括溅蚀量和推移侵蚀量),采取坡面取样方的测定思路,即:降雨过程中在坡面布置一个足够小的微小区,使微小区测定的侵蚀量仅反映降雨雨滴打击侵蚀作用,微小区内薄层水流仅具有搬运作用,其分散作用可以忽略。由于微小区内外地表处理一致,降雨溅出小区和溅入的土壤颗粒量处于动态平衡,可以视为相等。为此,试验设计两种矩形微小区,规格分别为 $0.35\text{ m} \times 0.35\text{ m}$ 和 $0.5\text{ m} \times 0.35\text{ m}$ 用以对比试验,最后选定试验微小区(规格 $0.35\text{ m} \times 0.35\text{ m}$)进行降雨侵蚀量测定。由于微小区长度较小,降雨产生的地表径流强度很小,分散能力弱,侵蚀量可以忽略(利用网垫覆盖小区进行试验,结果显示消除雨滴打击作用后微小区地表薄层水流侵蚀率 $<0.07\text{ g/min}$)。微小区边框高度为 0.1 m ,小区的一边焊接集流槽并由右而左呈一定倾角,保证径流顺利产出。制作材料为不锈钢。小区整体插入可变坡槽内的试验土体,边框高出地表 $0.5 \sim 1\text{ cm}$,小区周边地表处理与小区内相同,达到内外一致。小区边框略高于地表,保证上方径流不会进入小区,同时用以减小边框的影响。

选择五种坡度和五种雨强进行试验,其中坡度分别为: 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 。设计降雨雨强为 18.06 mm/h 、 37.27 mm/h 、 53.40 mm/h 、 67.26 mm/h 、 106.57 mm/h 。

h 、 106.57 mm/h 。

为保证试验前土壤水分含量和容重一致,首先利用 18.06 mm/h 进行第一场湿润降雨,历时 60 min 。湿润降雨后 24 h 用小铲翻耕小区内外土壤 5 cm ,进行第二场湿润降雨,历时 30 min ,雨强 18.06 mm/h 。第二场湿润降雨 5 min 后进行正式试验。每种坡度进行 5 个强度(18.0 mm/h 、 37.27 mm/h 、 53.40 mm/h 、 67.26 mm/h 、 106.57 mm/h)降雨,历时 15 min ,场次间隔 5 min ;采样间隔为 $0.5 \sim 2\text{ min}$,泥沙量采用烘干法获得。试验前在小区外两侧各取 $0 \sim 5\text{ cm}$ 、 $5 \sim 15\text{ cm}$ 两层土样,进行土壤水分和容重测定。

试验使用的人工模拟降雨机为美国引进的槽式下喷降雨机,其主要原理是通过实现多个喷头同时摆动来模拟降雨,并通过调节水压和喷头摆动频率来调节降雨强度。降雨机包括 5 个喷头。降雨强度可调范围为 $0 \sim 120\text{ mm/h}$ 。为了提高降雨的均匀性,采用两台以上降雨机并排使用,两台降雨机中间的降雨为有效降雨。率定试验表明:在 3 m 的降雨高度下,降雨机的有效覆盖范围为 $1.5\text{ m} \times 4.4\text{ m}$ 。

2 结果与讨论

2.1 紫色土坡面降雨侵蚀过程及其特点

根据试验结果,绘制侵蚀率随降雨时间变化的过程曲线,见图 1 A、B。

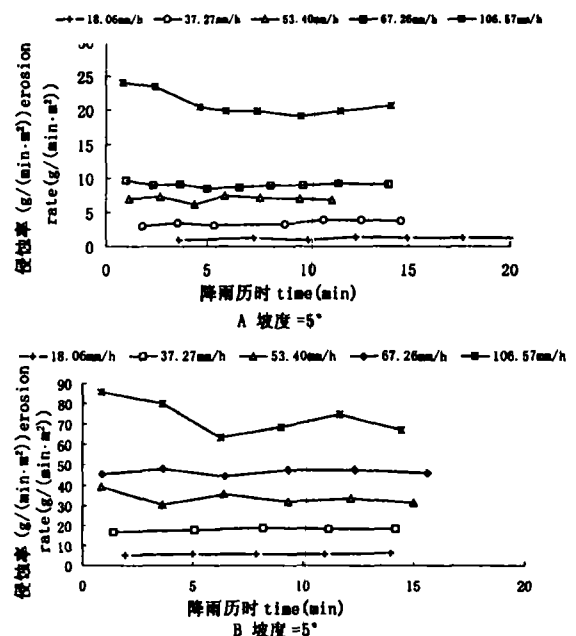


图 1 侵蚀率随时间变化过程

Fig. 1 Erosion ratio changes with rainfall time

由上述曲线可以看出,紫色土坡面土壤降雨侵蚀率,在大雨强(106.57 mm/h)条件下随降雨历时的增加波动较大,在中小雨强时,随降雨历时增加变化较小,较为稳定。造成大雨强时降雨侵蚀率不稳定的原因主要是,大雨强下雨滴对地表击溅和分散作用较强,地表不易形成相对稳定的结构,而雨强较小时雨滴对地表土体结构性破坏能力弱,在降雨强度不变的情况下,坡面土壤的侵蚀率维持在一个相对稳定的水平。

2.2 紫色土坡面降雨侵蚀的影响因素分析

2.2.1 雨强对降雨侵蚀的影响

对五种坡度不同雨强条件下微小区土壤侵蚀率测定结果(图2)进行分析,可以看出,紫色土降雨侵蚀率随雨强的增加近线性增加。其中坡度为5°的小区直线斜率较小,其他几个坡度基本接近。侵蚀率随降雨强度的增加近线性增加,说明降雨侵蚀率与雨强的关系密切,侵蚀率基本由降雨强度所控制。降雨强度的增加实质上增大了雨滴对地面的打击频率,降雨动能增加,雨滴对地表土颗粒分散、击溅、推移作用加强,侵蚀率必然增加。

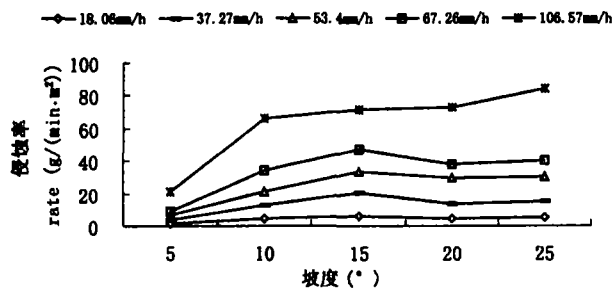


图2 紫色土坡面降雨侵蚀率与地表坡度的关系
Fig. 2 Erosion ratio varied with slope gradient

2.2.2 坡度对降雨侵蚀的影响

地表坡度对降雨侵蚀的影响主要是由于地表坡度的变化改变了雨滴的溅击角度和受雨面积,从而影响雨滴的击溅动力^[9,10]。刘志、江忠善、吴普特(1996)^[11]在黄土高原坡耕地进行人工模拟降雨实验,得出侵蚀量与地表坡度符合二次抛物线方程,存在一临界坡度(大致在22°~30°),并且与雨强有关,中等雨强临界坡度较小,大雨强和小雨强下临界坡度相对较大。

将不同雨强条件下地表坡度与降雨侵蚀率点绘在直角坐标系内(图3),5种雨强条件下侵蚀率随地表坡度的变化趋势大体一致,从5°~10°间表现增

加趋势,10°后增加变得平缓,15°附近到达峰值,然后开始下降,即有临界坡度SK存在。

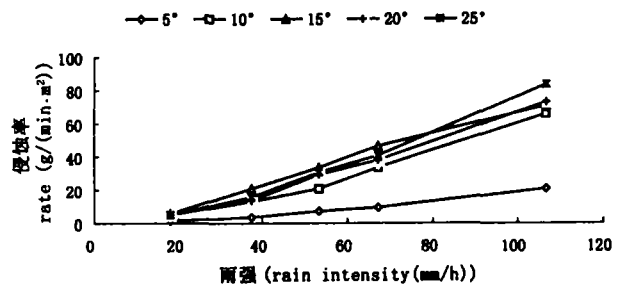


图3 雨强与紫色土坡面侵蚀率的关系
Fig. 3 Erosion ratio varied with rainfall intensity

应用二次抛物线对侵蚀率和坡度的关系进行拟合(表1),结果显示,临界坡度SK与雨强显著相关。在中小雨强(18.06~67.26 mm/h)条件下,临界坡度SK的变化范围在17°~19°。在大雨强条件下,临界坡度有逐渐增大的趋势。

表1 紫色土坡面降雨侵蚀率与地表坡度的回归方程
Table 1 The regress equation of erosion ratio with slope angle

雨强(mm/h)	回归方程	相关系数R	临界坡度(°)
18.06	$S_t = -0.024S^2 + 0.8833S - 2.342$	0.944 14	18.66
37.27	$S_t = -0.0845S^2 + 3.03S - 9.1223$	0.888 482	17.85
53.40	$S_t = -0.1214S^2 + 4.7665S - 13.75$	0.974 064	19.59
67.26	$S_t = -0.1882S^2 + 6.9883S - 19.534$	0.951 105	18.53
106.57	$S_t = -0.203S^2 + 8.7387S - 12.41$	0.944 934	21.50

2.2.3 坡面降雨侵蚀模型

对不同坡度和雨强条件下的降雨侵蚀率试验结果进行统计分析,得到下列经验方程

$$St = 43.32 * (EI)^{1.294} * S^{0.8570}, F = 127.20, R = 0.96, F_{0.01}(2,25) = 5.57$$

式中 St 为侵蚀率 $[g/(min \cdot m^2)]$; E 为雨滴动能 $[kJ/(m^2 \cdot mm)]$; I 为降雨强度 (mm/h) ; S 为坡度因子 $(\%)$

检验结果表明,坡度,降雨侵蚀力与侵蚀率之间呈现多元相关,且相关关系高度显著。对各因素进行相关分析,表明降雨侵蚀力与侵蚀率在0.01水平上相关系数为0.84,坡度与侵蚀率在0.05上相关系数为0.46,这反映出坡度对产沙的影响相对与降雨侵蚀力的影响小的多,降雨对侵蚀率的贡献比坡度大的多,在二者共同作用情况下坡度的作用几乎被降雨侵蚀力所掩盖。

3 结论

根据目前坡面水蚀过程研究进展和经验,考虑坡面水蚀过程中降雨和径流侵蚀动力的差异和侵蚀特征差异,本文提出了从降雨侵蚀力作用为主的降雨侵蚀和以径流侵蚀力作用为主的径流侵蚀研究坡面水蚀过程的思路,并介绍了坡面降雨侵蚀测定技术和初步研究成果,得出以下结论:(1)小雨强($< 67.26 \text{ mm/h}$)下,紫色土坡面降雨侵蚀率具有稳定性,随着降雨历时的增加变化微小;大雨强(106.57 mm/h)下,降雨侵蚀率随降雨历时增加呈上下波动;(2)紫色土降雨侵蚀率与降雨强度呈线性相关,随降雨强度增加而直线增加;(3)降雨侵蚀率与坡度符合二次抛物线关系,随坡度的增加出现临界坡度,且临界坡度随雨强的变化而改变。在中小雨强($18.06 \sim 67.26 \text{ mm/h}$)条件下,临界坡度SK的变化范围在 $17^\circ \sim 19^\circ$ 。在大雨强条件下,临界坡度有逐渐增大的趋势;(4)当坡度与雨强共同影响产沙效应时,坡度对降雨侵蚀的影响较小,雨强能掩盖坡度对产沙的贡献。

由于缺乏天然降雨侵蚀实测资料,本文提出降雨侵蚀模型无法进行检验与印证,今后将结合径流侵蚀研究成果,对降雨侵蚀模型和径流侵蚀模型进行统一检验。

本研究得到了中国科学院盐亭紫色土农业生态站工作人员与研究生的帮助,在此表示感谢。

参考文献(References)

- [1] Guo Yue. Characteristics and pattern of soil erosion in Central Hills of Sichuan Basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(6):9~12, 57[郭跃. 川中丘陵区土壤侵蚀的特征与行为方式[J]. 水土保持学报, 2002, 16(6):9~12, 57]
- [2] Ellison W D. Soil erosion study—Part I. [J] *Agric. Eng.* 1947a, 28: 145~146
- [3] Ellison W D. Soil erosion study—Part II: Soil detachment hazard by raindrop splash[J]. *Agile. Eng.* 1946b, 28:197~201
- [4] Ellison W D. Soil erosion study—Part V: Soil Transport in the splash process. [J] *Agric. Eng.* 1947c, 28:349~351, 353
- [5] Ellison W D, Ellison OT. soil erosion study—Part VI: Soil detachment by surface flow[J]. *Agric. Eng.* 1947d, 28:403~405, 408
- [6] Bagnold R A. An approach to the sediment transport problem from general physics[A]. In: Thorne C R, et al. *The Physics of Sediment Transport by Wind and Water*[C]. New York: Am. Soc. Civ. Eng., 1966. 231~291
- [7] Meyer L D, Wischmeier W H. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water[J]. *Trans. ASAE*, 1969, 12:754~758, 762
- [8] Meyer L D, Feaster L D. Effect of rate and canopy on rill erosion[J]. *Trans. ASAE*, 1975, 18(5):327~341
- [9] Singer M J, John Blackard. Slope angle-interrill soil loss relationships for slopes up to 50% [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1982, 46: 1270~1273
- [10] Theoretical analysis and experimental study on the critical slope of erosion[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(4):347~355, [胡世雄, 靳长兴. 坡面土壤侵蚀临界坡度问题的理论和实验研究[J]. 地理学报, 1999, 54(4):347~356]
- [11] Wu Pute. The Dynamics of Water Erosion Experiment Research [M]. Xi'an: Shaan'xi Science Press, 1997. 12~15[吴普特. 动力水蚀试验研究[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 1997. 12~15]

A Study on the Process Simulation of Soil Erosion by Rainfall on the Purple Soil Slopes

WANG Yukuan¹, WANG Yongqiang¹, WANG Xiantuo¹, FU Bin^{1,2}, WANG Daojie¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As the dominant soil classification in Sichuan Basin, purple soil covers a large area and is crucial for local forestry and agriculture. But due to its slope distribution and fragile property, it experiences serious erosion during rainfalls. This study was conducted by using manual simulation rainfall apparatus and applying a micro-box design method to survey the erosion process on different purple soil slopes. The results showed that (1) Rainfall intensity and time can slightly change the slope erosion rate and a general trend can be described as "even-up-even-down-even" pattern while rainfall intensity and rainfall time increase; (2) At different slope angles, non-liner correlations can be analyzed between soil erosivity and erosion rate. Rainfall increase can result in increase in erosion and spilling effect; (3) In different rainfall intensities, soil erosion rate can be varied with slope angle ascends. And an SK value exists between $17\% \sim 19\%$ but ascends with rainfall intensity increases; (4) Different slope angles can slightly affect the sheet erosion while co-functioning with rainfall intensity.

Key words: purple soil; slope erosion by rainfall; manual rainfall; simulation; Sichuan