

缓坡坡面径流在土粒分散阶段的作用

赵晓光^{1,2}, 石辉²

(1. 中科院南京土壤研究所土壤圈物质循环研究室 江苏 南京 210008;

2. 西南师范大学资源环境学院, 重庆 北碚 400715)

摘要 通过水文及水力理论, 采用微积分方法推得超渗产流模式下, 均匀降雨在平整坡面单位面积上产生的径流能量为 $(\rho g/4)Lq\sin 2\theta$; 在 $3^\circ \sim 15^\circ$ 坡面上, 模拟黄土高原暴雨的特征雨强 ($0.8 \text{ mm/min} \sim 4.0 \text{ mm/min}$), 控制相同水量, 分别以径流形式及降雨形式及降雨形式作用于 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 坡面小区, 测量其产生的分散土粒量, 发现坡度对分散量的影响远大于径流的影响, 雨滴击溅产生的松散颗粒占总分散量的百分数随坡度增大呈下降趋势, 径流产生的则恰相反, 随坡度增大呈上升趋势, 从 6° 时的 20% 上升为 15° 时的 70%, 说明其存在一个两者相等的临界坡度 (在实验条件下约为 21°), 坡度大于这个值, 径流的冲刷量将大于雨滴的击溅量。

关键词 水力侵蚀; 雨滴击溅; 坡面径流

中图分类号 S157.1

文献标识码 A

坡面土壤侵蚀过程可依其特征分为两个阶段, 即颗粒分散阶段和分散颗粒被搬运阶段, 前一阶段为后一阶段提供可搬运的松散土粒, 后一阶段径流、雨滴克服土粒与地表间的摩擦力(推移)、重力(悬移), 将被侵蚀物质携带输出坡面, 或沉积在别处, 这样就完成了坡面的侵蚀过程^[1-4]。

对于坡面径流的特征及作用, Emmett, W. W (1990) 从实验角度对坡面流的水力学特征进行了分析^[5,6], Yoon, N. Y (1971) 与 Shen, H. W (1973) 分析了坡面流的阻力规律^[7,8], Rose (1983) 认为单位面积的径流除与降雨强度、地表入渗率有关外, 还取决于坡长、坡度、地表粗糙度以及水流流态^[9-14], R Lal (1983) 则通过简化模型, 给出特点情况下水流能的表达式^[15], 周佩华 (1981)、吴普特 (1994) 认为径流能量就是位能, 其对侵蚀量有更大的影响^[16-20]。上述研究的重点是水流的形态以及由坡面流或与降雨共同作用下的侵蚀总量; 径流的作用有时被夸大了, 特别是对于象黄土高原这样由短时暴雨产生的侵蚀, 当坡面少耕作较坚硬时, 由于松散物少, 径流又往往较小, 其作用就有限, 但侵蚀往往还是较为明显。因此, 对于坡面径流在第一阶段的作用及其影响因子的研究, 有助于全面掌握坡面径流的作用特征, 深化

土壤侵蚀及防治理论。

1 径流冲刷分散

坡面上土粒的起动, 首先取决于径流冲刷作用能够分散的土粒的数量, 即为后径流输移提供可被搬运的松散土粒(无沟蚀产生)。如果把相同的水量以及径流的形式作用于坡面产生的分散土粒量和以降雨的形式击打坡面产生的溅蚀量进行对比, 则可以发现径流在土粒分散阶段作用效果, 并了解重要的影响因子, 还可以从提供松散物的角度, 阐明此阶段径流冲刷与雨滴击溅谁占主导地位的争论问题。

1.1 坡面径流能量

径流促使土粒分散的过程是一个作功耗能的过程, 径流能量的大小对土粒的分散举足轻重, 因此有必要先探讨降雨形成的坡面径流的能量。

在黄土高原为例, 在超渗产流情况下, 假设降雨均匀, 此时平整坡表面上任一点的水层厚度 $h = I - f$, 式中 I 为任意时刻雨强, f 为对应时刻土壤入渗率。设有一宽度为 B , 坡度为 θ , 长度为 L 的均匀坡面, 将其等分, 单位坡长为 ΔX , 第 i 段水深为 $h_i = h \cos \theta$, 则其径流能量为此段微小水体势能, 如图 1 所示。

收稿日期: 2001-12-11; 改回日期: 2002-03-13

基金项目: 国家“九五”科技攻关项目(95-004-05-07)部分研究内容。

作者简介: 赵晓光 (1965-), 男(汉族), 陕西西安人, 教授, 博士后。从事黄土高原土壤侵蚀机理及水土保持措施研究及教学, 出版专著 1 部, 发表相关学术论文 30 余篇, 2001 年获第四届中国水土保持青年科技奖。E-mail: ZXGsoil@sina.com.cn.

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

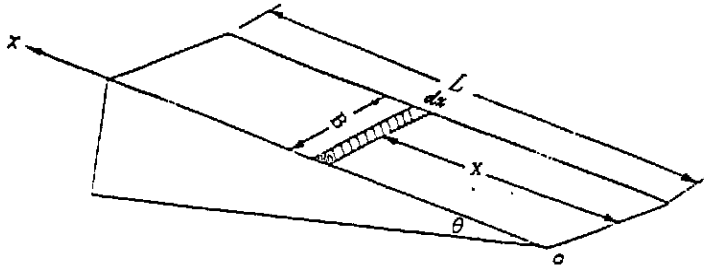


图 1 坡面径流示意图

Fig. 1 Runoff on slope

其值为

$$dE_j = dv \cdot \rho g \cdot x \sin \theta \quad (1)$$

式中 dE_j 为微小水体势能; dv 为微小水体体积, $dv = B \cdot h_i \cdot dx$; ρ 为水体密度 (kg/m^3); g 为当地重力加速度 (m/s^2), x 为微小水体距坡底距离 (m); θ 为坡度。将 (1) 式在整个坡面积分, 即可得出此刻整个坡面上的径流能量 E'_j 。

$$E'_j = \frac{\rho g}{2} BL^2 \cdot h_i \sin \theta \quad (2)$$

整个降雨过程中的径流能量 E''_j 为 E'_j 在时间上的积分, 即

$$E''_j = \int_0^t E'_j dt \quad (3)$$

将 $h_i = h \cos \theta = (I - f) \cos \theta$ 代入上式, 得

$$\begin{aligned} E''_j &= \frac{\rho g}{4} BL^2 \sin 2\theta \int_0^t (I - f) dt \\ &= \frac{\rho g}{4} BL^2 \sin 2\theta \cdot Ph \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $Ph = \int_0^t (I - f) dt$ 为净雨量, 其值等于坡面上在 $0 \sim t$ 时间形成的径流量 q , 上式也可写成单位面积上的平均径流能量 E_j

$$E_j = E''_j / BL = \frac{\rho g}{4} L \cdot \sin 2\theta \cdot Ph = \frac{\rho g}{4} L q \sin 2\theta \quad (5)$$

式中 E_j 为单位面积上的径流能量 (J/m^2); Ph 为净雨深 (mm)。

$$\text{单宽径流能量 } E = \frac{\rho g}{4} L q \sin 2\theta \quad (6)$$

可见, 坡面径流能量除与坡度、水深(径流量)有关外, 还与坡面长度成正比。解决了径流能量的计算问题, 下面就可以进行不同能量(坡度、径流量)下的径流冲刷分散实验。

1.2 实验设计与方法

由于高原南部坡面几乎全为缓坡 ($\leq 15^\circ$), 是主要耕地。因此, 本实验的对象选定为缓坡裸露坡面, 选择地处黄土高原沟壑区的淳化县泥河沟流域自然均匀

缓坡坡面, 用钢板条垂直打入土层隔出宽 1m , 长 5m 的径流小区, 径流小区从顶端主下 4m 全部用塑料膜与土壤隔离, 只留下最底部 1m 露出土壤, 形成 1m^2 供试区, 这样既可形成一定的径流流速及能量, 又可以避免坡长过长引起的输移沉积作用混入。利用放水模拟坡面径流过程, 在小区上端加宽顶堰用来形成薄层径流, 下端用三角堰测流量过程及取样, 经过滤、烘干即得各时段分离量, 试区土壤为黄土^[21]。坡度设计为 3° 、 6° 、 10° 、 15° 四级, 径流则根据黄土高原暴雨特点设计为 0.8 mm/min 、 1.3 mm/min 、 1.8 mm/min 和 2.5 mm/min 、 4 mm/min 五级, 根据入雨降雨实验确定其在同等面积 ($1\text{m} \times 5\text{m}$) 坡面上产生的径流量设计, 放水流量值分别为 0.98 L/min 、 1.56 L/min 、 2.16 L/min 、 3.04 L/min 、 4.80 L/min , 相当于上述所设计暴雨产生的水量, 为防止细沟出现影响试验, 放水时间控制在 15 min 。

1.3 结果分析

1.3.1 冲刷量与径流能量关系

根据实验结果(表 1)可以看出, 随着流量增大, 冲刷量增大, 两者基本上呈线性关系。

表 1 不同坡度、流量下冲刷量 (kg/m^2)

Table 1 Scour erosion amount on different slope degrees and discharges

坡度	流量 (L/min)				
	0.98	1.56	2.16	3.04	4.80
3°	0.085	0.047	0.092	0.105	0.158
6°	0.150	0.382	0.421	0.956	1.500
10°	0.523	0.978	1.821	2.150	3.721
15°	1.107	1.570	2.869	3.156	5.017

还可以看到坡度对径流冲刷量的影响远大于径流量的影响。原因在哪, 我们分析一下各自径流能量, 由公式(5)可得, 不同坡度、流量下径流能量之比

$$\frac{E_i}{E_{i-1}} = \frac{q_i}{q_{i-1}} \cdot \frac{\sin 2\theta_i}{\sin 2\theta_{i-1}}$$

代入数值计算, 见表 2。

表 2 径流能量差异对冲刷量的影响

Table 2 The effect of different runoff energy on		scour erosion amount				
坡度		流量(L/min)				
		0.98	1.56	2.16	3.04	4.8
3°	能量比	1	1.59	2.20	3.10	4.90
	冲刷量比	1	1.3	2.6	3.0	4.5
6°	能量比	1.99	3.16	4.38	6.17	9.75
	冲刷量比	4.3	10.9	12.0	27.3	42.9
10°	能量比	3.27	5.20	7.19	10.14	16.02
	冲刷量比	14.9	27.9	52.0	61.4	106.3
15°	能量比	4.78	7.60	10.52	14.82	23.42
	冲刷量比	31.6	44.9	82.0	90.2	143.3

从表 2 可以看出, 单位径流能量产生冲刷量多少受坡度的影响远远大于径流量, 坡度不变(3°)由于径流量变化引起径流能量增大到 4.9 倍, 所引起的分散量相应增大到 4.5 倍; 而流量不变(0.98 L/min)由于坡度增大引起径流能量增大到 4.9 倍, 导致径流分散量增大到原来的 31.6 倍。可见径流冲刷量大小除与径流能量、土粒间粘结力有关外, 土粒的受力状态(大小、方向、作用点)及前述土粒的稳定程度, 均影响到冲刷的效果。

同时也说明, 径流能量的大小并非唯一决定径流冲刷量, 其作用方式, 单位时间消耗的能量多少均是影响其冲刷能力的因素, 根据实验结果可以计算出不同坡度下单位面积、单位时间内平均径流能量与冲刷量关系曲线。

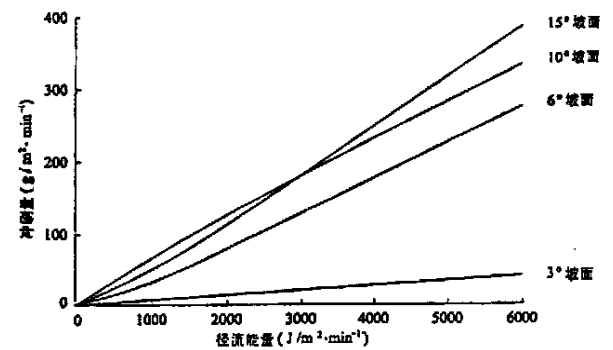


图 2 径流能量与冲刷量关系

Fig. 2 Relationship between runoff energy and scour erosion amount

从图 2 可以看出, 冲刷量与径流能量均呈似线性关系, 故可得出冲刷量与径流能量之间的关系式为

$$Ms=K(E-E_0) \tag{6}$$

式中 E_0 为最小必须侵蚀能量, 本实验得到的 E_0 大约在 100; K 值分别为 0.007(3°), 0.038(6°), 0.048

(10°), 0.054(15°)

可见 K 值除与土体含水量等因素有关外, 坡度也是一个重要影响因子。

1.3.2 径流冲刷量与雨滴分散量比较

对小区略加改造, 在同坡度的坡面上重新隔出 1m² 的区域, 按对应雨强进行人工降雨, 即可得到相同水量的降雨所产生的击溅分散量(表 3), 从降雨击溅分散土量在降雨击溅分散和经流冲刷分散土量总和中所占的百分比占径流冲刷分散土量所占的百分比相对比, 即可回答前述谁占主导地位问题。

表 3 相同水量下降雨击溅量与径流冲刷量的比较($\frac{M_{雨}}{M_{径}}$)

Table 3 Comparison on splash and scouring under the		same rainfall and runoff amount			
雨强(mm/min)	流量(L/min)	坡 度			
		3°	6°	10°	15°
0.8	0.98	22.53	11.23	4.17	1.65
	1.3	28.7	8.71	2.53	1.84
1.8	2.16	24.5	7.56	3.26	1.50
	2.5	20.9	5.20	2.32	1.24
4.0	4.80	21.8	5.80	3.01	1.26
	平均	23.69	7.70	3.06	1.49

从表 3 可看出, 在缓坡、土壤的分离量主要由击溅所产生, 特别在 6° 以下, 雨滴分散量占松散颗粒总量的 88.5%, 随坡度增大, 地表径流冲刷量迅速增加当坡度达到 15° 时, 已占到总量的 40% 以上。

根据表 3, 计算击溅分散量和地表径流冲刷量占总分散量的相应百分数, 见图 3。

由于黄土塬区地表坡度 70%~80% 在 15° 以下, 且 6° 以下坡面占总面积一半以上, 故雨滴击溅是产生松散颗粒的主要原因, 按比例占到总分散量 80% 以上, 而坡面径流(不包括细沟流)所产生的分散量<20%。但随坡度增大其比例迅速增大, 雨滴击溅量则相对减小。因此存在一个临界坡度, 在这个坡度上, 雨滴击溅量与坡面径流冲刷量是相等的, 即两者作用相等, 超过这个界限, 坡面径流就成为主要的松散颗粒的制造者。对于不同的土壤这个值可能不同, 在试验降雨及土壤条件下根据图中两条线发展趋势, 推测这个值在 21° 附近。

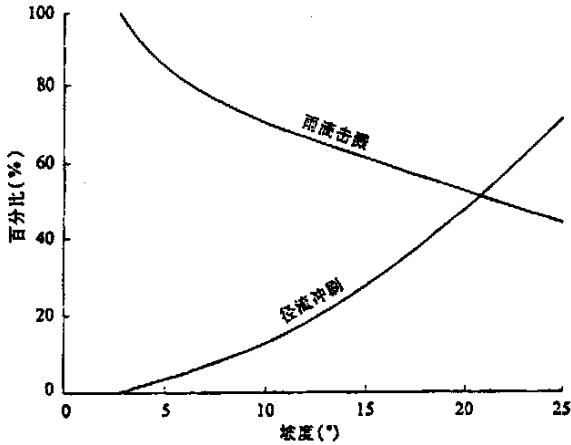


图 3 击溅量及冲刷量百分含量随坡度变化曲线

Fig. 3 Relationship of splash and scouring percentage with slope gradient

2 结语

超渗产流情况下, 均匀降雨在坡面上产生的径

流其单位面积上的能量可用式 $E_j = \frac{\rho g}{4} Lq \sin 2\theta$ 来计算;

缓坡面坡度对径流冲刷分散量的影响远大于径流量的影响, 在径流能量相同的情况下, 地表坡度不同将导致径流冲刷分散量有较大的差异, 这与土粒的受力状态与稳定性有关;

对试验土壤, 在坡度为 6° 的坡面上, 雨滴分散量占松散颗粒总量的 88.5%, 随坡度增大, 径流冲刷分散量迅速增加, 当坡度达到 15° 时, 已占到总量的 40% 以上。当坡度继续到某一值时, 两者的分散量相等, 随后径流分散量大于雨滴击溅量。此临界坡度值随雨强 (主要是雨滴直径) 及土壤 (可蚀性强弱) 不同而变化。

参考文献:

[1] M. J. 柯克比 R. P. C. 摩根著, 王礼先, 吴斌, 洪惜英译. 土壤侵蚀 [M]. 第一版. 北京: 水利电力出版社, 1987.

[2] Stall JB. 黄委会水保处编译. 坡地侵蚀与泥沙输移 [M]. 北京: 科学出版社, 1988. 177.

[3] M. A. 卡森 M. J. 柯克拜著, 窦葆璋译. 坡面形态与形成过程 [M]. 北京: 科学出版社, 1984.

[4] 陈永宗, 景可, 蔡强国. 黄土高原现代侵蚀与治理第 1 版 [M]. 北京: 科学出版社, 1988.

[5] 朱显谟, 蒋定生, 周佩华等. 试论黄土地区水土保持的战略问题 [J]. 水土保持通报, 1984, (1).

[6] Emmett W. W. The hydraulics of overland flow on hillslope. U. S. Geological Surv. Prof. Paper 662A. 1970.

[7] Yoon, N. Y. and G. H. Wenzel Mechanics of sheet flow under simulated rainfall. J. Hyd. ASCE. 1971. 97(9).

[8] Shen, H. W. and Li, R. M. Rainfall effect on sheet flow over smooth surface. J. Hyd. ASCE. 1973. 99(5).

[9] Rose C. W. Parlange J. Y. Sander G. C. Campbell S. Y. and Barry, D. A. A kinematic flow approximation to runoff on a plane; an approximate analytic solution. 1983. Journal of Hydrology. 63: 363~369.

[10] Rose C. W. Wilkins J. R. Sander G. C. Campbell, D. A. A mathematical model of soil erosion and deposition processes. (2). Application to data from an arid-zone catchment. 1983. Soil Science Society of America Journal 47: 996~1000.

[11] Rose C. W. 1985. Developments in soil erosion and deposition models. Advances in soil science. Vol. 2; 1~63.

[12] Rose, C. W., D. M. Freebairn and G. C. Sander. 1984. GNFI: A Griffith university program for computing infiltration from field hydrologic data school of Australian Environmental Studies Monograph. Griffith university Brisbane, Queensland.

[13] Rose C. W., B. R. Roberts and D. M. Freebairn. 1983. Soil conservation policy and a model of soil erosion. In D. E. Byth, M. AM. Foale, V. E. Mungomery, and E. S. wallis[editors] new Technology in field crop protection. Australian Institute of Agricultural Science, Melbourne, 212~216.

[14] Rose, C. W. J. R. Williams G. C. Sander and D. A. Bary. 1983. A mathematical model of soil erosion and deposition processes. I. Theory for a plane land element. soil erosion and deposition processes. II application.

[15] Lal R. 黄河水利委员会宣传出版中心. 土壤侵蚀研究方法第一版 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.

[16] 陈文亮, 王占礼. 人工模拟降雨特性的试验研究. 水土保持通报, 1991, (2): 56~62.

[17] 江忠善, 刘志. 降雨因素和坡度对溅蚀影响的研究. 水土保持通报, 1991, (3): 29~35.

[18] 吴普特, 周佩华. 坡面薄层水流流动型态与侵蚀搬运方式的研究. 水土保持学报, 1992, 6(1): 20~24.

[19] 吴普特, 周佩华. 雨滴击溅对薄层水流水力摩阻系数的影响. 水土保持学报, 1994, 8(2): 40~42.

[20] 吴普特, 周佩华. 地表坡度与薄层水流侵蚀关系的研究. 水土保持通报, 1993, 13(3): 1~5.

[21] 李光录, 赵晓光. 水土流失对土壤物理性质的影响. 西北林学院学报, 1995(增): 22~27.

The Effect of Runoff at the Stage of Soil Particle Dispersion on the Sloping Surface

ZHAO Xiao-guang, SHI Hui

(1. Institute of soil science, chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008;

2. Southwest-China normal University, Beibei Chongqing 400715)

Abstract: Runoff energy of per area could be expressed as $\frac{\rho g}{4} Lq \sin 2\theta$; during even rainfall sloping surface and super-infiltrating runoff pattern through hydrologic and hydraulic theory and method of calculus. The characteristic rainfall density (0.8mm/min ~ 4.0mm/min) of rainstorm was simulated on the sloping surface of $3^\circ \sim 15^\circ$ in the loess plateau. The 1m×1m plot of sloping surface was affected by the way of runoff and rainfall seperately and controlling the same discharge. The soil particle dispersion was determined by the experiment. The results showed that the effect of sloping degree surpassed the runoff, and the percentage of soil particle dispersion produced by rainfall impact amounting to the total dispersion was decreasing trend with the increasing sloping degree. The results of the dispersion produced by runoff were opposite. having an increasing trend with the increasing sloping degree and in creasing percentage from 20% to 70% between 6° and 15° . The results showed that a critical value of being equal in the two sloping degree existed (the value coas about 21° during the conditions of experiments). The scouring amounts of runoff would srupassed the amounts of raindrop impact when the sloping degree exceeded the value.

Key words: hydraulic ersion; raindrop impact; slope runoff