

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.02.011

不同降雨强度下滑坡表面冲蚀体积试验

彭守建, 吴善康, 许江, 刘义鑫

(重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:在山区,降雨导致的土壤冲蚀是产生堆积物、改变地貌地形的主要因素。其过程复杂并且受如降雨强度、地表粗糙度等多种因素影响。为研究不同降雨强度条件下降雨对滑坡表面冲蚀的体积指标特性,采用实验室模拟降雨试验平台进行实验,Golden Surfer 软件直接读取堆积体体积、3D 模拟模型研究降雨与输出数量关系等方法,再现了以体积量直接输出的堆积物与降雨之间的关系。结果表明:降雨过程中,坡体深部土壤体积含水率变化较小,浅层土壤孔隙水压与含水率变化较大;降雨初期,降雨入渗有效提高表层孔隙水压力,地表径流小,带沙能力弱;随降雨时间增加,地表径流强度增加是提高水流冲刷力的主要因素,累计冲蚀堆积体体积随降雨强度增加而增大,但是增速减小,其主要原因是降雨后期,地表形成冲刷沟壑,累计冲蚀堆积体体积受地表粗糙程度限制;通过对降雨时间、降雨强度以及冲蚀堆积体体积进行三维拟合,发现三者幂函数曲线的拟合较好。

关键词:降雨强度;体积含水率;孔隙水压力;冲蚀堆积体;三维模拟;模型试验

中图分类号:P642.22

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2019)02-104-08

Experiments of soil erosion under different rainfall intensities on slope surface

PENG Shoujian, WU Shankang, XU Jiang, LIU Yixin

(State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control,
Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Soil erosion is a complex phenomenon involving the detachment and transport of soil particles, storage and runoff of rainwater, and infiltration. The relative magnitude and importance of these processes depends on a host of factors, including rainfall intensity, surface roughness, subsurface soil water pressure, and so on. Thus, in our study, the soil erosion results of a series of experiments were reported in the form of a volume index. Different rainfall intensity in relation to the erosion rate was investigated for the chronological phenomenon and more insight and detail were got to improve estimation of eroded volume of the slope surface. The results show the surface runoff by rainfall is the key factor in producing the soil sediment. And a sequence of rainstorms of increasing intensity on an initially smooth surface cause high soil loss rate, but which will be slowed down with the aggravation of surface roughness and the formation of

收稿日期:2018-07-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51474040)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China(51474040).

作者简介:彭守建(1983—),男,重庆大学副教授,主要从事矿山岩石力学、煤与瓦斯突出灾害动力学与控制等方面的研究工作。

吴善康(联系人),男,重庆大学硕士研究生,(E-mail)632705910@qq.com。

rills. The highlight is the use of 3D fitting model by which the interaction and function among rainfall intensity, duration, and soil yield sediment is investigated.

Keywords: rainfall intensity; moisture content; pore water pressure; yield sediment volume; 3D model; physical model

降雨对土质滑坡体产生表面冲蚀,进而对山区的地形地貌变化产生了重要的影响,同时也是丘陵集水区泥沙供应的主要来源。降雨冲蚀包括 3 个主要过程:脱离、运输、并通过地表径流冲蚀土壤颗粒。随着持续降雨,水渗入土壤的速度被降雨强度和土体入渗能力控制。地表形成径流时,土壤颗粒可溶解或悬浮在坡面流,造成泥沙输运过程。研究坡体冲蚀现象,在理解冲蚀物理原理、地质构造及地表运动、生产力与土壤资源的可持续发展和预测滑坡灾害都有着重要的意义。现在的主要研究集中在水流单位时间内带走沙的能力,与降雨的流量、浑浊度、地表粗糙度等有关,有较强的理论依据。例如对于水流输沙与水流强度耦合关系方面,国内外学者进行了大量的研究,如对于推移质泥沙运动,Carson^[1]认为基于深度与坡度预测输沙能力并不合理,尤其在狭窄的空间,进而提出水流剪切计算式,得出利用切应力指标预报推移质输沙率更佳;Williams^[2]通过实验得出了不同水流强度下推移质输沙率变化情况;而悬移质泥沙运动中,Samaga 等^[3]通过对 4 种不同泥沙混合物进行实验计算,认为决定悬移质输沙率的重要指标为总切应力,Whipple 等^[4]通过固定水流强度对泥沙冲蚀作用进行实验,发现径流渠道化程度对泥沙冲蚀沉积有重要影响,Bridge^[5]通过实验与理论结合,得出水流冲积 3D 模型,Yang^[6]则多次指出,无论是推移质还是悬移质泥沙运动,单位水流功率预测输沙强度要比平均流速、切应力、水流功率等指标优越。在坡面冲蚀预报模型中,国内外也进行了较为广泛的研究^[7-9],均认为输沙与水流强度指标有直接关系,但不同的冲蚀经典模型对于描述水流强度指标侧重点不同。这些模型与研究的特点是:1)考察单位时间内的输沙能力;2)采用输沙质量作为衡量标准。然而,在实际的降雨冲蚀研究中,由于质量数据难以获取,大部分的研究都应该考虑的是冲蚀堆积体体积指标。并且,随着时间的演化,水流输沙能力是否会由于雨水入渗变化、边坡表面变化引起变化也需要进一步探讨。室内人工模拟降雨实验探究降雨强度对坡体冲蚀演化特性的影响规律是最常用的手段之一,张宽地^[10]通过模拟降雨试验,探讨降雨条件下坡面薄层水流的水动力学特性,胡建等^[11]分析模拟降雨条件下华南红壤坡面的水流动力学特征,发现较低降雨强度条件下地表无侵蚀产沙现象。文江苏^[12]通过室内人工模拟降雨试验对不同土壤容重条件下薄层水流特性的变化规律、土壤容重与土壤侵蚀之间的关系以及不同雨强、土壤容重条件下对土壤侵蚀的影响等进行了初步研究。鲁克新等^[13]通过室内模拟降雨实验,得到坡面含水量以坡面中下部最大,坡面中部居中,坡面上部最小。倪三川等^[14]则针对降雨条件下植被边坡护坡以及水文效应进行了相关研究。在本研究中,根据 Ishihara 等^[15]提出的水箱模型,该模型广泛运用于水文预报、水文水资源计算、径流资料插补和水文测验检验等^[16-17],这里用于估算滑坡水文特征即模拟降雨入渗与排水关系。采用室内人工模拟降雨试验,结合视频监控数据通过 Golden Surfer 软件进行体积绘图。在不同降雨强度下,主要考察坡体表面降雨冲蚀产生的堆积体体积随时间变化的规律。另外笔者也考察在不同深度的水文数据是否与表面冲蚀有一定联系。

1 模型试验方法

1.1 降雨冲蚀模型试验

降雨模拟系统主要由水箱、水泵、供水管、阀门、流量计、支撑金属支架和喷头组成。其中 HGL-128 型全自动冷热多用泵为模拟降雨装置提供固定压力,最大流量为 25 L/min,最大扬程为 5 m;玻璃转子流量计的测量范围分别为 10~100 mL/min 和 25~250mL/min,可通过控制流量计流量获得不同的降雨强度。监测系统包括 CYY2 型孔隙水压力传感器,直径 3 cm,高 1.6 cm,测量范围为+10 kPa,输出信号范围为 4~

20 mA, 供电方式为 DC24 V; PHTS 土壤湿度传感器, 测量点为三根钢针, 接触面积不到 20 mm², 测量范围为 0~100%, 分辨率 0.1%, 准确度 $\pm 2\%$, 输出形式为电流 4~20 mA, 供电方式为 DC24 V; 视频监控系統采用 ZION-ipc8000DC1 型高清网络摄像头, 用于监控坡体变化及结合量杯监测坡体内部排水速度、地表径流速度等。数据采集卡为 CK01L0R-C20 型, 采用 RS485 接口, 传输距离远, 稳定性高, 软件采用 MODBUS-RTU 协议, 传输稳定, 通用性好, 多通道模拟量输入, 14 bit ADC 精度, 采集 0~20 mA 电流。另外, 利用 VC++ 自行开发监测软件, 可实现同时对多个传感器实际电流值监测、自动换算需要的输出单位、数据变化曲线图、数据记录和输出, 并可以随时调节监测时间间隔, 如数据采集频率为 20 s/次(该降雨模拟系统研发论文已另文发表, 未见刊)。滑坡物理模型如图 1(a) 所示, 为了便于观察, 斜坡模型采用 8 mm 有机透明玻璃制成, 实验材料由河沙按比例混合 12% 的粘土配成, 其粒径分布见图 1(b)。共分 3 次压土, 前两次压土均匀施加 5 kg 砝码压力, 第三次施加 3 kg 砝码压力。考虑上层土的重力作用, 与表层相比, 深层土体可认为较紧密且渗透率较低, 而表层考虑为较松散的渗透率高材料。表层材料的参数如表 1 所示。另外排水沟 1 主要测试地表径流, 而排水沟 2 测试内部排水。

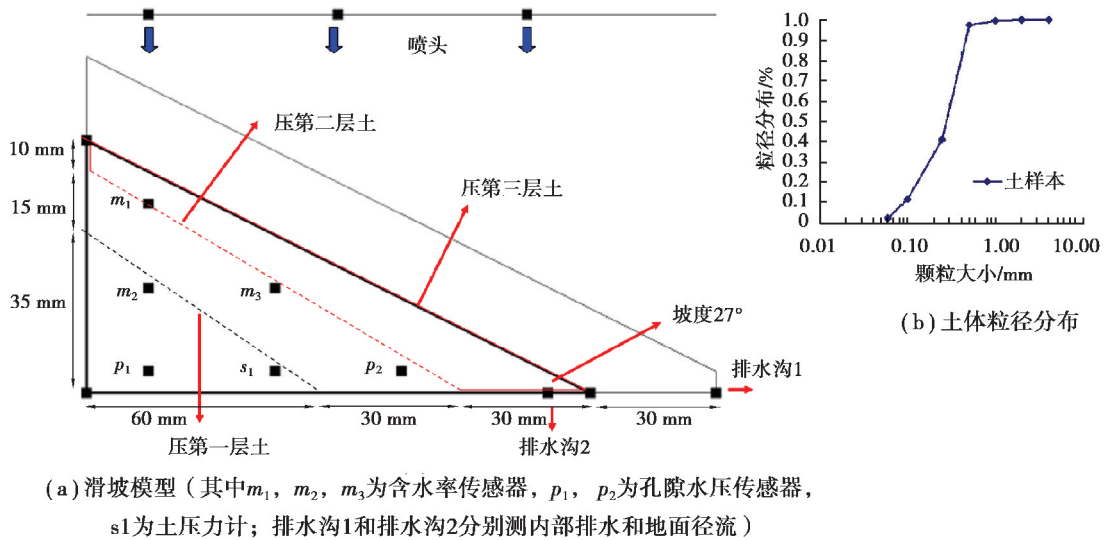


图 1 斜坡物理模型及土体颗粒级配

Fig. 1 The physical model of soil slope and particle gradation

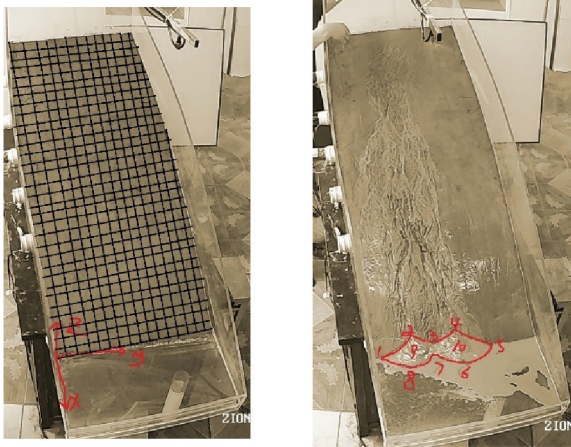
表 1 表层土剪切强度参数

Table 1 The surface soil shear strength parameters

强度属性				物理属性		
内聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	饱和内聚力/ kPa	饱和内摩擦角/ (°)	密度/ (g · cm ⁻³)	饱和密度/ (g · cm ⁻³)	饱和体积含水率/ %
3.2~3.6	32.0~31.4	0~0.1	27.4~29.1	1.82~1.85	2.04~2.07	74.5

1.2 关键体积数据采集

采用高清摄像头对降雨冲蚀模拟实验全过程进行摄像, 对采集的实验全过程视频进行时间点截图画网格分析, 选取能刻画出冲蚀堆积体的特征点(图 2), 参照滑坡模型尺寸对特征点进行坐标估计, 然后采用 Gold surface 软件绘制三维冲蚀堆积体示意图(图 3), 并选用梯值法进行体积计算。因为软件计算体积为包围面到底部水平面的全部体积, 最终堆积体的体积为上表面体积减去下表面在斜坡上投影的体积(为斜坡本身的体积)(图 4)。



(a) 视频网格划分 (b) 冲蚀堆积体特征点

图 2 估算体积坐标示意图 (25 mm/h)

Fig. 2 Estimation of volume coordinates (25 mm/h)

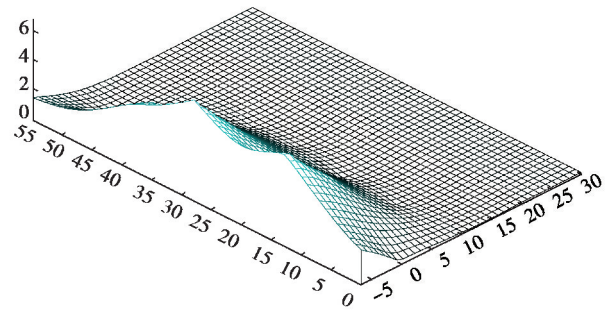


图 3 软件计算示意图

Fig. 3 Yield sediment volume calculation by Golden Surfer

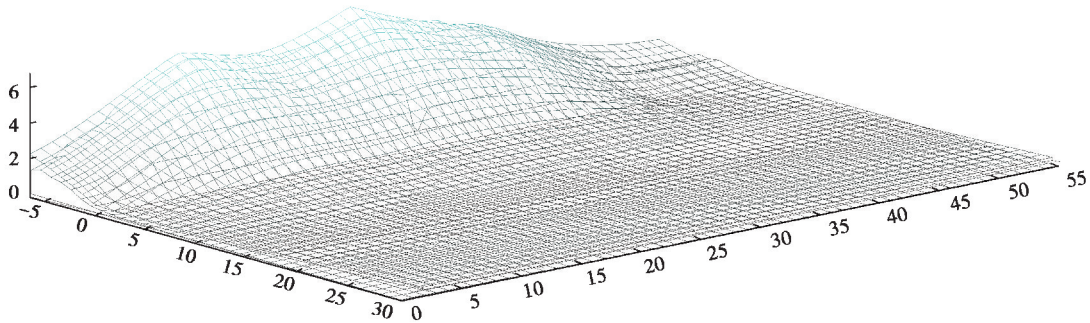


图 4 体积计算网格示意图

Fig. 4 Grid schematic of volume calculation

2 实验结果分析

这里需要说明在 15 mm/h 条件,没有观察到土体的冲蚀现象,所以下面的结果没有包括这一数据。另外,监测数据存在一些丢失,但总体趋势较可靠。

2.1 体积含水率与降雨

图 5 为各含水率传感器在不同降雨强度下其值随时间变化曲线, m_1 、 m_3 距离坡体表面近,其含水率明显高于 m_2 ,这是由于与第二层土壤相比较第一层土较松散,渗透率与含水率都较高; m_3 处含水率略高于 m_1 ,是由于 m_3 位于边坡中部,土壤中水在自重应力作用下向下渗流导致而 m_1 却没有来自上部的渗流补给;整体来看,不同降雨强度条件下,随降雨时间增加,各位置处含水率变化很小,不超过 1%,这是由于降雨时间较短,地表水还未渗入至传感器所在位置。

2.2 孔隙水压力与降雨

孔隙水压力是指土壤或岩石中地下水的压力,该压力作用于微粒或孔隙之间。从 p_1 、 p_2 点在不同降雨条件下孔隙水压力随时间变化曲线可以看出,其中 p_1 点处孔隙水压力为负值,表明该监测点附近含水率较低为非饱和状态。由曲线可以得到,在不同降雨强度条件下, p_1 点处孔隙水压力变化较小,未受到降雨影响,这是由于 p_1 点处土壤紧密,埋藏较深,降雨入渗影响较弱; p_2 点处埋藏较浅,且接近坡脚处,地表径流随降雨强度增大其速度快,流量大,水力冲刷作用明显,导致其孔隙水压力呈上升趋势(p_2),从不同降雨强度条

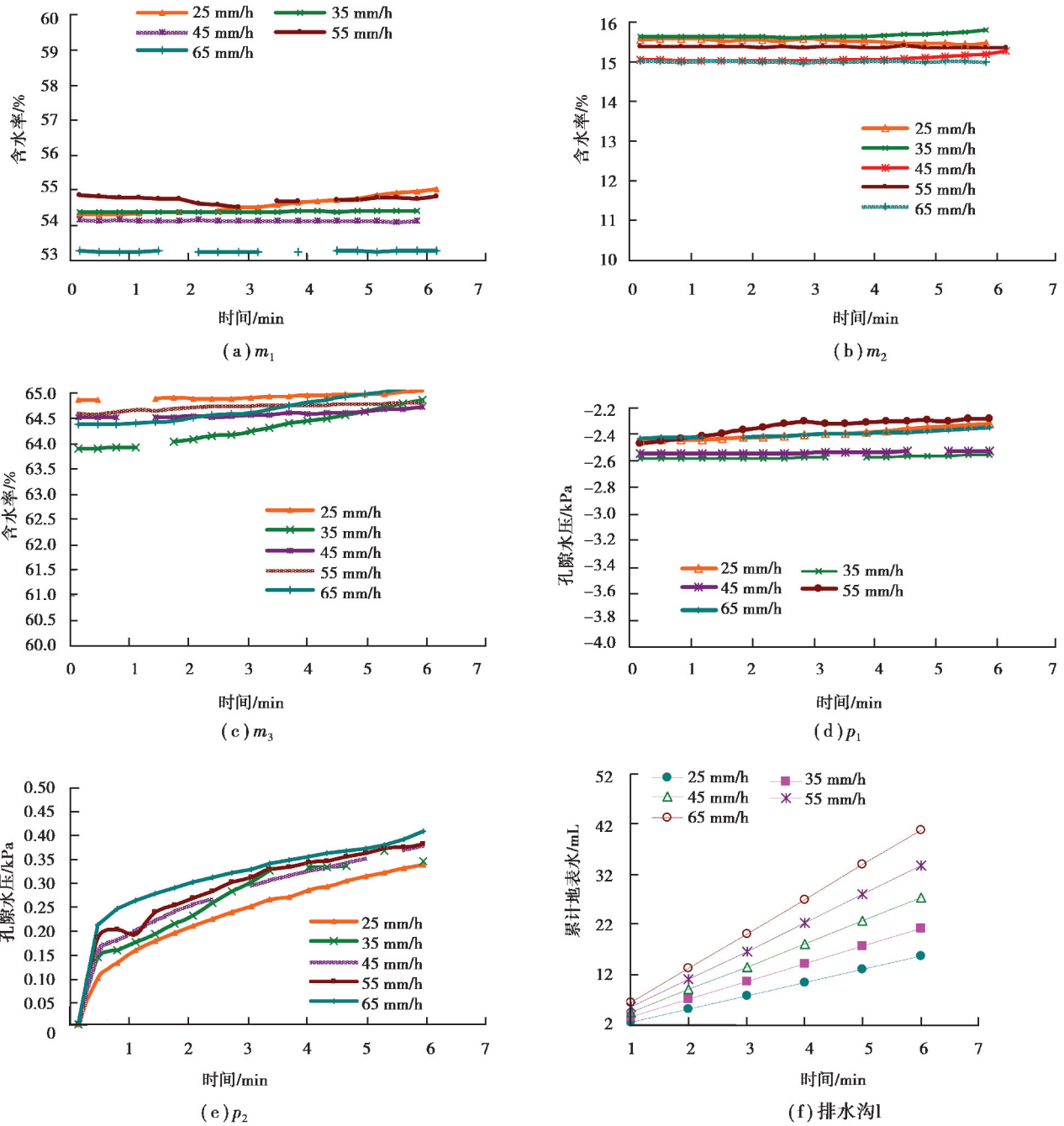


图 5 监测数据

Fig. 5 Monitoring data

件下 p_2 点处孔隙水压力随时间变化曲线可以看得,降雨初期,其孔隙水压力迅速上升,约 30 s 后,其孔隙水压力增长趋势减缓,这是由于降雨初期,雨水入渗是孔隙水压力上升的主导因素,随时间增加,地表径流增大,地表水冲刷作用将部分表层土冲蚀导致土层变薄与雨水自重应力增大是后期孔隙水压力上升的主要因素。

2.3 冲蚀堆积体积与降雨

随降雨时间增加,坡脚处由于降雨冲刷形成堆积体,随降雨强度增大,地表径流强度、流量以及冲蚀力均增大。图 5(f)为不同降雨强度条件下,地表径流累计流量随时间的变化曲线,可以得到地表累计流量随时间变化呈线性关系。图 6 为不同降雨强度条件下,随降雨时间增加累计冲蚀堆积体体积变化三维曲线,从变化

曲线中可以看出,在降雨初期,堆积体体积均很小,不同降雨强度条件下差异不明显,说明此时降雨主要以降雨入渗的方式渗入土壤,导致孔隙水压力上升,地表尚未形成明显地表径流;降雨中期,累计堆积体体积增加随降雨强度增大而增大,说明此时地表已形成明显地表径流,且其带沙能力随降雨强度增大而变强;降雨末期,较强降雨强度条件下在同一时间点累计堆积体体积相近,此时形成地表降雨冲刷沟壑,地表径流主要沿沟壑集中流动,带沙能力达到饱和,不随降雨强度增强而增大。笔者利用 Matlab 进行三维拟合,得出时间、强度与冲蚀堆积体体积之间的三维拟合曲面(图 7)。表 2 为拟合公式拟合所得各参数值,其中式(1)把降雨强度作为底数,降雨时间为指数,可以看出降雨时间对降雨冲刷堆积体体积更加敏感;式(3)(5)(7)把降雨时间作为修正系数与体积呈线性相关,假设累计堆积体体积随强度指数增加;式(9)则把降雨时间与降雨强度分开考虑,二者无直接相互影响关系;同样式(2)(4)(6)(8)(10)相对于以上公式把降雨时间作为主要影响因素,降雨强度作为次要系数;式(11)将降雨时间的幂函数与降雨强度的幂函数的乘积作为计算堆积体体积的主要部分;式(12)则假设累计入渗(降雨时间与降雨强度之积)为影响堆积体体积的主要因素;从表 2 中所得各公式相关拟合参数可以看出,式(7)(11)(12)拟合效果更好(图 7 为式(7)拟合曲面)。

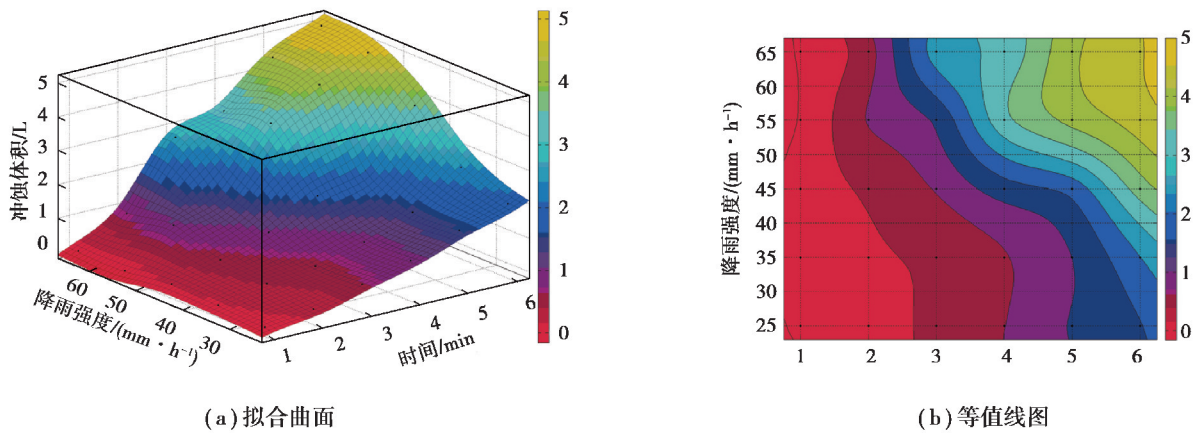


图 6 三维插值模型(降雨强度、持久度、冲蚀体积)

Fig. 6 3D interpolation curve (rainfall intensity, rainfall duration, and yield sediment)

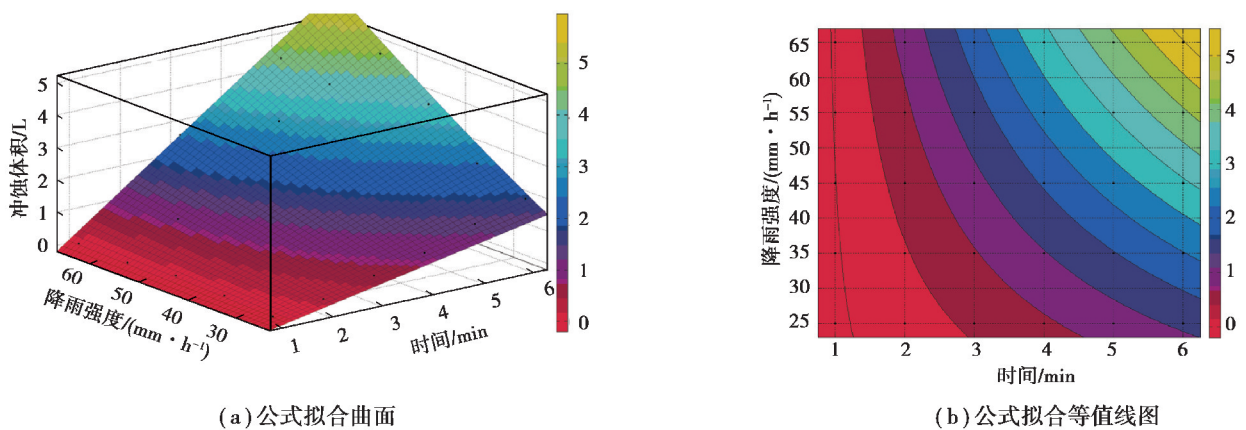


图 7 三维拟合模型(降雨强度、持久度、冲蚀体积)

Fig. 7 3D fitting curve (rainfall intensity, rainfall duration, and yield sediment)

表 2 各种拟合公式
Table 2 Fitted equations

编号	拟合公式	SSE	R-square	RMSE
1	$(a \times y + b)^{(c \times x)} + d$	5.605	0.916 1	0.464 3
2	$(a \times x + b)^{(c \times y)} + d$	6.793	0.898 3	0.501 6
3	$(a \times y + b) \times (c \times x) + d$	13.780	0.793 6	0.728 1
4	$(a \times x + b) \times (c \times y) + d$	22.360	0.665 3	0.927 3
5	$(a \times x + b) \times \exp(c \times y) + d$	3.385	0.949 3	0.360 8
6	$(a \times y + b) \times \exp(c \times x) + d$	4.688	0.929 8	0.424 6
7	$(a \times x + b) \times y^c + d$	3.158	0.952 7	0.348 5
8	$(a \times y + b) \times x^c + d$	15.990	0.760 7	0.784 1
9	$(a \times x + b) + y^c$	9.308	0.860 6	0.587 1
10	$(a \times y + b) + x^c$	9.214	0.862 0	0.584 2
11	$a \times x^b \times y^c + d$	3.200	0.952 1	0.350 8
12	$a \times (x \times y)^b + c$	3.277	0.950 9	0.348 4

注: x 为降雨时间; y 为降雨强度; SSE 计算的是拟合数据和原始数据对应点的误差的平方和, 越接近于 0, 说明模型选择和拟合更好, 数据预测也越成功; R-square 代表通过数据的变化来表征一个拟合的好坏, 越接近 1, 表明方程的自变量对因变量的解释能力越强; RMSE 为回归系统的拟合标准差, 越接近于 0, 说明模型预测能力越强。

3 结 论

根据上述结果和对数据的分析, 可以得到如下几点结论:

- 1) 降雨过程中, 坡体土壤体积含水率变化较小, 且随土壤深度加深, 非饱和度增加, 土壤基质吸力增加, 体积含水率降低;
- 2) 降雨对土壤深处孔隙水压影响较小, 主要作用与浅层土壤, 降雨初期降雨入渗有效提高孔隙水压力;
- 3) 降雨初期, 雨水入渗, 地表径流很小, 带沙能力弱, 各降雨强度条件下冲蚀堆积体体积很小, 随降雨时间增加, 累计冲蚀堆积体体积随降雨强度增加而增大, 降雨后期, 地表形成冲刷沟壑, 累计冲蚀堆积体体积受地表沟壑影响减弱;
- 4) 通过对降雨时间、降雨强度以及冲蚀堆积体体积进行三维拟合, 发现降雨强度与时间和冲蚀堆积体体积的幂函数曲线的拟合相关性较好, 但仍需进一步分析研究。

致谢: 感谢中科院海西院泉州装备制造研究所聂闻博士给予的数据支持, 感谢重庆大学资环学院采矿工程系程立朝博士和西安科技大学能源学院采矿工程系邱华富博士的宝贵意见。

参考文献:

- [1] Carson M A. Measures of flow intensity as predictors of bed load[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987, 113(11): 1402-1420.
- [2] Williams G P. Flume width and water depth effects in sediment-transport experiments[M]. US Government Printing Office, 1970.
- [3] Samaga B R, RangaRaju K G, Garde R J. Suspended load transport of sediment mixtures[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1986, 112(11): 1019-1034.

- [4] Whipple K X, Parker G, Paola C, et al. Channel dynamics, sediment transport, and the slope of alluvial fans: Experimental study[J]. *The Journal of Geology*, 1998, 106(6): 677-694.
- [5] Bridge J S. The interaction between channel geometry, water flow, sediment transport and deposition in braided rivers[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1993, 75(1): 13-71.
- [6] Yang C T. Sediment transport: Theory and practice[M]. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [7] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology[J]. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(5): 1587-1593.
- [8] de Roo A P J. The LISEM project: An introduction[J]. *Hydrological Processes*, 1996, 10(8): 1021-1025.
- [9] Foster G R. Modeling the erosion process[C]//Haan C T, Johnson H P, Brakensiek D L, et al. Hydrologic modeling of small watersheds. American Society of Agricultural Engineers, 1982: 297-380.
- [10] 张宽地. 坡面径流水动力学特性及挟沙机理研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2011.
ZHANG Kuandi. Research on hydrodynamic characteristics of slope surface flow and sediment transport[D]. Xi'an: Northwest A & F University, 2011. (in Chinese)
- [11] 胡建, 郭太龙, 卓慕宁, 等. 华南红壤坡面产流产沙过程模拟降雨试验研究[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(5): 787-791.
HU Jian, GUO Tailong, ZHUO Muning, et al. Erosion processes on red soil slope in south China under simulated rainfall system[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(5): 787-791. (in Chinese)
- [12] 文江苏. 模拟降雨条件下不同土壤容重对土壤侵蚀的影响试验研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2012.
WEN Jiangu. Experimental study on different soil bulk density affecting soil erosion under simulated rainfall conditions[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [13] 鲁克新, 李占斌, 张霞, 等. 室内模拟降雨条件下径流侵蚀产沙试验研究[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(2): 6-9, 14.
LU Kexin, LI Zhanbin, ZHANG Xia, et al. Experimental study on law of runoff-erosion-sediment yield under indoor simulated rainfall condition[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(2): 6-9, 14. (in Chinese)
- [14] 倪三川, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 室内模拟降雨条件下黄土植被边坡径流试验研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(5): 22-25.
NI Shanchuan, HU Xiasong, MAO Xiaoqing, et al. Experimental study on slope runoff of loess slope vegetation under condition of indoor artificial rainfall simulation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(5): 22-25.
- [15] Ishihara Y, Kobatake S. Runoff model for flood forecasting[J]. *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute*, 1979, 29(1): 27-43.
- [16] 李有林. 水箱模型的基本原理及其应用[J]. *甘肃水利水电技术*, 2000, 36(4): 229-232.
LI Youlin. The basic principle of water-tank model and its application[J]. *Guansu Water Resources and Hydropower Technology*, 2000, 36(4): 229-232. (in Chinese)
- [17] 蔡阳, 汪妮, 张永进, 等. 中间件技术在多模型洪水预报 WEB 中的应用[J]. *水利学报*, 2005, 36(3): 350-354.
CAI Yang, WANG Ni, ZHANG Yongjin, et al. Application of middleware technique in Web of flood forecasting system with multiple models[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(3): 350-354. (in Chinese)

(编辑 郑洁)