模拟降雨条件下红壤坡面侵蚀产沙水动力学特征

林庆明[1,2]，丁文峰[1,2]，张长伟[1,2]，徐金鑫[1,2]，方 程[3]，张平仓[1,2]

(1.长江水利委员会长江科学院，湖北 武汉 430010；
2.水利部山洪地质灾害防治工程技术研究中心，湖北 武汉 430010；3.河海大学，江苏 南京 210093)

摘 要：[目的] 对红壤坡面侵蚀过程中的产流、产沙以及坡面径流水动力学参数进行试验研究，为揭示红壤坡面侵蚀产沙机理提供科学依据。[方法] 以我国南方侵蚀性红壤为研究对象，采用人工模拟降雨法，通过不同坡度(6°，10°和 15°)，不同雨强(120，180 和 240 mm/h)条件下的模拟试验分析红壤坡面产流产沙过程及径流水动力学特征。[结果] 在坡度一致时，坡面累积径流量和累积产沙量均随雨强的增大而增大，径流率表现为初期的波动增长，随降雨进行逐渐达到稳定状态，且径流率随坡度增大而增大；坡面产沙过程受坡度和雨强的双重影响；侵蚀产沙率呈降雨初期急剧上升，随后迅速下降并趋于平稳的趋势。试验坡面的径流水动力学特征表明，阻力系数 f 与雷诺数 R_e 无明显的相关关系，但与弗洛德数 F_r 存在显著的指数关系。[结论] 径流水动力学参数与侵蚀产沙量之间存在明显相关关系，相比较而言，径流雷诺数 R_e 与坡面侵蚀产沙量间的关系最密切。

关键词：模拟降雨；红壤；产流产沙；水动力学参数

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)02-0016-06 **中图分类号**：S157.1

文献参数：林庆明，丁文峰，张长伟，等.模拟降雨条件下红壤坡面侵蚀产沙水动力学特征[J].水土保持通报，2019，39(2)：16-21. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.02.003；Lin Qingming，Ding Wenfeng，Zhang Changwei，et al. Hydrodynamic characteristics of runoff in red slope erosion process under simulated rainfall experiments[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(2)：16-21.

Hydrodynamic Characteristics of Runoff in Red Slope Erosion Process Under Simulated Rainfall Experiments

Lin Qingming[1,2], Ding Wenfeng[1,2], Zhang Changwei[1,2], Xu Jinxin[1,2], Fang Cheng[3], Zhang Pingcang[1,2]

(1. *Changjiang River Scientific Research Institute, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan, Hubei* 431000, *China*; 2. *Research Center on Mountain Torrents and Geologic Disaster Prevention, Ministry of Water Resources, Wuhan, Hubei* 431000, *China*; 3. *Hohai University, Nanjing, Jiangsu* 210093, *China*)

Abstract: [Objective] The experimental studied runoff yield, sediment yield and runoff hydrodynamic parameters during erosion process of red soil slope in order to provide the basis for revealing the mechanism of slope erosion and sediment yield on red soil slope. [Methods] Red soil was used, a total of 18 rainfall simulation experiments were conducted in a 8.0 m long drainable flume, with treatments including three levels of typical slope gradients (6°, 10°,15°) and three rainfall intensities (120, 180, 240 mm/h). The processes of runoff generation, sediment yielding, and runoff hydrodynamic characteristics variation were analyzed. [Results] The accumulative runoff and sediment load significantly increased with the increasing of rainfall intensity under the same slope gradient. The runoff rate variation showed a steady state after an initial increased fluctuation. The sediment yield rate increased with the increases of both rainfall intensity and slope gradient.

收稿日期：2018-08-21 **修回日期**：2018-10-08

资助项目：国家自然科学基金项目“基于土壤团聚体分形维和径流能耗分析的土壤可蚀性定量表征”(41271303)；重大自然灾害监测预警与防范重点专项(2017YFC1502506)

第一作者：林庆明(1993—)，男(汉族)，福建省安溪县人，硕士研究生，研究方向为流域侵蚀产沙与调控。E-mail：qingminglin1993@163.com。

通讯作者：丁文峰(1975—)，男(汉族)，河南省汝州市人，博士，教授级高级工程师，主要从事土壤侵蚀与水土保持、土地资源与环境方面的研究。E-mail：wenfengding@163.com。

The sediment generation process showed a variation that increased rapidly at the beginning and decreased quickly with the experiment time passed. There was a good exponent relationship between Froude numbers and Reynolds numbers, while flow Darcy-Weisbach friction coefficients and Reynolds numbers had no obvious correlation. [Conclusion] There is a significant correlation between runoff hydrodynamic parameters and erosion sediment yield. By comparison, Reynolds number of runoff is the most closely related to slope erosion sediment yield.

Keywords: simulated rainfall; red soil; runoff and sediment yielding; hydrodynamic parameters

土壤侵蚀过程是降雨径流和土壤共同作用下的侵蚀—搬运—输移—再搬运的过程[1]。雨滴溅蚀和径流冲刷是土壤发生坡面侵蚀的主要动力源,坡面流流态、流速等水动力学参数的变化会对侵蚀过程产生重要影响。已有研究[2-4]表明,一旦坡面产流,因雨滴打击而分离的泥沙输移可以用径流的水动力学特征解释,如流速,径流深,雷诺数,弗洛德数,曼宁糙率系数和达西—韦斯巴赫阻力系数等。因此开展土壤侵蚀水动力学特征的研究将有助于揭示土壤侵蚀水动力过程的内在机制。以往研究中,国内外学者[5-7]已经就坡面侵蚀产沙机制进行过一些研究,并且在坡面侵蚀动力过程、坡面产流产沙等方面取得了很多进展。但总体而言,大部分研究主要集中在黄土高原地区[8-11],其土壤呈粉砂质,结构孔隙大,透水性强,土壤抗蚀性较差,坡面侵蚀过程呈片蚀、细沟侵蚀、浅沟侵蚀等特点。对于南方红壤而言,气候条件与植被覆盖等与黄土区差异明显,土壤黏性较强,抗径流剪切能力和抗径流冲刷能力强,其坡面细沟侵蚀并不明显[12],侵蚀特点与黄土有明显差异。以往对红壤的研究主要是在土壤养分流失和侵蚀效应评价等方面[13-14],对侵蚀机理的研究往往注重探讨降雨特征、坡度、植被覆盖、土地利用类型和土壤水分物理性质等对坡面侵蚀产沙过程的影响,而较少涉及坡面侵蚀过程中的水动力学机理。因此,本研究在实验室条件下利用不同坡度、不同雨强组合的人工模拟降雨试验,对我国南方红壤坡面侵蚀过程中的产流、产沙以及坡面径流水动力学参数进行研究,以期为进一步深入研究红壤坡面侵蚀过程和水土流失治理提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

本次试验取土于湖北省武汉市长江科学院沌口基地,试验土样属中国土壤系统分类(2001 年)中的红壤,将土样风干后用吸管法测其土壤结构组成。试验红壤的基本结构性质见表 1。试验前将土样自然风干后过筛(10 mm),以避免存在杂草与石块对试验的干扰。填土前先在土槽底层铺 15 cm 厚的细沙,以保证试验土层的透水性与天然坡面相接近。试验土样分层装填于钢制土槽内,每层填土 5 cm,边填土边压实,填土总厚度为 30 cm。填土容重保持为 1.25 g/cm^3 左右,以便与取土区土壤的容重相一致。

表 1　试验土壤的基本性质

土壤机械组成/%					土壤质地	pH 值	有机质
<0.002 mm	0.002～0.02 mm	0.02～0.05 mm	0.05～0.25 mm	>0.25 mm			
9.792 8	37.859 5	28.949 3	23.397 9	0.000 5	壤质砂土	4.51	2.46 g/kg

1.2　试验设计

试验采用长江科学院水土流失模拟实验室降雨大厅的下喷式模拟降雨系统,降雨高度为 9 m,降雨覆盖面积为 20 m×20 m。试验使用固定式可调坡钢制土槽,土槽尾端设有不锈钢集水口,并接有一段不锈钢管引流。土槽规格为 8 m×1 m×1 m。以往多数学者对红壤坡面侵蚀研究选取的降雨强度主要集中于 50,90,120 mm/h[15-16],对雨强大于 120 mm/h 的极端降雨研究相对较少,而在全球气候变化背景下,极端降雨事件频发。因此,探究在大雨强下的坡面侵蚀机理并与以往研究结果对比分析,对了解红壤区土壤侵蚀特点有重要意义。根据已有的降雨资料结合暴雨强度公式[17-18],本试验设计 3 个大雨强(120,180,240 mm/h)。选取坡度为 6°,10°,15°,降雨时间 40 min。在试验开始时,对雨强进行反复率定,以确保降雨均匀系数大于 75%。当土槽下方集水口出现携沙水流时记录产流时间,当细沟出现时记录其产流后时间。产流后的坡面径流用 60 L 的桶不间断接流,并记录每个桶的接流时间,即可得各时间段的总径流量。另取 1 000 ml 集水瓶,试验前称量空瓶和装清水后的重量。试验结束后,先称量每个桶的重量,之后将桶中的水搅拌均匀,用集水瓶装满并称量,

然后用于计算桶中的含沙量。当水流稳定后，在土槽上、中、下三个位置用染色剂($KMnO_4$)法测量坡面径流速。测定区长度为 0.5 m，每处测量多次取得流速值。本次试验取土于 2017 年 7 月，试验时间为 7—8 月份。

1.3 数据处理

径流率(q_r)计算公式为：

$$q_r=\frac{Q}{ST} \tag{1}$$

式中：q_r——径流率〔L/(m² · min)〕；Q——t 时段内的总径流量(L)；S——产流面积，即试验土槽的表面积(m²)；T——产流时间(min)。

计算公式为

$$S_r=\frac{M_s}{ST} \tag{2}$$

式中：S_r——侵蚀产沙率〔g/(m² · min)〕；M_s——产沙量(g)。

弗洛德数 F_r 可用 $F_r<1$ 和 $F_r>1$ 分别表示缓流和急流。雷诺数 R_e 临界值为 500，用来确定试验条件下水流是层流还是紊流。弗洛德数 F_r 和雷诺数 R_e 数据根据下式计算。

$$F_r=\frac{U}{\sqrt{gh}} \tag{3}$$

$$R_e=\frac{Uh}{v} \tag{4}$$

$$h=\frac{q}{U}=\frac{Q}{Bt} \tag{5}$$

$$U=\alpha V_s \tag{6}$$

式中：F_r——弗洛德数；R_e——雷诺数；U——径流平均流速(m/s)；v——运动黏滞系数(m²/s)；g——重力加速度(m/s²)；h——径流深(cm)；V_s——径流表层流速(m/s)；α——修正系数，取 0.75。

达西—韦斯巴赫阻力系数 f 反映了由降雨，土壤颗粒等作用下的阻力值。用于量化表面粗糙程度的曼宁糙率系数 n 取决于地形和植被因子。f，n 可以用来描述流动的阻力，计算公式为：

$$f=\frac{8ghJ}{U^2} \tag{7}$$

$$n=\frac{h^{2/3}J^{1/2}}{U} \tag{8}$$

式中：f——达西—韦斯巴赫阻力系数；n——曼宁糙率系数；J——水力坡度。

2 结果与分析

2.1 不同坡度和雨强组合对坡面产流、产沙过程的影响

坡面径流主要受雨强和坡度的共同影响，经过降雨试验后计算得到每次降雨的累积产流量、累积产沙量，以及产流率和产沙率。试验结果如表 2—3 和图 1—2 所示。相同坡度下，雨强的增大导致坡面承雨量的增加，累积径流量随雨强的增大而增加，累积径流量和雨强之间呈现出良好的线性关系。而在雨强一致下，累积径流量随坡度的增大而增加。

表 2 坡面累积产流量与雨强的回归分析

坡度/(°)	不同雨强累积产流量/L			拟合函数	R^2	p
	120 mm/h	180 mm/h	240 mm/h			
6	201.26	218.56	237.38	$V=1.648\ 9+0.030\times10^{-2}I$	0.99	0.01
10	203.67	220.68	238.85	$V=1.683\ 0+0.293\times10^{-2}I$	0.99	0.01
15	208.65	223.84	240.23	$V=1.767\ 7+0.263\times10^{-2}I$	0.99	0.01

坡面产沙过程主要受径流量的影响，但随着降雨的进行，坡面产沙量与坡面径流量的变化过程呈现不同的趋势，试验结果详见表 3。坡度相同时，累积产沙量随雨强的增大而增加，这与累积径流量的规律一致，雨强与累积产沙量也具有显著的相关关系。坡面侵蚀产沙过程受雨强和坡面的共同影响，不同雨强条件下的坡面侵蚀的临界坡度不同，造成侵蚀产沙量的差异。以往的研究中，Assouline[19] 等认为在雨强大于 180 mm/h 时，坡度大于 25°的产沙量随着降雨强度的增加而下降，表明坡面的泥沙输移能力低于泥沙分离能力。耿晓东[20] 等研究表明红壤坡面侵蚀产沙量在雨强 75，100 mm/h 时随坡度增大呈增加趋势，而在小雨强 50 mm/h 时，则存在一个临界坡度 20°。说明雨强的大小会影响坡面的侵蚀产沙量。本试验的降雨强度下，最大产沙量发生在 15°坡面，最小产沙量在 6°坡面上产生。这可能是因为试验土壤存在理化性质差异或者试验条件下坡度未达到临界坡度所致。

表 3　坡面累积产沙量与雨强的回归方程

坡度/(°)	不同雨强产沙量/g			拟合函数	R^2	P
	120 mm/h	180 mm/h	240 mm/h			
6	660.62	2 208.15	3 253.60	$S=-1.849\ 1+2.160\ 5\times10^{-2}I$	0.98	0.07
10	1 090.95	2 797.00	4 443.51	$S=-2.251\ 3+2.793\ 8\times10^{-2}I$	0.99	0.01
15	2 524.00	4 950.82	7 765.51	$S=-2.782\ 2+4.367\ 9\times10^{-2}I$	0.99	0.05

从图 1 可以看出,坡面在 3 种坡度下均表现为随着降雨时间的持续,径流率先波动增加,而后在 5～15 min 达到稳定状态的趋势。然而,每次试验达到稳定状态的时间点并不一致,较大的雨强或较小的坡度会增加径流率达到稳定的时间。相同雨强下,不同坡度的径流率差异不明显。相同坡度下,径流率则随着雨强的增大而增大。本试验的结果与勒长兴[21]的研究结果认为 15°为临界坡度类似,当坡度小于临界坡度,径流率随着坡度的增大而增大。

对于坡面侵蚀率而言,不同坡度相同雨强或不同雨强相同坡度情况下表现出较明显差异,结果如图 2 所示。随着雨强的增大,侵蚀率达到的峰值就越大。在各坡度间,坡度 15°时侵蚀率总是明显高于其他坡度,这与梁志权[22]认为在大雨强下,累积产沙量和侵蚀产沙率的极值均在 15°时发生的研究结果一致。具体来说,雨强 120 mm/h 时,6°和 10°坡面的侵蚀率在降雨中后期迅速趋于稳定;坡度 15°的侵蚀产沙率波动较大,且其明显高于 6°和 10°,说明该坡度 15°时的径流侵蚀能力最强。在雨强 240 mm/h 时,侵蚀产沙率与坡度的关系比较复杂,坡度 15°坡面侵蚀产沙率在降雨后期呈上升趋势,这是因为坡面开始有细沟发育。张会茹等[16]研究发现在雨强 50 mm/h 和 75 mm/h 下坡度为 5°～25°时,侵蚀率在到达最大值之前都呈上升趋势,随后呈指数函数下降。本次试验中,在大雨强条件下观测到了同样的趋势。

在初期红壤坡面侵蚀产沙率呈急剧上升阶段,到达极值后开始下降,随后保持相对的平稳状态,特别是在大雨强下更为明显。这主要是因为降雨初期红壤坡面存在松散泥沙颗粒物,易被径流所携带,因此初期的产沙率快速上升;随着降雨的继续,松散颗粒物基本被带走,再加上坡面受雨滴打击的影响,结皮开始产生,径流剥蚀下降,造成侵蚀率的持续下降。

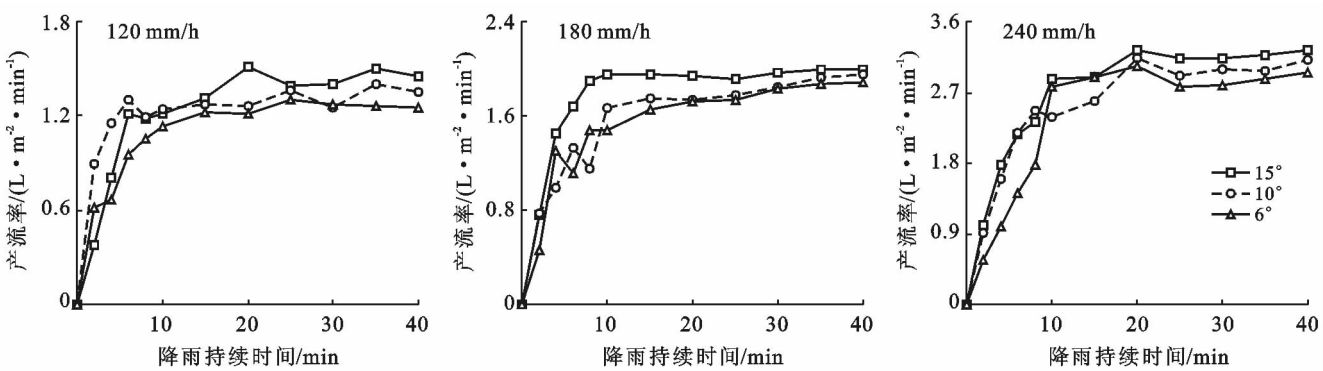


图 1　不同雨强和坡度下径流率变化过程

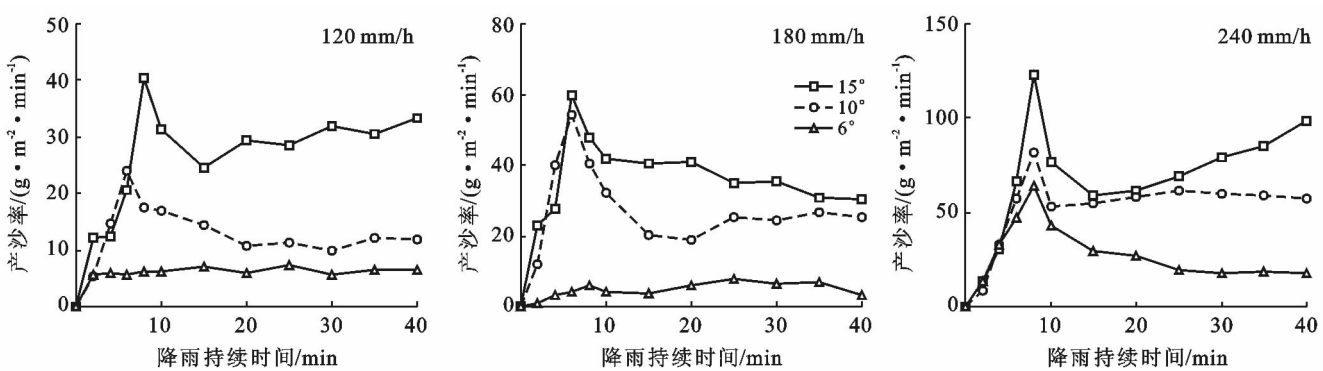


图 2　不同雨强和坡度下产沙率变化过程

2.2 水动力学参数特征

通过试验实测坡面流水力要素值计算的雷诺数，弗洛德数，达西—韦斯巴赫阻力系数和曼宁糙率系数，分析它们在 3 个坡度和 3 个降雨强度条件下的变化(表 4)。表 4 结果显示，径流雷诺数在不同雨强和坡度组合下差异明显，介于 83.44～132.79 之间。雷诺数在雨强一致时均随着坡度的增大而增加。在坡度相同时又都随着雨强的增大而增加。根据明渠水流的划分标准，在本试验雨强和坡度组合下，雷诺数都小于 500，属层流状态。在本试验中，坡面流弗洛德数均小于 1，说明坡面径流属缓流状态。雨强一致下，弗洛德数有随坡度增大而增加的趋势。潘成忠等[23]在试验条件下也得到了类似的结论。这是因为坡度增大，流速相应增大，造成径流深减小，导致弗洛德数增加。而弗洛德数与雨强之间的变化较为复杂，并且随着坡度的增加，其变化趋势也越大。这是由雨强与坡度对径流深和径流速共同作用的结果。

表 4 不同雨强条件下各坡度的水力参数

雨强/(mm·min^{-1})	坡度/(°)	U/(m·s^{-1})	R_e	F_r	f	n(10^{-1})
2	6	0.101	83.441	1.120	0.667	0.238
	10	0.131	84.440	1.644	0.514	0.238
	15	0.159	86.505	2.172	0.439	0.214
3	6	0.113	90.614	1.272	0.517	0.248
	10	0.142	91.493	1.783	0.437	0.220
	15	0.181	92.803	2.547	0.319	0.181
4	6	0.124	112.476	1.312	0.486	0.245
	10	0.155	123.782	1.748	0.455	0.232
	15	0.207	132.797	2.604	0.305	0.183

注：U 为径流平均流速(m/s)；R_e 为雷诺数；F_r 为弗洛德数；f 为达西—韦斯巴赫阻力系数；n 为曼宁糙率系数。下同。

达西—韦斯巴赫阻力系数和曼宁糙率系数是用于反映河渠水流阻力特征的水力参数。坡度相同时糙率系数 n 随雨强的增大呈现出减小趋势。而随着坡度的增加，糙率系数变为主要受重力分力的影响，使得沿坡面的径流分力增加，坡面流速增大，加剧坡面的侵蚀，坡面产沙量增加，再加上跌坎出现，造成坡面表面形态更加复杂。这些都将使糙率增加。阻力系数 f 在 120 mm/h 是随坡度增大而减小，在另外两个坡度时表现的较为复杂。以往的研究中，Gilly[24]对坡度为 2.0°～5.6°的坡度范围内进行了研究，结果表明达西—韦斯巴赫阻力系数的变化范围较大；Foster[25]通过模拟天然形成的细沟形态所做出的定床试验表明，坡度为 1.70°～5.16°的范围内，阻力系数不超过 0.5，阻力系数 f 与水流雷诺数 R_e 存在 $f=a(R_e)^{-b}$ 关系。本试验数据表明，红壤坡面的阻力系数 f 范围为 2.005～4.869，阻力系数与雷诺数之间无明显的相关关系，但在同一坡度下阻力系数 f 随弗洛德数 F_r 呈明显的指数函数关系。其回归方程式可表达为 $y=0.948\ 6e^{-0.416\ 3x}$，$R^2=0.869$，($p<0.01$)。

2.3 坡面流水动力学参数与坡面侵蚀量间的关系

坡面侵蚀过程中，有降雨量转化成的径流具有能量，对坡面的侵蚀—搬运—输移—再搬运过程产生影响，而在这个过程中基于此的水动力学参数发挥重要作用。因此坡面侵蚀过程可以用坡面流的水动力学参数解释，讨论水动力学参数与坡面侵蚀量之间的关系将有助于理解坡面侵蚀过程。根据降雨试验中每 5 min 为一时段计算各个时段内的累积坡面侵蚀产沙量和水动力学参数，得出各坡面侵蚀总量与各参数之间的关系。当雨强分别处于 120，180 和 240 mm/h 条件下，产沙量与各参数间的拟合函数关系详见表 5。分析表 5 可知，在 120 mm/h 雨强下，累积坡面侵蚀产沙量随雷诺数，弗洛德数增大而增大，呈正相关关系。在其他雨强下也有同样的趋势。这一规律与张锐波等[26]的研究认为在雨强小于 120 mm/h 下，累积产沙量随雷诺数的增大呈现出幂函数上升的趋势的结果相似。累积产沙量与阻力系数和糙率系数呈负相关关系，阻力系数越大，径流克服阻力消耗的能量就越大，用于侵蚀和搬运泥沙的能量就减少，坡面产沙量就越少。就拟合效果 R^2 而言，累积产沙量：$R_e>f>F_r>n$(表 4)。其中雷诺数与累积产沙量间存在幂函数关系，且其决定系数均大于 0.905($p<0.01$)，这一点与郭太龙[27]的研究结果接近。雷诺数是坡面径流流速与水力半径的函数，雷诺数的增大表示着径流侵蚀能力和泥沙输移能力的增大，将会导致坡面侵蚀量的增加。基于累积产沙量与雷诺数之间呈现出良好的拟合关系，可以认为雷诺数能够较好地判别坡面累积土壤侵蚀量的大小。

表 5 累积坡面侵蚀产沙量(S)与水动力学参数的拟合关系

参数	雨强 120 mm/h		雨强 180 mm/h		雨强 240 mm/h	
	拟合函数	R^2	拟合函数	R^2	拟合函数	R^2
R_e	$S=1.495\times10^{-39}R_e^{21.301*}$	0.930	$S=5.028\ 0\times10^{-20}R_e^{11.1941*}$	0.907	$S=1.169\ 9\times10^{-8}R_e^{5.1434*}$	0.905
F_r	$S=72.912F_r^{1.7533*}$	0.808	$S=236.980F_r^{0.9672*}$	0.800	$S=327.930F_r^{1.1321*}$	0.837
f	$S=22.046f^{-3.023*}$	0.862	$S=85.034f^{-1.7163*}$	0.873	$S=132.28f^{-1.6491*}$	0.876
n	$S=0.000\ 5n^{-8.446*}$	0.746	$S=9.619n^{-2.3773*}$	0.740	$S=19.875n^{-2.1835*}$	0.755

注：*，** 分别表示在 $p<0.01$ 和 $p<0.05$ 水平上的显著性。

3　结 论

(1) 不同坡度和雨强组合下,累积径流量随雨强增大而线性增加,随坡度增大而增大。径流率在降雨初期呈上升趋势,在 5～15 min 达到峰值后保持相对平稳状态,直到降雨事件结束。坡度是影响径流率的主要因子,在相同雨强下,坡度较陡时径流率始终高于坡度较缓的坡面,即随着坡度的增大而增大。但本研究未能进一步证明是否存在临界坡度。

(2) 坡度相同时,累计产沙量随着雨强的增大呈增大趋势。随着雨强的增大,侵蚀率的峰值就越大;坡度 15°时侵蚀率总是明显高于其他坡度。侵蚀产沙率大多呈现初期的急剧上升,随后迅速下降并逐渐趋于平稳,在大雨强中更为明显。

(3) 试验中径流流速均表现为随雨强和坡度的增加而增大的趋势,试验条件下,坡面径流流态属于层流,缓流。阻力系数 f 与雷诺数 R_e 无明显的相关关系,但其与弗洛德数 F_r 存在显著的指数关系。在对累积坡面侵蚀产沙量与水动力学参数进行相关性分析后,雷诺数与产沙量之间具有显著的幂函数关系,表明坡面径流雷诺数 R_e 可以较好地表征坡面侵蚀量。

[参 考 文 献]

[1] Hairsine P B, Rose C W. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles(1): Sheet flow [J]. Water Resources Research, 1992,28(1):245-250.

[2] Pan Chengzhong, Shangguan Zhouping. Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grassplots under simulated rainfall conditions[J]. Journal of Hydrology, 2006,331(1):178-185.

[3] 丁文峰,李亚龙,王一峰,等.人工模拟降雨条件下紫色土坡面流水动力学参数特征[J].水土保持学报,2010,24(2):66-69.

[4] 郭忠录,马美景,蔡崇法,等.模拟降雨径流作用下红壤坡面侵蚀水动力学机制[J].长江流域资源与环境,2017,26(1):152-159.

[5] Shi Zhihua., Fang Nufang, Wu Fengzhi, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes[J]. Journal of Hydrology, 2012,454/455(3):123-130.

[6] Asadi H, Ghadiri H, Rose C W, et al. Interrill soil erosion processes and their interaction on low slopes[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010,32(5):711-724.

[7] 柳玉梅,张光辉,李丽娟,等.坡面流水动力学参数对土壤分离能力的定量影响[J].农业工程学报,2009,25(6):96-99.

[8] 张宽地,王光谦,吕宏兴,等.模拟降雨条件下坡面流水动力学特性研究[J].水科学进展,2012,23(2):229-235.

[9] Zhao Xining, Wu Pute, Chen Xiaoli, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on hillslopes in the Loess Plateau of China [J]. Soil Research, 2013,51(1):50-58.

[10] 张光辉,刘宝元,何小武.黄土区原状土壤分离过程的水动力学机理研究[J].水土保持学报, 2005,19(4):48-52.

[11] 肖培青,郑粉莉,汪晓勇,等.黄土坡面侵蚀方式演变与侵蚀产沙过程试验研究[J].水土保持学报,2008,22(1):24-27.

[12] 耿晓东.主要水蚀区坡面土壤侵蚀过程与机理对比研究[D].陕西 杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2010.

[13] 聂小东,李忠武,王晓燕,等.雨强对红壤坡耕地泥沙流失及有机碳富集的影响规律研究[J].土壤学报,2013,50(5):900-908.

[14] 史志华,闫峰陵,李朝霞,等.红壤表土团聚体破碎方式对坡面产流过程的影响[J].自然科学进展,2007,17(2):217-224.

[15] 王丽园,查轩,黄少燕,等.不同雨强条件下坡度对红壤坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):40-44.

[16] 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.

[17] 张欢.湖南省主要城市降水特性分析及设计雨型研究[D].湖南 长沙:湖南大学,2018.

[18] 史志华,郭国先,曾之俊,等.武汉降雨侵蚀力特征与日降雨侵蚀力模型研究[J].中国水土保持, 2006 (1): 22-24.

[19] Assouline S, Ben-Hur M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing [J]. Catena, 2006,66(3):211-220.

[20] 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.

[21] 靳长兴.坡度在坡面侵蚀中的作用[J].地理研究,1996,15(3):57-63.

[22] 梁志权,张思毅,卓慕宁,等.不同雨强及坡度对华南红壤侵蚀过程的影响[J].水土保持通报,2017,37(2):1-6.

[23] 潘成忠,上官周平.不同坡度草地含沙水流水力学特性及其拦沙机理[J].水科学进展,2007,18(4):490-495.

[24] Gilley J E, Kottwitz E R, Simanton J R. Hydraulic characteristics of rills. [J]. Transactions of the Asae, 1990,33(6):1900-1906.

[25] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A Laboratory Study of Rill Hydraulics(I): Velocity Relationships [J]. Transactions of the ASAE, 1984,27(3):790-796.

[26] 张锐波,张丽萍,付兴涛.坡面侵蚀产沙与水力学特征参数关系模拟[J].水土保持学报,2017,31(5):81-86.

[27] 郭太龙,王全九,王力,等.黄土坡面水力学特征参数与土壤侵蚀量间关系研究[J].中国水土保持科学,2008,6(4):7-11,27.