
试验研究

人工降雨条件下云南红土坡面土壤侵蚀特性

洪斌, 张祖莲, 黄英, 梁谏杰, 邱观贵

(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: [目的] 揭示降雨强度、坡度和坡长与云南红土坡面土壤侵蚀之间的关系, 为云南红土地区土壤侵蚀的防治提供依据。[方法] 采用室内人工模拟降雨试验及理论分析相结合的方法。[结果] (1) 红土坡面侵蚀模数与降雨强度、坡度和坡长的相关关系显著($R^2 > 0.95$)。 (2) 在相同坡度、坡长条件下, 红土坡面侵蚀模数与降雨强度呈幂函数关系; (3) 在相同降雨强度、坡长条件下, 红土坡面侵蚀模数与坡度呈二次多项式关系; (4) 在相同降雨强度、坡度条件下, 红土坡面侵蚀模数与坡长呈二次多项式关系。[结论] 云南红土坡面侵蚀模数随降雨强度的增大而增大; 当坡度小于临界坡度 21.4° 时, 坡面侵蚀模数随坡度的增大而增大, 当坡度大于临界坡度 21.4° 时, 坡面侵蚀模数随坡度的增大而减小; 坡面侵蚀模数随坡长的增大而增大。

关键词: 云南红土; 土壤侵蚀模数; 降雨强度; 坡长; 坡度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)04-0118-06

中图分类号: S157.1

文献参数: 洪斌, 张祖莲, 黄英, 等. 人工降雨条件下云南红土坡面土壤侵蚀特性[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 118-123. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.021

Erosion Characteristics of Yunnan Laterite Under Artificial Rainfall Conditions

HONG Bin, ZHANG Zulian, HUANG Ying, LIANG Jianjie, QIU Guangui

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: [Objective] Revealing the slope erosion of Yunnan laterite as dependent variable caused by independent variables of rainfall intensity, slope gradient, slope length in order to provide bases for the prevention and control of soil erosion in Yunnan laterite area. [Methods] Artificial rainfall erosion was simulated indoor and analyzed theoretically. [Results] (1) The slope erosion of Yunnan laterite could be regressed significantly with rainfall intensity, slope gradient, slope length ($R^2 > 0.95$). (2) Under certain slope gradient and length, the slope erosion modulus of laterite had power function relationship with rainfall intensity as independent variable. (3) Under certain rainfall intensity and slope length, the slope erosion modulus of laterite had a quadratic polynomial relationship with slope gradient. (4) Under certain rainfall intensity and slope gradient, the slope erosion modulus of laterite had a quadratic polynomial relationship with slope length. [Conclusion] The slope erosion modulus of Yunnan laterite increased with the increase of rainfall intensity. When the slope was less than the critical slope 21.4° , slope erosion modulus increased with the increase of slope. When the slope is greater than the critical slope 21.4° , slope erosion modulus decreased with the increase of slope. The slope erosion modulus increased with the increase of the slope length.

Keywords: Yunnan laterite; erosion modulus; rainfall intensity; slope length; slope gradient

云南省地处红土高原, 90%以上属红土地区。分布于地表浅部的红土土质疏松, 稳定性较差, 易散落或被水侵蚀。作为一种区域性特殊土, 红土特殊的工程地质性质对土壤的侵蚀特性有着显著影响。云南

地区属于低纬高原, 横断山脉深度切割, 海拔高差悬殊, 地形地貌复杂, 干湿季节分明, 降雨的时空分布极不均匀, 而近几年的连续干旱使得旱季降雨更是稀缺, 雨季暴雨强度更大, 导致红土地区土壤侵蚀日益

收稿日期: 2015-10-20

修回日期: 2015-11-01

资助项目: 国家自然科学基金项目“云南红土型水库岸库侵蚀失稳机理研究”(51269006), “污染红土宏观响应及污染物的迁移机制研究”(51168022), “云南红土型大坝的干湿循环效应研究”(51568031)

第一作者: 洪斌(1986—), 男(汉族), 浙江省绍兴市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀和水土保持。E-mail: 200602926@163.com。

通讯作者: 张祖莲(1964—), 女(汉族), 云南省昆明市人, 副教授, 主要从事岩土工程及水利水电工程方面的研究。E-mail: zhangzulian@2008.sina.com。

加剧,极大地破坏了区域生态系统,成为云南红土地区严重的环境问题之一。关于土壤侵蚀特性,国内外针对不同性质的土壤,结合影响土壤侵蚀的降雨特性和地形特征,已开展了较多的研究。在降雨强度方面,不少学者对降雨强度与入渗产流规律进行研究^[1-2],在稳渗率变化规律上有所分歧;对降雨强度变化与侵蚀模数的定量关系研究上,主要集中在降雨侵蚀力因子的研究^[3-5],缺乏降雨强度作为单一变量与侵蚀模数的影响关系研究。在坡度、坡长方面,不少学者对该问题进行理论分析和试验研究^[6-12],由于研究的角度、试验土料和试验手段不同,得到的结果相差很大,其差异可归纳为二点:一是侵蚀模数随坡度、坡长增加的变化规律不同;二是建立的土壤侵蚀模数与坡度、坡长的关系式也存在差异。鉴于土壤侵蚀问题的复杂性和多样性,各家提出的观点都有自己的适用范围。就土壤性质而言,以往研究土壤以黄土居多,已取得了不少成果,而关于云南红土侵蚀特性的研究成果却鲜有报道。为此,本研究选用云南红土作为边坡模型材料,在室内人工模拟降雨条件下,开展了云南红土坡面侵蚀特性研究,一是为了揭示降雨强度、坡度和坡长对云南红土坡面侵蚀特性的影响,二是得出侵蚀模数与降雨强度、坡度和坡长的量化关系,其研究成果可为云南红土区的水土流失预测和防治提供参考。

1 研究方法

1.1 试验用土

试验选取云南昆明世博生态城无污染的典型红土作为试验土料,按照《土工试验规程》^[13]测得其机械组成为黏粒 50.2%,粉粒 42.0%,砂粒 7.8%,土壤类型为红黏土。

1.2 试验方案

试验采用的人工模拟降雨试验装置主要由人工降雨系统、模型土槽、泥水收集系统 3 部分组成。人工降雨系统为双喷头下喷式降雨装置,喷头距离地面高度 8.5 m,使大部分雨滴能够达到雨滴终速,能较好的模拟天然降雨,且试验区域的雨滴均匀度达到 80%以上。模型土槽的尺寸为 1.2 m×0.4 m×0.35 m(长×宽×高),土槽底部有 10×5 个直径 5 mm 的小孔,使得土壤的重力水能够自然下渗。泥水收集系统主要由集流槽、径流收集量筒组成。本试验考虑了降雨强度、坡度和坡长这 3 个因素对云南红土坡面侵蚀特性的影响。其中,降雨强度与坡面侵蚀特性研究采用大中型降雨强度,降雨强度范围控制在 0.8~2.0 mm/min,坡度、坡长与坡面侵蚀特性的研究均在相同降雨条件下进行,坡度控制在 10°~30°,坡长采用 5 个不同坡长。具体试验工况详见表 1。

表 1 人工模拟降雨试验方案

试验内容	降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	干容重/ (g·cm ⁻³)	坡度/(°)	坡长/m	降雨 场数
雨强与侵蚀模数的关系	0.8,1.1,1.4,1.7,2.0	1.2	20	1.0	5
坡度与侵蚀模数关系	1.4	1.2	10,15,20,25,30	1.0	5
坡长与侵蚀模数关系	1.4	1.2	20	0.2,0.4,0.6,0.8,1.0	5

1.3 试验过程

将野外取回的红土进行风干,剔除树根、草根、石块等杂物,过 10 mm 筛,按照拟定的干密度、含水率制备好试验土样。填土前在模型土槽底部铺一层纱布和 2 cm 厚细沙,这样既能防止红土从底部开孔处过多流失,又能保证模型边坡的透水性。在模型槽壁上用记号笔按每 5 cm 为 1 层标出每层填筑厚度,共分成 5 层,计算出每层需摊铺的红土量,把试验土样倒入土槽,用垫板、木槌等击实工具轻轻的击打到填筑高度,层与层之间的接触面用刮土刀进行刨毛处理,以便土层之间结合紧密。每次试验前 24 h 都进行一次降雨强度为 30 mm/h 的预降雨,降雨到坡面产流就停止。预降雨使坡体含水在重力作用下进行重新分布,且使边坡土体更接近土壤的自然含水分

布。次日降雨试验前进行降雨强度率定,当实际降雨强度达到预定降雨强度时,进行模拟降雨试验。从产流开始计时,每 3 min 用量筒收集一次泥水样,每次收集时间为 1 min,同时记录径流量,待量筒内悬浊液澄清后,倒去上层清液,用烘干法把剩余泥水样进行烘干,称取侵蚀土的质量。

1.4 数据分析

根据水量平衡原理,把坡面降雨量分成产流、入渗和蒸发 3 个过程,由于室内模拟降雨时间较短,忽略蒸发损失,则坡面平均产流率就是每分钟收集的径流量与坡面实际承雨面积之比,坡面平均入渗率利用公式(1)计算:

$$i = (P_i \cos\theta - 10R/S)/t \quad (1)$$

式中: i ——坡面平均入渗率(mm/min); P ——降雨

强度(mm/min); θ ——坡度($^{\circ}$); R ——降雨时间 t 内产生的径流量(ml); S ——坡面实际承雨面积(cm^2); t ——降雨时间(min)。

坡面红土颗粒流失量用侵蚀模数表示,把 1 min 收集的泥水样的烘干土质量与坡面实际承雨面积之比当作坡面每分钟产生的侵蚀模数,累计 1 h 内每 1 min 的侵蚀模数就得到每小时侵蚀模数。

试验数据采用 Excel 软件进行分析、制图处理。

2 试验结果与分析

2.1 降雨强度对红土坡面侵蚀的影响

2.1.1 降雨强度对红土坡面入渗和产流的影响 在 5 种降雨强度下开展红土坡面侵蚀试验,根据试验数据点绘坡面平均入渗率与产流历时的过程曲线以及坡面平均产流率与产流历时的过程曲线(图 1)。从图 1 中可以看出,在入渗初期,入渗率随时间变化整体上呈减小的趋势,降雨强度为 2.0 mm/min 时的入渗率下降幅度最大,在第 9 min 坡面已进入稳渗状态,而降雨强度为 0.8 mm/min 的入渗率曲线变化趋势较缓,达到稳渗状态需要 24 min 以上,这说明降雨强度大小对坡面入渗率变化幅度和达到稳渗状态的时间有很大影响。在稳渗时期,5 种降雨强度在坡面表现出不同的稳渗率,测得产流第 60 min 时的坡面入渗率大小关系为:1.1 mm/min > 1.4 mm/min > 0.8 mm/min > 1.7 mm/min > 2.0 mm/min,其中降雨强度为 1.1 mm/min、1.4 mm/min 的入渗率比 0.8 mm/min 的入渗率大 0.038 和 0.021 mm/min,说明在一定降雨强度范围内雨滴对坡面雨水入渗具有促进作用,即坡面处于稳渗状态时,入渗雨水主要受到重力、地表水压力和雨滴冲击力作用,雨滴冲击地表加速雨水入渗,使部分静止的毛管水也成为入渗水流。当降雨强度超出这个范围,地表结皮增厚,土颗粒间大孔隙数目减少,降雨促进作用被削弱,入渗率随降雨强度增大而减小。由图 1 可知,红土坡面的平均产流率随产流历时迅速增加并逐渐趋于稳定状态,且降雨强度越大坡面平均产流率变化幅度越大,到达稳流时间就越短。在稳流时期,坡面稳定产流率随着降雨强度的增大而增大,且产流率增加的幅度比较均匀,对比稳定入渗率,降雨强度从 0.8 mm/min 增加到 2.0 mm/min 时,稳定入渗率的变化量仅为 0.09 mm/min,而稳定产流率的变化量达到 1.19 mm/min,这主要原因是云南红土的颗粒组成以粒径小于 0.005 mm 的黏粒含量居多,土壤大孔隙容易被入渗雨水携带的黏粒堵塞,使土壤渗透性变差,表现为稳定入渗

率较小。根据水量平衡原理,当降雨强度增大时,坡面稳定入渗率变化幅度不大,大部分降水量转换成坡面径流量,因此坡面稳定产流率大小主要是由降雨强度所决定的。

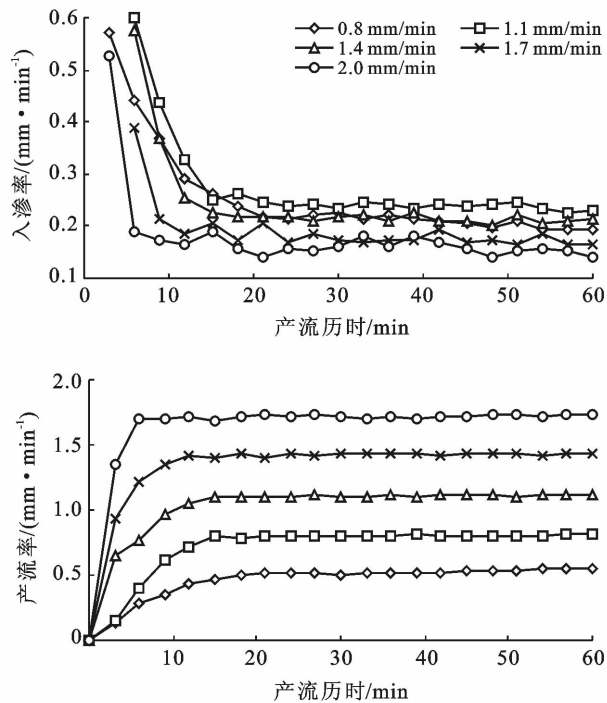


图 1 试验坡面平均入渗率和平均产流率随时间变化

2.1.2 降雨强度对红土坡面侵蚀模数的影响 降雨强度是影响土壤侵蚀的主要外因之一。由坡面每分钟产生的侵蚀模数随时间变化的曲线(图 2)可以看出,在不同的降雨强度下,侵蚀模数随降雨历时变化的趋势整体相同,呈先增大后减小,最后趋于稳定。在产流初期,随着径流量的增大,侵蚀模数急剧上升,且降雨强度越大,曲线上升趋势越陡,这是因为产流初期雨滴击溅坡面堆积了大量散颗粒,随着径流的逐渐增大,松散颗粒首先被带离坡面,使侵蚀模数急剧上升,而降雨强度的大小既决定了雨滴打击表土的破坏能力,同时也决定了坡面径流量的大小,当降雨强度增大时,更多的松散颗粒被径流带走,使曲线上升趋势更陡,因此这阶段在雨滴溅蚀和径流冲刷的联合作用下,坡面表现为侵蚀模数的迅速增加。在产流稳定期,坡面的侵蚀模数逐渐减小,此时坡面的径流量基本稳定,坡面经雨滴长时间打击后形成结皮,结皮随降雨时间的持续不断增厚,使土壤抵抗侵蚀的能力有所增强,雨滴击打坡面的溅蚀作用被削弱,减少了坡面松散颗粒的来源,另一方面,径流稳定后对坡面的冲刷作用表现较为稳定,这也是降雨后期侵蚀模数趋向于稳定的原因。

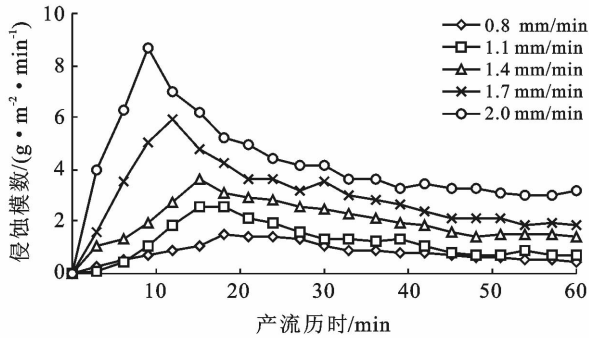


图 2 侵蚀模数随时间变化的过程

图 3 为在 20° 坡条件下 1 小时侵蚀模数随降雨强度变化的关系图。从图 4 可以看出,随着降雨强度的增加,坡面侵蚀模数也随着增加,这是因为降雨强度越大,雨滴溅蚀和径流冲刷作用越强。将 20° 坡的 1 h 侵蚀模数与平均降雨强度进行拟合。

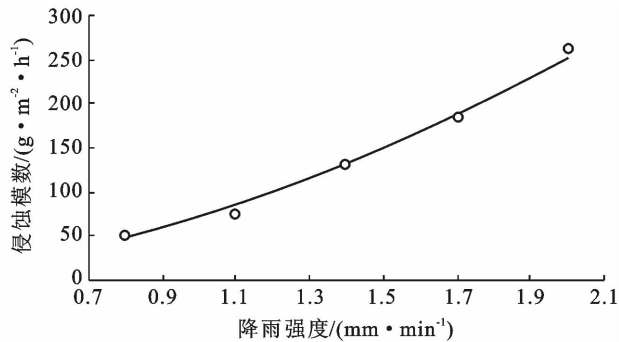


图 3 试验坡面侵蚀模数与降雨强度的关系

$$M = 71.08P^{1.825} \quad (R^2 = 0.988) \quad (2)$$

式中: M ——土壤侵蚀模数 [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]; P ——平均降雨强度 (mm/min)。

从拟合结果来看,红土坡面侵蚀模数与平均降雨强度具有很好的幂函数关系。Wischemeier^[14-15]通过对降雨特性与土壤侵蚀量的回归分析,提出用一次降雨的总动能(E)与该次降雨的最大 30 min 雨强 I_{30} 的乘积作为降雨侵蚀力的定量指标 R , R 指标能够很好地反映降雨特性对侵蚀模数的影响,被各国广泛采用;周佩华、尚佰晓等^[16-17]对降雨特性研究得出降雨动能与平均降雨强度具有幂函数关系。由此可见,降雨侵蚀力可用平均降雨强度的幂函数表示,从而土壤侵蚀模数与平均降雨强度也存在幂函数关系,试验结果也证实了这一点。

2.2 坡度对红土坡面侵蚀模数的影响

坡度是重要的地形特征参数之一,坡度的陡缓反映了重力作用增加或减少的趋势。在降雨强度为 $1.4 \text{ mm}/\text{min}$ 的条件下,开展 5 种坡度的侵蚀模型试

验,点绘每次测得的试验数据,如图 4 所示。从图 4 可以看出,不同坡度的坡面侵蚀模数随时间变化的曲线形状基本相同,都是在产流初期坡面侵蚀模数急剧上升,到径流稳定后侵蚀模数逐渐减少,然后慢慢趋向于稳定。不同的是 20° 和 25° 的坡面侵蚀模数曲线变化幅度最大,达到侵蚀模数峰值的时间也较短,说明随着坡度的改变,坡面的径流量大小、径流速度和径流动能等径流特性产生了显著变化,使坡面土颗粒的流失量变化幅度加大。在固定坡长下,就坡度增加而言,径流位置势能转换成径流动能后,径流流速沿程不断增加,使雨滴在坡面滞留时间缩短,大部分雨滴还未入渗就迅速汇入径流,表现为入渗率减小,径流量略有增加,且坡面松散颗粒随坡度增加后稳定性变差,更容易被径流剥离和输送。而在 10° 和 15° 坡度时,降雨作用使坡面产生径流的时间通常较晚,20 min 后才出现最大侵蚀模数,说明径流能量较小,土颗粒的输移能力不足,虽然理论上 10° 和 15° 承雨面积比 20° 坡面承雨面积大 0.045 和 0.026 倍,具有更大的径流量,但剥离、输移土颗粒的径流总动能是由径流量和径流流速共同决定的, 20° 坡位置势能的增加产生更大的径流动能,导致坡面土壤产生更大的侵蚀模数。从 30° 坡的侵蚀模数曲线来看,从侵蚀发生到出现最大侵蚀模数时间比较短,说明坡面溅蚀产生的松散颗粒极不稳定,在较高的坡面流速下非常容易被冲刷,提前出现了峰值现象。相比较 20° 和 25° 坡, 30° 坡的侵蚀模数反而下降,其主要原因是 30° 坡的承雨面积有了显著的减小,击打坡面的降雨总动能减小,相对应由溅蚀分散的土颗粒就减少。

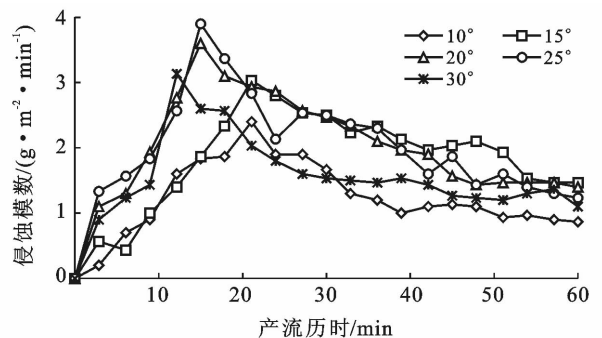


图 4 试验坡面侵蚀模数随时间变化的过程

图 5 为在降雨强度为 $1.4 \text{ mm}/\text{min}$ 的条件下, 1 h 内的侵蚀模数与坡度变化的关系曲线。从图 5 可以看出,侵蚀模数随坡度在 $10^\circ \sim 20^\circ$ 范围内呈递增趋势,坡度从 $25^\circ \sim 30^\circ$ 又呈减小趋势,坡度为 20° 和 25° 的侵蚀模数大小非常接近。在试验的坡度范围内侵蚀模数与坡度可以很好地拟合为二次多项式。

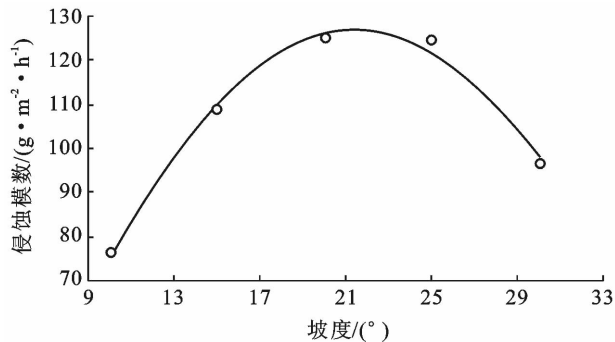


图5 试验坡面侵蚀模数随坡度变化的关系

$$M = -0.393S^2 + 16.84S - 53.64 \quad R^2 = 0.991 \quad (3)$$

式中: M ——土壤侵蚀模数 [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]; S ——坡度 ($^\circ$)。

把将公式(3)进行求导,得到极值 21.4° ,即红土坡面侵蚀的临界坡度为 21.4° 。该试验结果与诸多学者提出的临界坡度略有差异,曹文洪、刘青泉、李全胜等^[6-8]通过理论计算得出临界坡度范围基本在 $40^\circ \sim 50^\circ$ 之间,但理论计算的公式往往忽略雨滴作用力项,得出的结果是以坡面径流冲刷作用为主导的临界坡度值,显然理论计算的结果偏大;张会茹、张怡、王占礼等^[9-11]通过试验测得临界坡度值基本在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间,产生差异的主要原因是研究角度的不同和土壤性质的不同。因此,每个临界坡度的提出都有其适用范围,适用范围应该明确处于溅蚀、面蚀和沟蚀等哪个侵蚀阶段和适用于黄土、红壤和紫土等哪种土壤。结合试验结果分析,本试验处于面蚀阶段,由此可知,降雨作用下云南红土发生坡面侵蚀的临界坡度值在 21.4° 左右。

2.3 坡长对红土坡面侵蚀模数的影响

坡长是地形特征的另一重要参数,坡长的长短与坡面入渗、产流特性密切相关。试验在 20° 坡和 $1.4 \text{ mm}/\text{min}$ 降雨强度下进行,把试验所测的数据点绘成降雨过程中侵蚀模数随时间变化的曲线(图6)。从图6可以看出,在产流初期,随着坡长的增加,坡长为 1.0 m 的坡面侵蚀模数随产流历时增长较快,而坡长为 0.2 m 的坡面侵蚀模数随产流历时增长相对慢些,其主要原因在于:随着坡长增加,一方面,由径流位能引起的径流流速的增加,使坡面径流具有更强的剥离、输移土颗粒的能力;另一方面,坡面径流流速增加就会减少坡面沿程的下渗量,从而使产流量增加,可以携带更多的颗粒。在径流稳定期, 1.0 m 坡长的侵蚀过程中出现了峰值侵蚀模数 $3.6 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$,而 0.2 m 坡长的峰值侵蚀模数只有 $1.2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$,说明了坡长对坡面侵蚀模数具有非常大的影响,这主要还是体现在径流量、径流流速、径流动能、径流水深

等径流特性的变化对坡面侵蚀模数的影响上,坡长越长对径流特性的影响越大,雨滴在坡面汇聚成径流后,径流沿程动能随坡长增加不断增大,且径流在途中再次受降雨雨滴的紊动作用,促使径流对坡面的冲刷和携沙能力进一步加强。

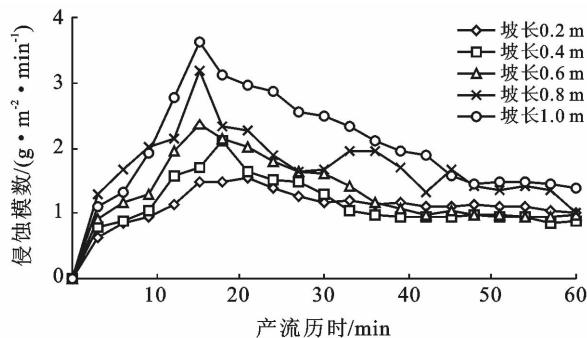


图6 试验坡面侵蚀模数随时间变化的过程

在 20° 坡和 $1.4 \text{ mm}/\text{min}$ 降雨强度下,1 h侵蚀模数与坡长的关系如图7所示。图7表明,在一定的坡长范围内,随着坡长的增加,侵蚀模数呈上升趋势,用二次多项式能很好地拟合侵蚀模数和坡长的关系, R^2 值达到 0.9 以上。

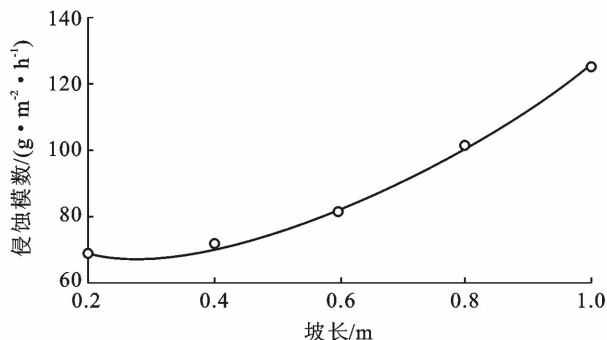


图7 试验坡面侵蚀模数与坡长的关系

$$M = 93.15\lambda^2 - 39.99\lambda + 72.79 \quad (R^2 = 0.999) \quad (4)$$

式中: M ——侵蚀模数 [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]; λ ——坡长 (m)。

比较以往的研究成果,刘和平^[18]通过室内人工降雨试验,Lal^[19]通过径流小区天然降雨资料分析都证明了坡面侵蚀模数与坡长存在二次多项式的关系,本研究在降雨试验条件下亦得出相似结论,只是式中的系数因试验降雨强度、坡长和土壤性质等条件的不同有所不同。

3 结论

(1) 坡面入渗率随着降雨强度的增加,总体呈减小趋势,在一定降雨强度范围内,坡面稳渗率有微小

的变化;坡面产流率随着降雨强度的增加而增加,因红土入渗率对产流率的影响较小,降雨强度对产流率起了主导作用;坡面侵蚀模数随降雨强度的增大而增大,坡面侵蚀模数与降雨强度呈幂函数增加。

(2) 不同坡度的坡面侵蚀模数随降雨时间变化都表现为先增大后减小的趋势;当坡度从 10° 增加到 30° 时,坡面侵蚀模数随坡度增加呈先增加后减小的变化趋势,在 21.4° 存在临界坡度。

(3) 坡长对红土坡面侵蚀模数的影响主要表现为坡长越长,坡面侵蚀模数就越大,且坡面侵蚀模数与坡长呈二次多项式关系。

(4) 试验得到了坡面侵蚀模数与降雨强度具有幂函数关系,简化了以往计算降雨动能、降雨侵蚀力来预测侵蚀模数;试验得到了红土坡面在面蚀阶段的临界坡度值,该值与前人研究的临界坡度值有差异,但更适用于云南红土边坡;试验得到了坡面侵蚀模数与坡长的关系,这与部分学者的结论相似,但试验坡长条件受到模型尺寸的约束,因此该结论适用于短坡条件。

(5) 本试验考虑了降雨强度、坡度和坡长作为单一变量来研究红土坡面的侵蚀特性变化,并没有模拟自然环境中降雨强度、坡度和坡长等因素随机组合影响坡面侵蚀的情况,故尚需进一步开展不同降雨特性、地形因子相互组合的试验研究。

[参 考 文 献]

- [1] 耿晓东,郑粉莉,张会茹.红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J].水土保持学报,2009,23(4):39-43.
- [2] 杨晓俊.用人工降雨揭示降雨产流特征和降雨入渗规律[J].地下水,2007,29(2):18-21.
- [3] 张建国,范建容,王玉宽,等.重庆市降雨侵蚀力(R值)的时空分布特征[J].水土保持研究,2004,11(1):56-59.
- [4] 刘斌涛,陶和平,宋春风,等.1960—2009年中国降雨侵蚀力的时空变化趋势[J].地理研究,2013,32(2):245-256.
- [5] 杨子生.滇东北山区坡耕地降雨侵蚀力研究[J].地理科学,1999,19(3):265-270.
- [6] 曹文洪.土壤侵蚀的坡度界限研究[J].水土保持通报,1993,13(4):1-4.
- [7] 刘青泉,陈力,李家春.坡度对坡面土壤侵蚀的影响分析[J].应用数学和力学,2001,22(5):449-457.
- [8] 李全胜,王兆骞.坡面承雨强度和土壤侵蚀临界坡度的理论探讨[J].水土保持学报,1995,9(3):50-53.
- [9] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):40-43.
- [10] 张怡,丁迎盈,王大安,等.坡度对侵蚀产沙及其粒径分布的影响[J].水土保持学报,2015,29(6):25-29.
- [11] 王占礼,王亚云,黄新会,等.黄土裸坡土壤侵蚀过程研究[J].水土保持研究,2004,11(4):84-87.
- [12] 孙亚平,张科利,唐克丽.坡长对侵蚀产沙过程影响的模拟研究[J].水土保持学报,2001,15(2):7-20-24.
- [13] 南京水利科学研究所.SL237-1999 土工试验规程[S].北京:水利水电出版社,2000.
- [14] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss[J]. Transactions of American Geophysical Union, 1958,39(2):285-291.
- [15] Wischmeier, W H. A rainfall erosion index for universal soil loss equation[J]. Soil Science Society Proceedings, 1959,23(3):246-249.
- [16] 周佩华,窦保障,孙清芳.降雨能量的试验研究初报[J].水土保持通报,1981,1(1):51-56.
- [17] 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.
- [18] 刘和平,王秀颖,刘宝元.短坡条件下侵蚀产沙与坡长的关系[J].水土保持学报,2011,25(2):1-6.
- [19] Lal R. Soil degradative effects of slope length and tillage methods on Alfisols in Western Nigeria(I): Runoff, erosion and responses [J]. Land Degradation & Development, 1997, 8(3): 201-219.