

文章编号: 1008 - 2786 - (2017) 4 - 000 - 08

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000251

# 降雨作用下红土型坡面径流特性 与土壤侵蚀的关系研究

张祖莲 洪 斌 黄 英 梁谏杰 邱观贵

(昆明理工大学 电力工程学院,昆明 650500)

**摘 要:** 针对云南红土型坡面和一定的雨强、坡度,运用人工模拟降雨水槽模型试验、土工试验及相关理论分析相结合的研究方法,揭示降雨作用下云南红土型坡面径流的水动力学特性及红土干密度、坡面侵蚀模数与坡面径流剪切力之间的关系。结果表明:(1)坡面径流平均流速随坡面径流历时呈先逐渐增大后趋于稳定的变化趋势,且坡面径流的平均流速随红土干密度的增大而显著增加。坡面径流平均流速与单宽流量呈幂函数关系( $R^2 = 0.996$ )。(2)坡面径流平均水深随径流历时也呈先上升而后趋于稳定的变化过程,且干密度越大,平均径流水深也越大,平均径流水深与单宽流量也呈幂函数关系( $R^2 = 0.996$ )。(3)在试验条件下,坡面径流流态属层流急流流态。(4)在试验条件和干密度一定的条件下,坡面侵蚀模数随径流剪切力的增大而增大,二者之间呈线性关系,当干密度为 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4  $g/cm^3$  时,  $R^2$  最小为 0.816, 最大为 0.945; 坡面红土的临界剪切力分别为 0.482, 0.510, 0.556, 0.586, 0.656 Pa。坡面径流特性受多种因素的联合作用,坡面侵蚀模数及红土临界剪切力与坡面径流特性和土壤自身特性密切相关。

**关键词:** 红土; 坡面径流; 干密度; 侵蚀模数; 临界剪切力

**中图分类号:** P642.2; X43 **文献标志码:** A

坡面径流具有独特的水动力学特性<sup>[1]</sup>。坡面径流剪切力会剥离、输移土壤颗粒,且径流剪切力与坡面径流的水动力学特性密切相关。坡面径流与土壤侵蚀之间存在错综复杂的关系。例如,在坡面径流流速方面,得到了较为统一的流速与坡度、流量之间呈幂函数关系的数学表达式<sup>[2-6]</sup>。有研究认为,坡面径流水流功率能够较为准确地预测径流对土壤的剥离能力<sup>[7-9]</sup>。然而,由于坡面径流自身的复杂性以及试验条件、试验土壤、研究方法的差异,对坡面径流流态的认识并不统一,主要有以下三种观点: 1) 坡面径流可在相当长的坡面流程内保持层流,即认为层流是坡面径流的主要流态<sup>[10]</sup>。2) 坡面径流的层流雷诺数远大于明渠水流,只有当雷诺数大于 900 时,坡面径流才不再保持层流状态; 而且坡面径

流雷诺数在坡面侵蚀过程中是由小到大不断变化的,导致坡面径流流态成为介于层流到紊流的过度流态,只有当流量较大时,坡面径流才进入紊流流态,即在一般情况下,坡面径流有层流、过渡流和紊流三种流区,而降雨时的坡面层流实际上是一种伪层流<sup>[11-13]</sup>。3) 由于坡面径流同时受下垫面和降雨的影响,因而坡面径流既不稳定又不均匀,具有急流特点,且受边壁扰动大,结合其雷诺数的大小,认为坡面径流属于急流范畴<sup>[14-15]</sup>。在径流剪切力方面,建立了土壤侵蚀模数和径流剪切力之间的关系<sup>[16-17]</sup>,认为坡面径流对土壤的分离能力与径流剪切力之间呈线性关系<sup>[18]</sup>。总体来看,对坡面径流水动力学特性及其与土壤侵蚀的关系研究尚不完善,还有待于进一步深入。

收稿日期(Received date): 2016 - 07 - 21; 改回日期(Accepted date): 2016 - 09 - 05

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金地区基金项目(51269006; 51568031)。[Region Program of National Natural Science Foundation of China (51269006; 51568031)]

作者简介(Biography): 张祖莲(1964 -),女,云南绥江人,副教授,主要从事岩土工程及水工结构工程研究。[Zhang Zulian(1964 -), female, born in Suijiang, associate professor, mainly engaged in the research of geotechnical engineering and hydraulic structure engineering.] E-mail: zhangzulian@2008.sina.com

坡面径流水动力学特性的研究对揭示土壤侵蚀过程和发展趋势有重要作用。进行云南红土地区降雨作用下坡面径流特性与坡面侵蚀之间关系的研究,可为云南红土地区坡面水蚀预报模型的建立提供理论依据。

## 1 试验研究方法

2014年10月初开始准备人工模拟降雨试验的相关工作,11月初试验装置和模型土槽制作完成并开始初步试验。经多次改进、完善后,于2015年2月初系统地开展人工模拟降雨试验,并同步开展相关土工试验,2015年11月底完成试验工作。

### 1.1 试验材料及装置系统

试验材料选用无污染典型云南红土,测得其物理特性指标如表1所示。

试验装置系统包括人工模拟降雨装置、模型土槽坡面和水沙收集装置。人工模拟降雨装置由供水水源和双喷头下喷式降雨装置组成,其作用是利用喷头喷出的水流模拟天然降雨,为试验提供所需的雨强和雨量。喷头离模型土槽坡面的高度达8.5 m,使得大部分雨滴降落到模型土槽坡面时都能达到雨滴终速,且雨滴均匀度满足试验要求。模型土槽由坡体、出水口、坡度调节装置、支座四部分组成(如图1所示)。模型土槽采用1.2 m(长)×0.4 m(宽)×0.35 m(高)的尺寸。为便于试验过程中模型土槽坡面土体水分的自然下渗,在模型土槽的底部开有小孔。出水口位于模型土槽坡底处,呈三角形,其作用是汇集土槽坡底流出的径流。坡度调节装置的主要作用是根据试验需要调节土槽坡面的坡度,其次是将土槽主体荷载传到支座。泥水收集系统由集流槽和径流泥沙收集量筒组成,其作用是收集降雨作用下模型土槽坡面的径流和泥沙。

### 1.2 试验方法与参数测试

选择合适的野外地点取试验用土,并对试验用土进行相关处理,使之符合试验要求,再根据拟定的试验条件制备土样。制作模型土槽时,为保证土槽



图1 模型土槽

Fig. 1 Model soil trough

土体的透水性和避免红土在底部开孔处的过多流失,在模型土槽底部先铺设一层纱布,然后在纱布上铺设2 cm厚细沙。模型土槽土体分层填筑,填筑时注意层与层之间接触面的处理,以保证各层间的有机结合。填筑完成的模型土槽坡体长1.0 m,宽0.4 m,深0.3 m。

为使模型土槽坡体接近于自然边坡情况,每次试验前都进行降雨强度为30 mm/h的预降雨,预降雨时间为试验开始前24 h,预降雨历时为降雨开始到土槽坡面发生产流为止。在进行正式试验时,首先率定降雨强度,直到降雨强度与试验预定的降雨强度吻合时,才进行模拟降雨模型试验。观测到模型土槽坡面开始产流时,采用量筒对泥水样进行收集,同时测试径流参数。每次收集泥水样的时间为1 min,每次收集间隔为3 min。对收集的泥水样进行澄清并除去清液,然后烘干并称取土的质量。

人工模拟降雨试验在土槽坡度20°、坡长1.0 m的试验条件下进行,分别研究了1.0,1.1,1.2,1.3,1.4 g/cm<sup>3</sup> 5种不同干密度坡体的坡面径流水动力学特性,同时研究了干密度、侵蚀模数与径流剪切力之间的关系。为完整、清晰地观测模型土槽坡面的侵蚀过程,结合云南所发生的季节性降雨特点,试验采用1.4 mm/min降雨强度,降雨历时为1 h。

为获取人工模拟降雨试验中模型土槽坡面径流的流速,根据高锰酸钾在水中扩散率低的特点,利用其作为示踪溶剂,通过跟踪高锰酸钾在水中的运动来测试坡面径流表层的最大流速。将坡面径流表层

表1 试验红土的基本特性

Tab. 1 Property of the test laterite

比重 $G_s$	最优含水率 $\omega_{op}/\%$	最大干密度 $\rho_{dmax}/g \cdot cm^{-3}$	颗粒质量分数/%			稠度指标/%		
			砂粒	粉粒	黏粒	液限	塑限	塑性
			>0.075mm	0.005~0.075mm	<0.005mm	$\omega_L$	$\omega_p$	指数 $I_p$
2.70	25.5	1.50	8.8	41.0	50.2	44.9	28.8	16.1

最大流速乘以文献 [19] 中建议的相关修正系数, 获得坡面径流的平均流速。当坡面开始产流时, 每隔 3 min 用高锰酸钾溶剂测一次, 每场降雨共计测试历时为 30 min。采用 (1) 式计算坡面径流平均水深:

$$h = \frac{q}{V} = \frac{Q}{V \times B \times t} \quad (1)$$

式中:  $h$  为坡面平均水深 (cm);  $q$  为单宽流量 ( $\text{cm}^3 / (\text{min} \cdot \text{cm})$ );  $Q$  为  $t$  时间内产生的坡面径流量 ( $\text{cm}^3$ );  $V$  为坡面径流平均流速 ( $\text{cm/s}$ );  $t$  为径流收集时间 (min);  $B$  为过水断面宽度 (cm), 即模型土槽坡面宽度。

采用 (2) 式计算雷诺数  $Re$ 、采用 (4) 式计算弗汝德数  $Fr$ 、采用 (5) 式计算径流剪切力 (Pa)。

$$Re = \frac{VR}{\nu} \quad (2)$$

式中:  $V$  为坡面径流平均流速 ( $\text{cm/s}$ );  $R$  为水力半径 (cm);  $\nu$  为坡面径流运动粘滞系数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )。

坡面径流运动粘滞系数按以下 (3) 式计算:

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337T + 0.000221T^2} \quad (3)$$

式中:  $\nu$  为坡面径流运动粘滞系数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ );  $T$  为水温 ( $^\circ\text{C}$ )。

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (4)$$

式中:  $V$  为坡面径流平均流速 ( $\text{m/s}$ );  $g$  为重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ );  $h$  为坡面径流平均水深 (m)。

$$\tau = \gamma RJ \quad (5)$$

式中:  $\gamma$  为水的容重 ( $\text{N/m}^3$ );  $R$  为水力半径 (m);  $J$  为水力坡度。在试验条件下, 由于降雨在模型土槽坡面形成的径流深度很浅, 因此水力半径  $R$  近似地以平均径流深度代替。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 降雨作用下红土型坡面径流水动力学特性

#### 2.1.1 流速

一方面, 坡面径流流速是建立土壤坡面侵蚀物理模型的基础, 也与坡面径流其他水动力学参数密切相关; 另一方面, 流速越大, 坡面径流的冲刷能力就越强, 水流对坡面土壤的剥离、输移能力也随流速的增加而增大, 所以, 流速是反映坡面径流的重要特征参数。

在降雨强度为  $1.4 \text{ mm/min}$ 、坡度为  $20^\circ$  条件

下, 针对  $1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 \text{ g/cm}^3$  5 种不同初始干密度的模型土槽坡面, 从坡面产流开始计时, 得出其坡面径流的平均流速随时间的变化如图 2 所示, 坡面径流流速与单宽流量的关系如图 3 所示。

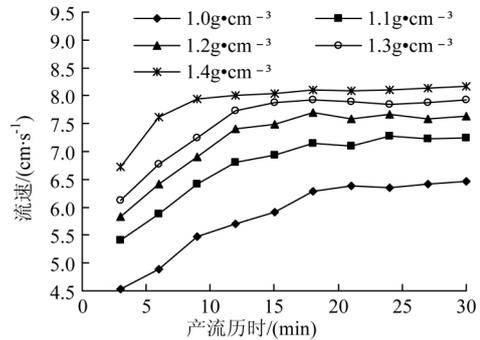


图 2 坡面径流流速随时间的变化

Fig. 2 Relationship between slope runoff velocity and duration

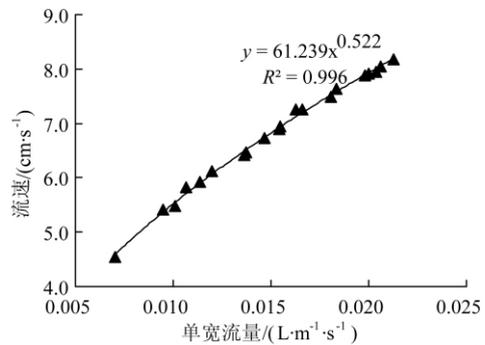


图 3 坡面径流流速与单宽流量关系

Fig. 3 Relationship between slope runoff velocity and flow per unit width

图 2 表明: 坡面径流平均流速随产流历时呈先逐渐增大后趋于稳定的变化过程。其原因在于: 虽然在降雨试验前 24 h 进行了预降雨, 但降雨试验开始时, 土壤水分流失, 导致产流初期坡体土壤仍为非饱和状态, 部分降雨在坡面发生入渗, 从而形成的坡面径流量较小, 坡面流速也较小。随着降雨和坡面产流的持续, 坡体土壤逐渐趋于饱和, 导致坡面径流量逐渐增大, 最后趋于稳定, 因而坡面流速也逐渐增大, 最后也趋于稳定。由此说明, 降雨条件下坡面径流量的大小与坡面径流的平均流速密切相关。

图 2 还表明: 在相同雨强和相同坡度条件下, 坡面径流平均流速随模型土槽土体初始干密度的增加而显著增加, 且初始干密度越大, 模型土槽坡面达到相对稳定流速的时间越短。其原因在于: 土体干密度与孔隙率呈反相关关系, 即土体孔隙率随干密度

的增大而减小,而孔隙率的大小又影响着降雨条件下坡面土体的入渗情况。当土体干密度减小、孔隙率增大时,水流的入渗能力相对越强,也即单位时间内入渗的水流就越多;反之,当土体干密度增大、孔隙率减小时,水流的入渗能力就相对减弱,单位时间内入渗的水量就越小,因而随着干密度的增大和孔隙率的减小,土体越容易在短时间内达到稳定渗流状态,其稳定入渗率也相对越小。在相同雨强和降雨历时条件下,干密度为  $1.4 \text{ g/cm}^3$  的坡体与干密度为  $1.0 \text{ g/cm}^3$  的坡体相比,入渗量小,产生的坡面径流量大,达到稳定入渗的时间也越短,因此坡面径流平均流速也相对较大,达到稳定流速的时间也相对较短。

在相同雨强和相同坡度条件下,对图 3 中坡面径流流速与单宽流量的关系进行相关性分析,得出坡面径流平均流速与单宽流量呈(6)式所示的幂函数关系:

$$V = 61.23q^{0.522} \quad R^2 = 0.996 \quad (6)$$

式中:  $V$  为径流平均流速 ( $\text{cm/s}$ );  $q$  为坡面平均单宽流量 ( $\text{L}/(\text{m} \cdot \text{s})$ )。

坡面径流流速的计算公式较多,一般都是通过建立流速与流量、坡度的关系获得。早在 1988 年,江忠善等<sup>[6]</sup>在收集、整理、分析国内外坡面径流流速资料的基础上,将其关系概括为统一的(7)式形式:

$$V = Kq^n S^m \quad (7)$$

式中:  $V$  为径流平均流速 ( $\text{cm/s}$ );  $q$  为坡面平均单宽流量 ( $\text{L}/(\text{m} \cdot \text{s})$ );  $S$  为坡度;  $K$ 、 $n$ 、 $m$  为参数。

(7)式中的  $K$ 、 $n$ 、 $m$  参数随试验条件不同而有所不同。(6)式是在坡度一定的条件下得出的,因此,若将(7)式中的  $S$  视为定值,则(6)式与(7)式相似,只是因为试验土壤特性、坡度、雨强等试验条件不同,两式中的相关参数有所不同。综上所述,在忽略下垫面条件的情况下,流量、坡度的幂函数形式可以较好地模拟坡面径流的平均流速。

### 2.1.2 水深

水深也是反映坡面径流的重要水力学参数。图 4 是针对不同初始干密度的模型土槽,在降雨条件下,其坡面径流平均水深随产流历时的变化过程,图 5 是径流平均水深和单宽流量的关系曲线。

图 4 表明:与径流平均流速相类似,随着产流历时的持续,模型土槽坡面的径流平均水深先随产流历时的增加而增大,然后逐渐趋于稳定,且坡面径流

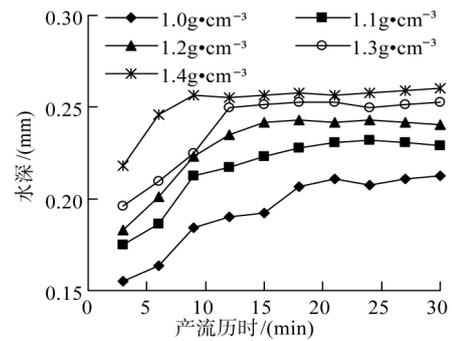


图 4 坡面径流平均水深随产流历时变化

Fig. 4 Relationship between average depth of slope runoff and duration

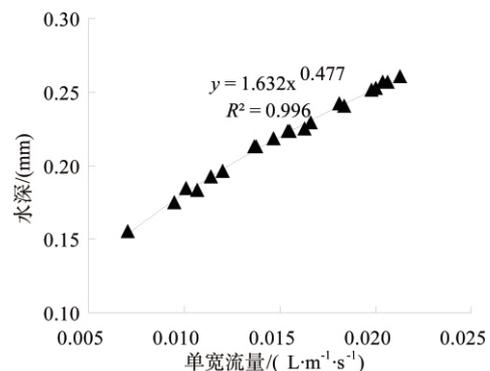


图 5 坡面径流平均水深与单宽流量关系

Fig. 5 Relationship between average depth of overland flow and flow per unit width

水深随初始干密度的增加而增大。其原因在于:初始干密度不同,土体的孔隙率和入渗率也不同,从而导致坡面径流量大小也发生了相应改变。当初始干密度增大时,模型土槽坡面土体密实度越大,入渗量越小,因而在一定坡度、坡长、雨强条件下,产生的径流量越大,坡面径流水深也越大。

图 5 表明:随着坡面单宽流量的增大,坡面径流平均水深也相应增加,两者关系可拟合合成下式:

$$h = 1.632q^{0.477} \quad R^2 = 0.996 \quad (8)$$

式中:  $h$  为坡面径流平均水深 ( $\text{mm}$ );  $q$  为坡面平均单宽流量 ( $\text{L}/(\text{m} \cdot \text{s})$ )。

### 2.1.3 流态

坡面径流流态是坡面径流研究的难点之一,本文用雷诺数  $Re$  和弗汝德数  $Fr$  来表征降雨条件下坡面径流的流态,因为雷诺数  $Re$  和弗汝德数  $Fr$  分别反映了坡面径流的紊动程度和缓急程度。表 2 是降雨条件下模型土槽坡面径流稳定时的雷诺数  $Re$ 、弗汝德数  $Fr$ <sup>[20]</sup>。

表 2 坡面径流稳定时的雷诺数 Re、弗汝德数 Fr

Tab.2 Reynolds number and Froude number for the stability state of slope runoff

降雨强度 $I/\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	坡度 $\theta/^\circ$	坡长 $\lambda/\text{m}$	干密度 $\rho_d/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	平均流速 $V/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	平均水深 $h/\text{mm}$	粘滞系数 $\nu/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	雷诺数 Re	弗汝德数 Fr
1.4	20	1	1.0	6.41	0.21	0.0096	14.02	1.41
			1.1	7.25	0.23	0.0096	17.30	1.53
			1.2	7.69	0.24	0.0096	19.47	1.58
			1.3	7.92	0.25	0.0096	20.83	1.59
			1.4	8.17	0.26	0.0096	22.15	1.62

由表 2 可知: 在试验条件下, 不同干密度坡面径流的雷诺数均小于 500, 弗汝德数均大于 1。依据明渠均匀流理论判断, 模拟降雨条件下的模型土槽坡面径流属层流急流流态。由于明渠均匀流理论是针对清水或含沙量小的水流, 因此, 在进行降雨条件下模型土槽坡面径流流态分析时, 雨滴的扰动和含沙量的影响不容忽视, 因为雨滴的扰动和含沙量可能会对坡面径流产生影响。试验观察表明: 雨滴击打导致模型土槽坡面径流溅开, 裸露出坡面表土, 使得高锰酸钾试剂也沿模型土槽坡面发生横向扩散。试验中没有观测到坡面径流的漩涡, 这是因为坡面径流深度较小, 且雨滴击打坡面虽然引起了局部水流紊动, 但其影响范围有限, 因而并未影响径流在顺坡向的流动, 也没有出现涡体。从试验数据分析来看, 由于雨滴的扰动作用影响了径流含沙量, 因此在坡面径流稳定时, 其坡面侵蚀模数仍有一定程度的变化。这说明降雨条件下模型土槽坡面径流并不完全是层流, 而是各层水流质点存在相互掺混, 因此, 正如文献 [21] 所得出的结论一样: 含沙量会影响坡面径流雷诺数 Re 和弗汝德数 Fr 的大小, 从而影响到坡面径流的流态。

总之, 降雨作用下坡面径流流态既不是真正的层流, 也不完全是紊流, 已不能简单地根据雷诺数 Re、弗汝德数 Fr 进行判别, 这是因为雨滴的扰动和含沙量的影响使得坡面径流流态变得更为复杂, 这也再次说明, 降雨作用下坡面径流是一种“伪层流”或“搅动流”<sup>[11-15]</sup>。

### 2.2 降雨作用下红土型坡面径流剪切力与坡面侵蚀模数的关系

坡面径流必将产生径流剪切力, 从而导致坡面土体的剥离、分散和输移。关于坡面径流剪切力对坡面侵蚀机理影响的研究成果较多, 也出现了相关的土壤侵蚀预报物理模型。根据试验数据分析, 得出径流剪切力与侵蚀模数的关系如图 6 所示。

图 6 表明: 在一定干密度条件下, 坡面侵蚀模数随径流剪切力的增大而增大, 二者之间近似呈线性

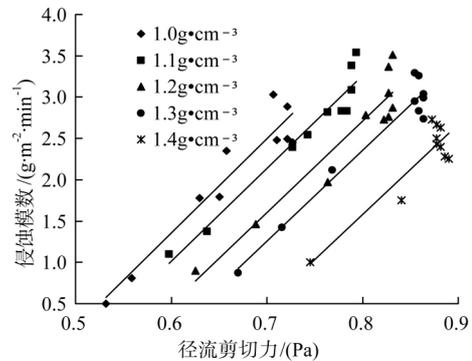


图 6 坡面径流剪切力与侵蚀模数的关系

Fig. 6 Relationship between shear stress and erosion modulus of slope runoff

关系。其原因在于, 降雨条件下模型土槽坡面土壤存在以下两种状态: 1) 雨滴击打坡面产生溅蚀, 分散的土颗粒沉积在坡面; 2) 被雨滴压实或破坏但仍与坡体连在一起的颗粒。这两部分土壤均以点与点的接触或以点面接触的方式存在, 因而土颗粒之间主要是点面接触产生的摩擦力, 而黏聚力极小。径流剪切力会削弱坡面表层土颗粒之间的黏聚力, 使得土颗粒变得松散, 当径流剪切力大于土颗粒间的黏聚力和摩擦力时, 坡面土体就会产生剥蚀而被径流带走。因此, 随着径流剪切力的增大, 土壤的抗侵蚀能力就越弱, 土壤也更容易发生剥离和输移, 单位时间内的侵蚀模数就越大。

图 6 表明, 当初始干密度分别为 1.0, 1.2, 1.4  $\text{g}/\text{m}^3$  时, 降雨 30 min 内, 坡面径流剪切力变化范围分别为 0.53 ~ 0.73, 0.62 ~ 0.82, 0.75 ~ 0.89 Pa, 坡面侵蚀模数的变化范围分别为 0.5 ~ 3.02, 0.90 ~ 3.51, 1.0 ~ 2.73  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ 。由此可见, 在一定初始干密度、一定降雨强度和坡度条件下, 侵蚀模数随径流剪切力的增大而增大; 当径流剪切力一定时, 干密度越大, 土壤的侵蚀模数越小。

针对在 5 种不同初始干密度, 通过相关性分析, 降雨条件下模型土槽坡面侵蚀模数与径流剪切力呈线性关系, 其结果如表 3 所示。

表3 坡面径流剪切力与侵蚀模数的关系

Tab. 3 Relationship between slope runoff shear stress and erosion modulus

降雨强度 $I/\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	坡度 $\theta/^\circ$	干密度 $\rho_d/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	回归方程	$R^2$	试验点数 $n$
1.4	20	1.0	$M = 11.41\tau - 5.495$	0.908	10
		1.1	$M = 11.27\tau - 5.753$	0.945	10
		1.2	$M = 11.08\tau - 6.158$	0.904	10
		1.3	$M = 11.00\tau - 6.444$	0.945	10
		1.4	$M = 10.94\tau - 7.178$	0.816	10

### 2.3 降雨作用下红土型坡面径流剪切力与坡面临界剪切力

文献[16]和文献[17]指出:当坡面径流产生的剪切力大于土壤抗侵蚀的临界剪切力时,坡面土颗粒就会发生剥离和输移,即开始发生坡面土壤侵蚀。而在实际降雨条件下,由于坡面土体入渗率随降雨历时不断变化,从而引起坡面径流量的变化,同时也改变了坡面径流的剪切力。由于径流剪切力克服了坡面土颗粒的黏聚力和摩擦力,削弱了土体的抗侵蚀能力,因此,坡面侵蚀模数也随径流剪切力的增大而增加。在坡面土壤侵蚀过程中,一方面,由于土壤成分、土颗粒粒径、颗粒组成、干密度等土壤性质有所不同,另一方面,雨滴的击溅,使得模型土槽坡面各点的径流流速、径流水深、径流流量都有所不同,这两方面因素的共同影响,导致很难建立侵蚀模数和径流剪切力的相关理论计算公式,也不便研究坡面侵蚀模数和径流剪切力之间的内在联系。因此,为研究这些问题,将降雨条件下模型土槽坡面视作土体特性和水力特性都均匀的坡面,且认为坡面各点的土体特性和水力特性参数都是相同的。

假定模型土槽坡面上面积为  $ds(\text{m}^2)$ 、厚度为 1 的土体,在坡面径流剪切力  $\tau(\text{Pa})$  的作用下,在一定降雨时段  $dt(\text{min})$  内侵蚀量为  $dm(\text{g})$ ,根据动量定律有:

$$(\tau - \tau_c) ds dt = V_0 dm \quad (9)$$

式中:  $\tau_c$  为坡面土颗粒被剥离时的临界剪切力 ( $\text{Pa}$ );  $V_0$  为土颗粒起动时的初速度。

对(9)式积分可得到  $t$  时段内坡面的侵蚀量  $M'$  ( $\text{g}$ ):

$$M' = \iint_0^t \frac{1}{V_0} (\tau - \tau_c) dt \cdot ds = \frac{1}{V_0} (\tau - \tau_c) ts \quad (10)$$

式中:  $t$  为侵蚀产沙时间 ( $\text{min}$ );  $s$  为侵蚀产沙坡面面积 ( $\text{m}^2$ ); 式中其他符号与(9)式相同。

令  $P = \frac{1}{V_0} M' = \frac{M'}{ts}$ ,  $M$  即为坡面侵蚀模数 ( $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ ), 则上式可改写成:

$$M = P(\tau - \tau_c) \quad (11)$$

式中:  $P$  是与降雨特性、土体特性、径流特性有关的参数 ( $\text{g}/(\text{N} \cdot \text{min})$ );  $\tau_c$  为坡面土颗粒被剥离时的临界剪切力 ( $\text{Pa}$ );  $\tau$  为坡面径流剪切力 ( $\text{Pa}$ )。

公式(11)的物理意义在于,降雨条件下红土型坡面存在临界剪切力,侵蚀模数与径流剪切力和临界剪切力之差关系密切。一方面,径流剪切力  $\tau = \gamma RJ$ ,而水力半径  $R$ 、坡面径流水深  $h$  和坡面径流单宽流量  $q$  又相互影响和制约;另一方面,降雨强度  $I$  和土壤入渗率  $i$  与单宽流量  $q$  又满足水量平衡方程,且土壤入渗率  $i$  与土壤性质密切相关。因此,公式(11)中的参数  $\tau$  和  $\tau_c$  隐含了水土作用机理。

土壤临界剪切力  $\tau_c$  值是衡量土壤抗侵蚀能力的指标,且  $\tau_c$  值不是固定不变的,而是与降雨作用下土颗粒的排列方式、接触方式、暴露度、试验模型尺寸、坡度、降雨特性等有关。土体越松散、土颗粒暴露度越大,则土壤颗粒间的黏聚力和摩擦力就越小,临界剪切力  $\tau_c$  也越小,土颗粒越容易起动。文献[22]表明,一方面,针对相同的土壤,在不同的试验条件下,土壤临界剪切力  $\tau_c$  值可小到  $0.02 \text{ Pa}$ ,大到  $12.8 \text{ Pa}$ ;另一方面,针对不同的土壤,如红土、黄土和紫土,由于其特性不同,即使在相同试验条件下,红土的临界剪切力  $\tau_c$  可达黄土、紫土的 2~3 倍<sup>[23]</sup>。

把表3中的回归方程统一改写成(11)式的形式,可得红土初始干密度为 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4  $\text{g}/\text{cm}^3$  的红土型坡面临界剪切力  $\tau_c$  分别是  $0.482$ ,  $0.510$ ,  $0.556$ ,  $0.586$ ,  $0.656 \text{ Pa}$ ,由此可推断,降雨条件下红土型坡面的临界剪切力随坡面红土初始干密度的增大而增大。

### 3 结论

通过人工模拟降雨试验,在坡度  $20^\circ$ 、坡长 1.0 m、雨强 1.4 mm/min 条件下,针对 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 g/cm<sup>3</sup> 5 种干密度红土的模型土槽坡面,分析、研究了云南红土型坡面径流的水动力学特性及红土干密度、坡面侵蚀模数与坡面径流剪切力之间的关系,得出如下结论:

(1) 坡面径流平均流速和平均水深均随径流历时呈先逐渐增大而后趋于稳定的变化趋势,且干密度越大,坡面径流平均流速和平均水深也越大,平均流速和平均水深与单宽流量之间呈幂函数关系,  $R^2$  式达 0.996。

(2) 在试验条件下,坡面径流的雷诺数均小于 500,弗汝德数均大于 1,坡面径流流态属层流急流流态。

(3) 在初始干密度一定的条件下,坡面侵蚀模数与径流剪切力接近线性相关。当径流剪切力增加时,坡面侵蚀模数随之增大。在干密度为 1.0 g/cm<sup>3</sup> 到 1.4 g/cm<sup>3</sup> 范围内,坡面侵蚀模数与径流剪切力之间的  $R^2$  最大为 0.945,最小为 0.816。

(4) 在试验条件下,模型土槽坡面土体存在临界剪切力,且红土初始干密度增大时,临界剪切力随之增加。当坡面红土的初始干密度从 1.0 g/cm<sup>3</sup> 增加到 1.4 g/cm<sup>3</sup> 时,土槽坡面土体的临界剪切力  $\tau_c$  从 0.482 Pa 增加到 0.656 Pa。

以上结论是针对一定的云南红土、在一定的雨强和坡度试验条件下得出的,而且在推导、计算过程中做了多方面的简化,因此针对其他土壤和试验条件是否有类似的结论,还有待于进一步研究。

### 参考文献 (References)

[1] 罗榕婷,张光辉,曹颖. 坡面含沙水流水动力学特性研究进展[J]. 地理科学进展, 2009, 28(4): 567-574 [LUO rongting, ZHANG guanghui, CAO ying. Progress in the research of hydrodynamic characteristics of sediment-laden overland flow[J]. Progress in Geography, 2009, 28(4): 567-574]

[2] 刘青泉,李家春,陈力,等. 坡面流及土壤侵蚀动力学(1) - 坡面流[J]. 力学进展, 2004, 34(3): 360-373. [LIU qingquan, LI jiaochun, CHEN li, et al. Dynamics of overland flow and soil erosion (1) - overland flow[J]. Advances in Mechanics, 2004, 34(3): 360-373]

[3] FOSTER G R, HUGGINS L F, MEYER L D. A laboratory study of rill hydraulics I: Velocity relationship[J]. Transfer of Asae, 1984,

27(3): 790-796

[4] GOVERS G. Relationships between discharge, velocity, and flow area for rills on loose non-layered materials[J]. Earth Surface Processes Landforms, 1992, 17: 515-528

[5] ELLIOT W J, LAFLEN J M. A process-based rill erosion model. Transactions of Asae, 1993, 36(1): 65-72

[6] 江忠善,宋文经. 坡面流速的试验研究. 中国科学院西北水土保持所集刊[G], 1988, (7): 46-52 [JIANG shanzhong, SONG wenjing. Experimental study on slope velocity. The Soil and Water Conservation of Chinese Academy of Sciences[G], 1988, (7): 46-52]

[7] YANG Z T. Incipient motion and sediment transport. Trans of Asae, 1973, 99(10): 9198-9341

[8] MOOR I P, BURCH G I. Sediment transport capacity of sheet and rill flow: Application of unit stream power theory. Water Resources Research, 1986, 22(8): 1350-1360.

[9] 李鹏,李占斌,郝良勇,等. 坡面径流侵蚀产沙动力机制比较研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 66-69 [LI peng, LI zhanbin, ZHENG liangyong, et al. Comparisons of dynamic mechanics of soil erosion and sediment yield by runoff on loess slope[J]. Journal of Soil And Water Conservation, 2005, 19(3): 66-69]

[10] WOOLHISER D A, HANSON C L, KUHLMAN A R. Overland flow on rangeland watersheds[J]. Journal of Hydrology(N. Z.), 1970, 9(2): 336-356

[11] HSIEH W, SHEN and RUH-MING LI. Rainfall effect on sheet flow over smooth surface. J. Hyd. Div. Proc. Asce. 99(HY55), 1973

[12] 丁文峰,李占斌,丁登山. 坡面细沟侵蚀过程的水动力学特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 72-75 [DING wenfeng, LI zhanbin, DING dengshan. Study on hydrodynamic characters of runoff in rill erosion process on slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(3): 72-75]

[13] 姚文艺,唐立群. 水力产沙过程及模拟[M]. 黄河水利出版社, 2001 [YAO wenyi, TANG liqun. Process and Simulation of hydraulic sediment production[M]. The Yellow River Water Conservancy Press, 2001]

[14] 雷阿林,唐克利,王文龙. 土壤侵蚀链概念的科学意义及其特征[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 79-83. [LEI alin, TANG keli, WANG wenlong. Significance and character of conception of soil erosion chain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(3): 79-83]

[15] 张科利. 黄土坡面发育的细沟水动力学特征研究[J]. 泥沙研究, 1999, (1): 56-61 [ZHANG keli. Hydrodynamic characteristics of rill flow on loess slopes[J]. Journal of Sediment Research, 1999, (1): 56-61]

[16] FOSTER G R, MEYER L D, ONSTAD C A. An erosion equation derived from basic erosion principles[J]. Trans. Of Asae, 1977, 20(4): 678-682

[17] NEARING M A, FOSTER G R, LANE L J. A process based soil erosion model for USDA water erosion prediction project technology[J]. Trans. of Asae, 1989, 32(5): 1578-1593

[18] 张科利,唐克利. 黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究

- [J]. 土壤学报 2000, 37(1): 9-15 [ZHANG keli, TANG keli. A study on hydraulic characteristics of flow for prediction of rill detachent capacity on loess slope. [J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(1): 9-15]
- [19] HORTON R E, LEACH H R, VAN VLIET R. Laminar sheet flow. Transactions of the American Geophysical Union, 1934, 15(2): 393-404
- [20] 洪斌. 降雨作用下红土型库岸坡面的侵蚀机理 [D]. 昆明理工大学 2016 [HONG bin. Study on erosion mechanism of laterite bank slope under rainfall [D]. Kunming University of Science and Technology 2016]
- [21] 赵春红, 高建恩, 王飞, 等. 含沙量对坡面流水动力学特性的影响研究 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 80-85 [ZHAO chunhong, GAO jianen, WANG fei, et al. Effects of sediment load on hydrodynamic characteristics of overland flow [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural machinery, 2013, 44(9): 80-85]
- [22] 张乐涛, 高照良, 田红卫. 工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 94-102 [ZHANG letao, GAO zhaoliang, TIAN hongwei. Hydrodynamic process of soil erosion in steep slope of engineering accumulation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(24): 94-102]
- [23] 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, (3): 32-36 [JIANG shanzhong, SONG wenjing, LI xiuying. Characteristics of natural rainfall in loess area [J]. Soil and Water Conservation in China, 1983, (3): 32-36]

## Study on Relationship between Runoff Characteristics and Soil Erosion of Laterite Slope under Rainfall

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

(College of Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** In this research, it revealed the relationship between the hydrodynamic characteristics of Yunnan laterite slope runoff, dry density, erosion modulus of slope surface and shear stress of slope runoff during rainfall. This was completed specifically for Yunnan laterite slope with a certain rainfall intensity and slope inclination by our proposed research approach by using artificially-mimic-rainfall-model experiments and soil tests in connection with theoretical analysis. The results showed: (1) the average velocity of runoff on slope increased gradually in the early stage of runoff duration and then tended to be stable later on. The average velocity of slope runoff increased significantly with the increase of dry density of laterite. The relationship between the average velocity and unite discharge of runoff could be expressed as a power function:  $R^2 = 0.996$ . (2) Similarly, the average water depth of runoff increased gradually in the early stage of the runoff duration and then tended to be stable. Furthermore, the average water depth of runoff were expected to greater with a larger dry density. The relationship between the average water depth and the unite discharge of runoff could be also expressed as a power function:  $R^2 = 0.996$ . (3) Runoff stayed in the pattern of rapid laminar flow under experimental conditions. (4) In case of the certain experimental conditions and some of dry densities, the erosion modulus of laterite slope increased with runoff shear stress increment, and a linear relationship could be observed between the erosion modulus and the runoff shear stress. With the value of dry density were given to 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4  $g/cm^3$ , the  $R^2$  ranged from minimum 0.816 to maximum 0.945, and the critical shear stress of laterite slope was 0.482, 0.510, 0.556, 0.586, 0.656 Pa respectively. The behaviors of slope runoff was controlled by various factors. The erosion modulus of slope and the relevant critical shear stress of slope runoff was closely related to the characteristics of runoff and soil.

**Key words:** laterite; slope runoff; dry density; erosion modulus; critical shear stress