

## 黄土高原陡坡土壤侵蚀特性试验研究

郑良勇, 李占斌, 李 鹏

(中科院水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

**摘 要:** 通过室内冲刷模拟试验对黄土高原陡坡土壤侵蚀特性进行系列研究。结果表明, 陡坡径流平均流速随径流量和坡度的增大呈波动趋势增加, 坡面径流平均含沙率, 平均输沙率和平均剪切力均随流量的增加波动增加, 随坡度的增加而呈抛物线形式变化, 临界坡度值出现在 21° 和 24° 之间。坡面径流平均输沙率与平均剪切力之间量良好的线性关系。本研究对深入了解陡坡土壤侵蚀机理, 合理确定退耕坡度具有重要意义。

**关键词:** 陡坡; 土壤侵蚀; 临界坡度

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2003)02-0047-03

## Experimental Study on Soil Erosion Characteristics of Steep Slope on Loess Plateau

ZHENG Liang-yong, LI Zhan-bin, LI Peng

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences  
and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China)

**Abstract:** The results of runoff scouring experiments show that average flow velocity of steep slope increased with the discharge of flow and slope gradient. The average silt content rate, the average sediment transport rate and the average shear stress all increased when the discharge of flow increased, they changed in parabolic form with the increase of slope gradient and the critical gradient is between 21° and 24°. The relationship between the average sediment transport rate and the average shear stress is linear. This research is useful to understand the erosion mechanism of steep slope.

**Key words:** steep slope; soil erosion; critical slope gradient

我国黄土高原地形复杂, 生态环境脆弱, 是世界上土壤侵蚀最严重的地区之一,<sup>[1]</sup> 尤其该区生产力低下, 陡坡开荒严重, 更加剧了水土流失。近年来, 国内外各国学者对土壤侵蚀发生的过程和机理进行了深入研究, 取得了丰硕成果。建立土壤侵蚀预报模型是侵蚀研究的最终目的,<sup>[2]</sup> 侵蚀预报模型的研究已有半个多世纪, 并由最初的经验模型发展到以 WEPP 模型为代表的基于物理基础的模型。<sup>[3]</sup> 但是以往研究大多在缓坡进行, 难以适用于我国坡陡沟深的黄土高原, 并且很少对土壤侵蚀过程进行较完整系列的研究, 难以形成对土壤侵蚀完整的认识。因此, 针对陡坡众多的黄土高原, 进行土壤侵蚀过程和机理的系列研究对建立我国黄土高原土壤侵蚀预报模型具有重要意义。

本文在室内放水冲刷模拟试验的基础上, 对黄土高原陡坡土壤侵蚀特性进行了系统研究, 以期对深入了解土壤侵蚀发生的机理和建立适用于我国黄土高原的侵蚀预报模型提供科学依据。

### 1 材料与方法

试验在中科院水土保持与生态环境研究中心降雨大厅利用可调坡钢制土槽内进行。土槽宽为 33 cm, 长 400 cm, 深 50 cm, 底部铺填 20 cm 厚的天然沙, 以保持试验土槽的透水状况接近天然状况。试验土壤过 1 mm 孔径的筛后分层填入试验槽, 填土干容重控制在  $1.3 \text{ g/cm}^3$  左右。为了保证每次试验的初始条件基本一致, 试验开始前在试验土槽表面均匀撒水使表层土壤接近饱和。采用定水头控制试验流量。试验开始后每一分钟取一次径流泥沙样, 同时接取全部径流泥沙以计算侵蚀量。每分钟用染色法分 4 个段面测定坡面径流的流速, 在固定位置用直尺量测坡面径流的水流宽度。整个试验持续 15 min。试验进行 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5 L/min 五个流量, 坡度采用 15°, 18°, 21°, 24°, 27°, 30° 六级变化。试验重复两次, 用土为杨凌地区的黄土, 其粒径组成如表 1 所示。

收稿日期: 2002-09-30

基金项目: 本文受中国科学院知识创新重大项目“西部生态环境演变与水土资源可持续利用研究”支持, 课题编号 KZCX1-10-04。

作者简介: 郑良勇(1977-), 男, 山东淄博人, 在读硕士, 从事坡面侵蚀水动力学等方面的研究。

表 1 试验土壤的粒径组成

粒径/mm	1~0.25	0.25~0.05	0.01~0.005	0.05~0.01	0.005~0.001	<0.001
百分比/%	0.12	2.70	6.88	41.13	12.89	36.28

2 结果与讨论

2.1 陡坡径流流速变化规律

流速是坡面径流最重要的水动力学要素之一,直接影响

到水流剥蚀土壤和携带泥沙的能力。<sup>[1]</sup>图 1 和图 2 为陡坡坡面径流平均流速随坡度和流量的变化图。从图中可以看出,坡面径流流速总体上随着坡度的增加而增加。这是因为当坡度增加时,重力在沿坡面方向的分力逐渐增大,径流沿着坡面运动的动力逐渐增加,推动坡面径流以更大的速度运动。随着流量的增加,径流流速呈波动形式也略有增加。

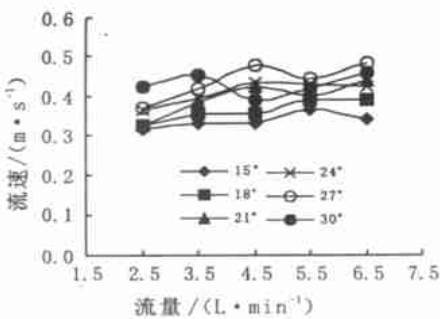


图 1 陡坡径流平均流速随流量变化图

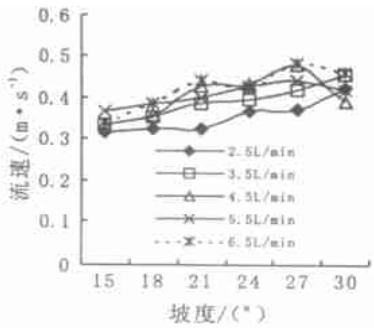


图 2 陡坡径流流速随坡度变化图

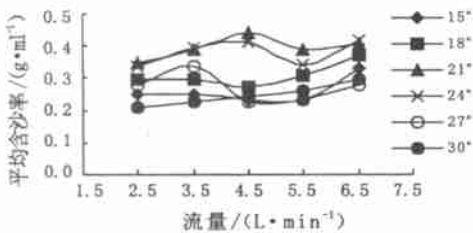


图 3 径流平均含沙率随流量变化图

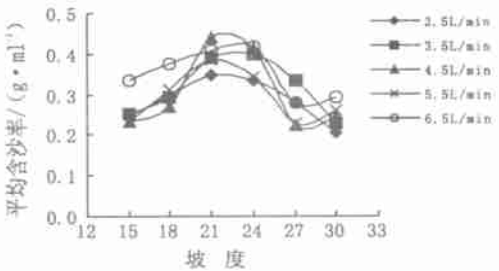


图 4 径流平均含沙率随坡度变化图

2.2 陡坡径流含沙率变化规律

径流在顺坡向下流动的过程中对坡面土壤具有剥蚀分离能力,分离的泥沙将被水流携带离开原来的地方。水流携带的泥沙大部分以推移质的形式运动,由于受到径流携带能力和泥沙重力时空变化的影响,一部分泥沙将在坡面上沉积,另一部分将被水流携带出水口。在不同的坡度和流量条件下,径流具有不同的挟沙能力,因此在出水口径流的含沙率随坡度和流量的变化而不断变化。

图 3 和图 4 分别为陡坡径流平均含沙率随流量和坡度的变化图。从图中可以看出,在相同的坡度下,径流平均含沙率总体上随着流量的增加呈波动形式增加。究其原因这是由于流量增加时,径流的流速加大,对坡面土壤的剥离能力增强,含沙率变大。在相同的流量条件下,含沙率随坡度呈抛物线形式变化。坡度较小时,径流含沙率随坡度的增大而增大;当坡度达到 21 和 24 左右时,含沙率达到最大值;随坡度继续增大,径流含沙率呈递减趋势。这说明径流含沙率在随坡度变化过程中存在临界最大值现象。此临界值随流量的不同略有不同。

2.3 陡坡径流平均输沙率变化规律

径流的含沙率与流量直接影响坡面侵蚀产沙量。点绘试

验中陡坡径流的平均输沙率随坡度和流量的变化图,如图 5 和图 6 所示。从图中可以看出,径流平均输沙率总体趋势随流量的增加呈波动形式增大。只有 30°;6.5 L/min 条件下径流平均输沙率例外,其原因有待进一步研究。在相同的流量下,径流平均输沙率随坡度呈抛物线形式变化,临界最大值出现在 21 和 24 之间,与径流平均含沙率一致。这说明坡面土壤侵蚀并非随坡度的增加而一直增大,当坡度达到一定值时,坡面土壤侵蚀量达到最大值,超过这个坡度,土壤侵蚀量随坡度的增加反而减小。这就是通常所说的临界坡度现象。本试验中坡面土壤侵蚀的临界坡度值位于 21 和 24 之间,此值随流量的不同略有变化。临界坡度现象的研究对于深入了解坡面土壤侵蚀过程和合理确定退耕坡度具有重要意义。

2.4 坡面径流平均剪切力变化

土壤侵蚀过程实际上是地表土壤在自然外力作用下发生土体空间位置变化的过程,径流剪切力是水流剥蚀分离土壤的主要营动力,其大小和变化规律直接反映了坡面土壤侵蚀状况的变化。在不同流量、不同坡度下,坡面单宽径流剪切力的变化规律如下图 7、8 所示。

从图中可知,坡面径流的剪切力总体趋势随着流量的增加呈波动形式增加,在不同坡度下其波动趋势有所不同。在

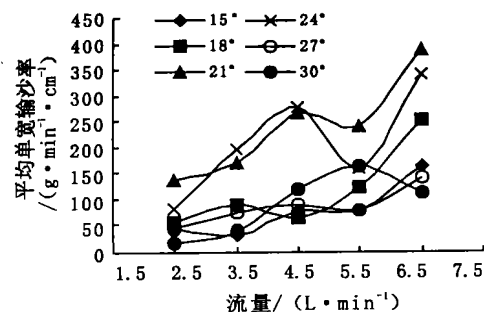


图5 径流平均输沙率随流量变化图

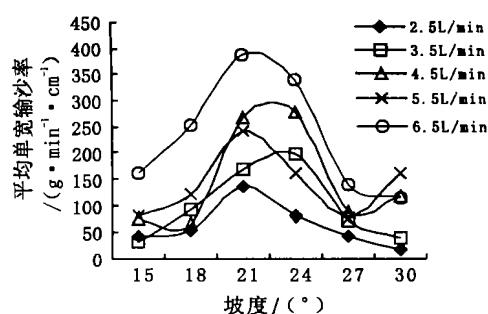


图6 径流平均输沙率随坡度变化图

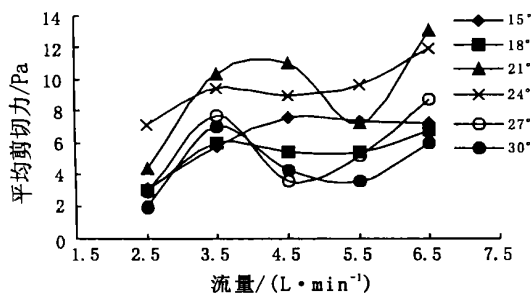


图7 径流剪切力随流量变化图

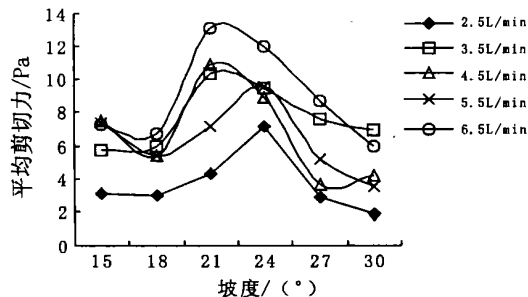


图8 径流剪切力随坡度变化图

相同的流量下, 径流剪切力并不一直随着坡度的增加而增加, 而是呈现出了先增加后降低的抛物线变化趋势。说明坡面径流的剪切力在随坡度的变化过程中具有极值现象, 其极值出现在 21 和 24 之间。这与坡面径流含沙率和输沙率的变化基本一致。由此说明, 坡面径流剪切力与坡面径流输沙率之间关系密切。拟合两者之间的关系可以得到下式:

$$W_{\tau} = 28\,375(\tau - 1\,757) \quad R^2 = 0\,870 \quad (1)$$

式中:  $W_{\tau}$ ——径流平均输沙率;  $\tau$ ——径流平均剪切力。

从上式可知, 坡面径流平均输沙率与径流平均剪切力之间为线性关系。坡面径流平均输沙率随坡度和流量的变化规律

可以用平均剪切力的变化进行解释。

### 3 结 论

(1) 室内放水冲刷试验的结果表明, 陡坡径流平均流速随径流量和坡度的增大呈波动趋势增加。

(2) 坡面径流平均含沙率, 平均输沙率和平均剪切力均随流量的增加波动增加, 随坡度的增加而呈抛物线形式变化, 临界极值坡度在 21 和 24 之间。

(3) 坡面径流平均输沙率与平均剪切力之间为线性关系, 关系式为  $W_{\tau} = 28\,375(\tau - 1\,757)$ 。

### 参考文献:

- [1] 郑粉莉, 等. 坡耕地细沟侵蚀的发生、发展和防治途径的探讨[J]. 水土保持学报, 1987, 1(1): 36- 48
- [2] 胡世雄, 靳长兴. 坡面流与坡面侵蚀动力过程研究的最新进展[J]. 地理研究, 1998, 17(3): 326- 335
- [3] 郑粉莉, 高学田. 黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟[M]. 西安: 陕西人民出版社, 2000 11- 12
- [4] 张科利, 等. 黄土坡面沟蚀发生机理的水动力学试验研究[M]. 泥沙研究, 1998, 9(3): 74- 80

(上接第 16 页)

- [5] 侯喜禄, 白岗栓, 曹清玉. 黄土丘陵区森林保持水土效益及其机理的研究[M]. 水土保持研究, 1996, 3(2): 98- 103
- [6] 谢云, 刘宝元, 张文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 6- 11
- [7] 王晓. 黄土丘陵沟壑区第一副区山坡地生态农业建设模式初探. 水土保持学报, 1999, 5(6): 95- 98
- [8] 孙立达, 朱金兆. 水土保持林体系综合效益研究与评价[M]. 北京: 科学出版社, 1995
- [9] 魏天兴. 黄土残塬沟壑区降雨侵蚀分析[J]. 水土保持学报, 2001, 15(4): 48- 50
- [10] 江忠善. 黄河中游黄土丘陵沟壑区小流域产沙量计算[A]. 河流泥沙国际学术研讨会论文集[C]. 北京: 光华出版社, 1980
- [11] 贾绍凤. 黄土高原降雨径流产沙相互关系的研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(3): 42- 47
- [12] 张翼. 黄土高原丘陵沟壑区土壤侵蚀研究[J]. 水土保持研究, 2001, 8(2): 39- 47
- [13] 刘向东, 吴钦孝, 赵鸿雁. 黄土高原油松人工林枯枝落叶层水文生态功能研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(4): 87- 91
- [14] 唐洪政. 基于 GIS 的农林复合经营的侵蚀控制模拟研究[J]. 水土保持研究, 2001, 8(4): 170- 174
- [15] 马雪华. 森林水文学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993 251- 252
- [16] 张科利, 秋吉康宏. 坡面细沟侵蚀发生的临界水力条件研究[J]. 水土保持学报, 1998, 4(1): 41- 46
- [17] 邱扬. 土壤侵蚀时空变异及其与环境因子的关系[J]. 水土保持学报, 2002, 3(1): 108- 111