

黄土坡面细沟侵蚀试验研究及土壤抗冲性评价

雷俊山^{1,2}, 杨勤科^{1,2}, 郑粉莉^{1,2}

(1. 中国科学院水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 通过室内放水冲刷试验, 分析了坡面侵蚀过程中跌坑产生与发育的机理, 阐明了溯源侵蚀、边壁崩塌和细沟下切侵蚀之间的相互关系。研究了各放水流量下坡面产沙及细沟径流的变化规律, 建立了坡面产沙量与细沟面积比例和流量关系。本文通过对冲刷过程中各侵蚀营力的分析, 得到了径流剪切作用产沙方程。研究表明, 径流剪切产沙率和单位面积径流剪切力呈显著的正相关关系, 土壤颗粒被分离的临界剪切力为 0.258 N/m^2 。

关键词: 溯源侵蚀; 径流剪切; 土壤抗冲性; 细沟侵蚀

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2004)02-0001-04

中图分类号: S157.1

Experimental Research on Rill Erosion of Loessial Slope and Evaluation on Soil Anti-scourability

LEI Jun-shan^{1,2}, YANG Qin-ke^{1,2}, ZHENG Fen-li^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and

Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi Province, China;

2. Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

Abstract: On the basis of scouring experiments indoors, the mechanism of the drop pit' genesis and development during the process of slope erosion is analyzed, and the relationship among headcut, bank landslip and downcut has been expounded. The variation regularity of the runoff and the sediment yield in each discharge was studied, and the relationship among the sediment, the runoff and the proportion of the rill area was obtained. Analyzing each erosion stress on the slope during the scouring, we get the runoff shearing sediment equation. The study shows that the sediment yield from runoff shearing take on a good positive correlation with the average runoff shear stress, and the critical shear stress of the runoff, by which the soil grain can just be dispersed, is 0.258 N/m^2 .

Keywords: back erosion; the runoff shear stress; soil anti-scourability; rill erosion

1 前言

目前土壤抗冲性的研究分为室内和室外 2 种, 室外主要用原状土冲刷槽法, 野外实地放水法和径流小区资料分析法^[1-5]进行研究, 其优点是土壤不受扰动, 试验结果很有代表性, 但这类方法大多是用土壤侵蚀的结果评价土壤抗冲性, 缺乏侵蚀机理研究。室内主要用人工模拟降雨法和放水冲刷法研究土壤抗冲性, 试验条件良好, 可从侵蚀力学角度入手, 用力学指标评价土壤抗冲性^[6-10]。相比之下, 室内研究更系统一些, 但在室内, 土壤多为扰动土壤, 很多研究成果以当地土壤为试验材料, 很难应用于野外。本文以安塞黄绵土为对象, 通过室内不同流量的放水冲刷试验, 研究坡面土壤侵蚀过程并评价其抗冲性。

2 试验设计及评价指标

2.1 试验设计

2.1.1 冲刷试验装置 供水箱、静水室和钢制冲刷土槽 ($1.0 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$), 支架, 供水管。水流先进入静水室, 然后均匀分散从坡面流下 (图 1)。

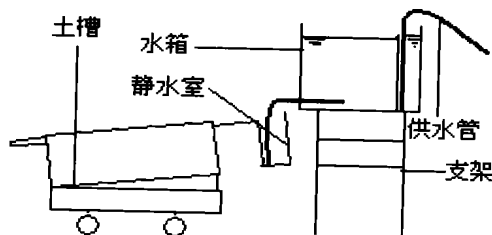


图 1 放水冲刷装置示意图

2.1.2 放水流量与冲刷时间 参考前人研究的黄土高原经常侵蚀性降雨的雨强和雨量范围^[11], 结合试验槽的尺寸, 设计放水流量和冲刷时间分别为 2, 4, 6, 8 和 10 L/min。冲刷时间用总水量 150 L 控制, 坡度为 5° (表 1)。

表 1 试验设计

侵蚀性雨强范围/ (mm·min ⁻¹)	径流系数	径流强度/ (mm·min ⁻¹)	土槽尺寸/ m	设计放水流量/ (L·min ⁻¹)	时间/ min
0.5	0.8	0.4	—	2	75
1.0	0.8	0.8	长 1.0	4	38
1.5	0.8	1.2	宽 0.5	6	25
2.0	0.8	1.6	深 0.3	8	19
2.5	0.8	2.0	—	10	15

2.1.3 试验过程 实验用土为陕西省安塞县黄绵土壤, 采用分层称重装土, 容重为 1.16 g/cm³。先把采集的土壤经过 1 cm² 孔径的筛子, 混合均匀, 测出含水量, 根据填土体积与容重称取定量土壤填入。装土前, 在槽底垫 5 cm 厚的天然沙, 保证土壤的透气透水接近天然状况。冲刷前一天, 用 30 mm/h 雨强进行人工模拟降雨, 至刚产流时停止, 这样可以确保每次冲刷都在同样的土壤下垫面进行。

冲刷开始后, 每 1 min 接 1 次径流泥沙样, 同时, 用染色法测出径流流速。细沟产生与发育后要分别测出细沟流速与沟间流速, 并连续记录细沟形态, 定时照相以分析细沟的发育过程。试验后, 获取径流体积

和烘干泥沙重量, 细沟发育相片在 ArcView 软件下分析细沟面积占坡面面积的比例。

2.2 土壤抗冲性评价指标

为了反映土壤抗冲的机理, 我们用土粒被径流分散的临界切应力作为土壤抗冲性指标, 单位为 N/m², 它克服了因坡度和试验方法等的不同而使研究结果没有可比性的缺点, 适用性强。

3 试验结果及分析

3.1 坡面细沟产生机理及其发育

通过多次放水试验观察发现, 黄绵土因砂粒含量高, 土粒易被分散等, 坡面侵蚀主要以细沟侵蚀为主。在冲刷中, 由于坡面不平整, 局部抗冲性弱和径流分布不均等, 坡面总是出现一些跌坑 (图 2a), 径流流经跌坑时, 跌坑上边缘的土壤颗粒受到径流剪切和重力共同作用, 更易被分散, 同时, 水流流进跌坑内要进行消能, 有加深跌坑和搅拌径流双重作用, 使径流含沙量居高不下。随着冲刷的进行, 跌坑向上发育, 出现了细沟的雏形。可见, 跌坑的出现, 使坡面侵蚀方式发生改变, 侵蚀量大大增加, 跌坑的出现是细沟侵蚀开始的标志^[12] (图 2b)。

跌坑出现具有较大的随机性, 可以发生在细沟之间, 也可以发生在细沟内, 当细沟进行溯源侵蚀时, 由于汇水面积的变大, 含沙量增多以及边壁崩塌对径流的阻碍和扰动, 细沟内不断的酝酿着再次出现新的跌坑 (图 2c)。

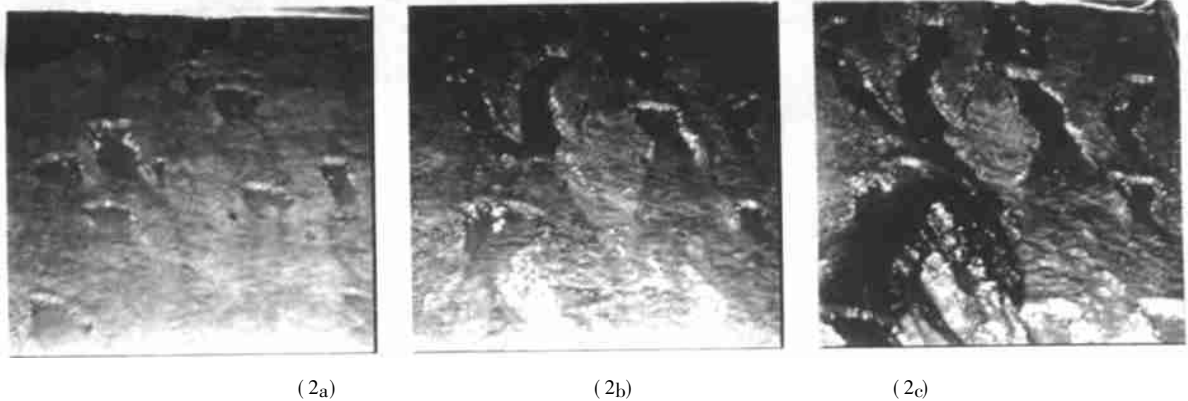


图 2 坡面跌坑的出现及发育

细沟侵蚀可细分为溯源侵蚀、细沟下切和边壁崩塌 3 种^[13-14], 它们分别使细沟变长, 变深和加宽。溯源侵蚀, 细沟下切和边壁崩塌之间相互影响, 相互制约。溯源侵蚀和细沟下切是一个连续过程, 边壁崩塌具有间断性和随机性。当溯源侵蚀强烈时, 径流含沙量大, 影响到径流流速, 使其剪切力减小, 下切减弱, 这时边壁崩塌比较缓慢。当细沟发育较慢时, 径流含沙量少, 挟沙能力强, 细沟下切强烈, 边壁崩塌剧烈。

3.2 坡面产沙率与细沟径流流速变化

根据试验记录, 绘制出坡面产沙率和细沟径流流速随时间变化图 (图 3—7), 可以看出, 冲刷过程中坡面产沙率上下浮动较大, 峰谷交替。放水流量不同, 坡面产沙率第一个峰值的高低和该峰值出现的时间不同, 放水流量越大, 第一个峰值越高且出现越早, 反之, 该峰值越低且出现的较晚。结合试验像片, 我们发

现,当坡面产沙率迅速增加时,都伴随着强烈的细沟朔源侵蚀,细沟发育至坡顶附近时,产沙率到达峰值,然后慢慢回落。当坡面再次出现跌坑并迅速发育时,产沙率又开始增加。

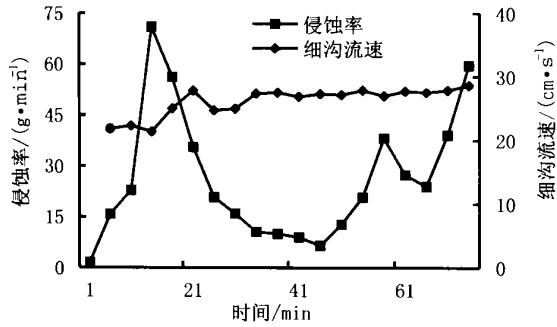


图 3 2 L/min 流量下产沙率与细沟流速变化

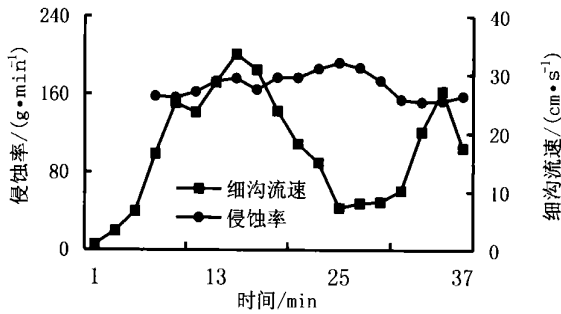


图 4 4 L/min 流量下产沙率与细沟流速变化

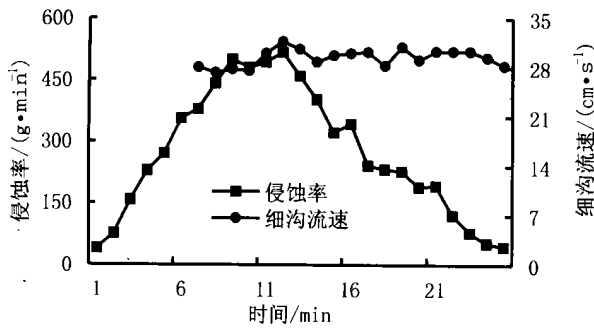


图 5 6 L/min 流量下产沙率与细沟流速变化

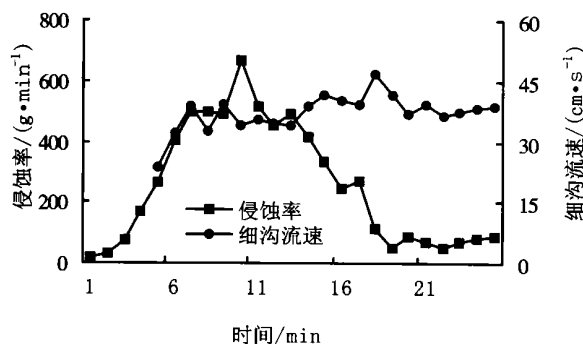


图 6 8 L/min 流量下产沙率与细沟流速变化

细沟流速在冲刷中较平稳,随着冲刷时间的延长略有增加。因为随着细沟发育,汇水面积增大,细沟内流量增大,流速加快,当细沟发育到坡顶后,细沟内流量稳定,流速趋于平稳。有时由于边壁崩塌阻碍水流等,细沟流速也有较大波动,甚至当细沟被拓宽后,径流被分散,流速有减小的可能。细沟流速与放水流量有关,放水流量越大,细沟流速越大,反之越小。

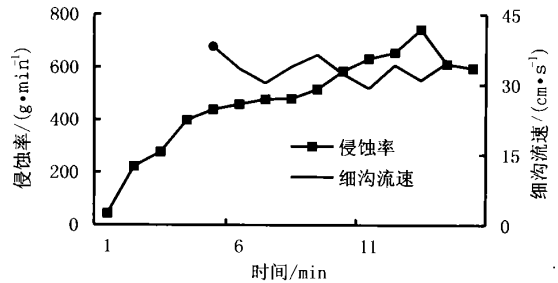


图 7 10 L/min 流量下产沙率与细沟流速变化

3.3 坡面产沙量与细沟发育及流量关系

细沟的产生与发育使得坡面径流变化复杂,坡面产沙率也没有明显的规律性,但有一点可以肯定,那就是坡面细沟条数越多,发育的越充分,坡面侵蚀量就越大。于是,我们以细沟面积占坡面面积的百分比作为细沟发育的指标,分析坡面产沙量,细沟面积百分比和径流流量等数据(表 2),发现坡面产沙量与细沟面积百分比以及实际流量呈良好的线性关系:

$$M = 1596.70S + 488.18q - 303.89 \quad (1)$$

$$R = 95.77\%$$

式中: M —— 总侵蚀量(g); S —— 细沟侵蚀面积比例(%); q —— 流量(L/min)。对于 $\alpha = 0.1$, 有 $F = 11.08 > F_{0.1}(2, 2) = 9.0$, 说明线性关系显著。

表 2 各放水流量下的产沙量、平均流量和细沟面积比例

项 目	放水流量/(L·min ⁻¹)				
	2.00	4.00	6.00	8.00	10.00
细沟面积比例/%	8.40	20.00	30.00	16.00	22.00
流量/(L·min ⁻¹)	1.43	3.24	4.57	5.82	8.42
侵蚀量/g	1484	3895	6806	5961	6543

3.4 黄绵土抗冲性研究探讨

我们知道,土壤抗冲性是指土壤抵抗径流对其剪切破坏的能力^[15],因此,除径流剪切以外的其它侵蚀营力的作用不包含在土壤抗冲性的范畴。对冲刷过程中产沙机制进行分析,认为细沟间侵蚀与细沟下切都是径流剪切的结果,边壁崩塌属于重力侵蚀,朔源侵蚀中重力作用与径流剪切并存^[13]。我们根据侵蚀营力,把坡面侵蚀产沙分为有重力作用参与的产沙与仅

有径流剪切产沙 2 部分, 观察方程(1)的 2 个变量, S 是坡面细沟面积比例, 它反映了朔源侵蚀与边壁崩塌的程度, 可认为 S 和系数 15 296.70 的乘积代表朔源侵蚀与边壁崩塌的贡献量, 那么剩余部分则代表了径流剪切贡献量。

对于方程(1), 我们令 $S = 0$, 即坡面不发生边壁崩塌和朔源侵蚀, 得到径流剪切力作用的产沙方程:

$$M_s = 488.18q - 303.89 \quad (2)$$

根据冲刷时间可算出各放水流量时径流剪切力作用下的产沙率。对于单位面积径流剪切力, 只能求整个冲刷过程的均值, 假定径流完全分布于整个坡面上, 根据平均流量以及细沟流速与细沟间流速的平均值, 依据径流连续性原理和水力学公式求得单位面积径流剪切力。

分析试验中的径流剪切产沙率与单位面积径流剪切力数据(表 3)发现, 它们的关系可用直线表示:

$$D_r = 640.16 \times (\tau - 0.258) \quad R^2 = 98.12\%$$

式中: D_r —— 产沙率(g/min); τ —— 径流剪切力(N/m^2)。对于 $a = 0.01$, $F = 156.40 > F_{0.01}(1, 3) = 34.10$, 说明它们之间的线性关系极显著, 求出黄绵土颗粒被分离的临界剪切力是 $0.258 N/m^2$ 。

表 3 不同放水流量下产沙率与单位面积径流剪切力平均值

项 目	放水流量/($L \cdot min^{-1}$)				
	2.00	4.00	6.00	8.00	10.00
实际流量/($L \cdot min^{-1}$)	1.43	3.24	4.57	5.82	8.42
产沙率/($g \cdot min^{-1}$)	8.96	37.89	92.47	167.56	270.37
径流切应力/($N \cdot m^{-2}$)	0.26	0.33	0.43	0.49	0.69

4 结 论

(1) 通过多次放水冲刷试验证明, 黄绵土坡面侵蚀主要以细沟侵蚀为主。冲刷中坡面总是出现一些跌坑, 跌坑上边缘的土壤颗粒受到径流剪切和重力双重作用更易被分散, 使得跌坑变长, 发育成细沟。

(2) 黄绵土冲刷中坡面产沙是峰谷交替, 变化不定。细沟流速随着冲刷时间的延长而增加, 有时也会因边壁崩塌等上下波动。随着放水流量的增大, 细沟流速随着增大。

[参 考 文 献]

- [1] 刘国彬. 黄土高原土壤抗冲性研究及有关问题[J]. 水土保持研究, 1997, 4(5): 91—101.
- [2] 周佩华, 武春龙. 黄土高原土壤抗冲性的试验研究方法探讨[J]. 水土保持学报, 1993, 7(1): 29—34.
- [3] 周佩华, 郑世清. 黄土高原土壤抗冲性的试验研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(5): 47—58.
- [4] 吴普特. 黄土区土壤抗冲性研究进展及亟待解决的若干问题[J]. 水土保持研究, 1997, 4(5): 59—66.
- [5] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997. 45—56.
- [6] 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的试验研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(2): 160—166.
- [7] 李占斌. 黄土坡面土壤侵蚀动力过程试验研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 5—8.
- [8] 丁文峰, 李占斌. 黄土坡面径流冲刷侵蚀试验研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 99—101.
- [9] 王文龙, 雷阿林, 等. 黄土丘陵区坡面薄层水流侵蚀动力机制试验研究[J]. 水利学报, 2003(9): 66—70.
- [10] 郑良勇, 李占斌. 坡面黄土陡坡土壤侵蚀特性试验研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(2): 47—49.
- [11] 王万忠. 黄土高原降雨侵蚀产沙与黄河输沙[M]. 科学出版社, 1996. 102—136.
- [12] 白清俊, 马树升. 细沟侵蚀过程中水流跌坑的发生机理探讨[J]. 水土保持学报, 2001, 15(6): 62—65.
- [13] 韩鹏, 倪晋仁, 李天宏. 细沟发育过程中的溯源侵蚀与沟壁崩塌[J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, 10(2): 115—126.
- [14] 郑粉莉. 黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟[M]. 西安: 陕西人民出版社.
- [15] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素(三)[J]. 水土保持通报, 1982, 2(1): 25—30.