

黄土坡面坡长对侵蚀—搬运过程的影响研究

汪晓勇^{1,2}, 郑粉莉^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 通过不同降雨强度的模拟降雨试验, 研究了 15° 时坡面坡长对黄土坡面侵蚀—搬运过程的影响。结果表明, 坡面径流量随坡长的增加而增加, 在 50 和 75 mm/h 降雨强度下, 坡面径流量随坡长增加的幅度基本相同。在 100 mm/h 降雨强度下, 当坡长小于 5 m 时, 坡面径流量随坡长的增加幅度较小, 而当坡长大于 5 m 时, 坡面径流量随坡长增加的速率明显增大。在 8 m 坡长内, 坡面侵蚀量随坡长变化呈波状起伏的交替变化; 随坡长增加, 坡面侵蚀现象呈现以侵蚀—搬运过程为主与以侵蚀—沉积过程为主的交替现象。

关键词: 坡长; 侵蚀过程; 泥沙搬运; 模拟降雨

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008)03-0001-04

中图分类号: S157.1

Effects of Slope Length on Detachment and Transport Processes on a Loessial Hillslope

WANG Xiaoyong^{1,2}, ZHENG Fenli^{1,2}

(1. College of Resources and Environment Science, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Effects of slope length on detachment and transport processes on a 15° loessial hillslope were quantitatively studied by using simulated rainfall of different intensities. Results showed that runoff discharge increased with an increase in slope gradient. At the 50 and 75 mm/h rainfall intensities, the increment of runoff discharge with an increase in slope length was approximately the same. At the 100 mm/h rainfall intensity, the increment of runoff discharge decreased for the < 5 m slope length, but for the > 5 m slope length, runoff discharge remarkably increased with an increase in slope length. Sediment yield was fluctuated obviously for the 8 m slope length. Sediment regime was characterized by an alternation of detachment-transport dominated and detachment-deposition dominated.

Keywords: slope length; erosion process; sediment transport; simulated rainfall

降雨过程中, 坡面侵蚀、沉积、搬运过程随时随地发生, 坡长决定着坡面水流能量的沿程变化, 水流及泥沙的运移规律。因此, 定量地描述坡面侵蚀、沉积、搬运过程, 建立土壤侵蚀过程模型就必须对坡面侵蚀—搬运过程随坡长变化的规律进行深入的研究。

早在 1936 年 Cook 就提出坡长是影响侵蚀的重要因素^[1]。在随后的几十年中, 国外学者在坡长对侵蚀的影响规律方面的研究结果呈现 3 种不同的观点^[2]。第一种观点认为, 随坡长增加, 水流中的含沙

量增加, 水流能量多消耗于搬运泥沙, 侵蚀作用反而减弱^[3]; 第二种观点认为, 从坡上到坡下, 由于水深逐渐增加, 侵蚀量相应增大^[4-5]; 第三种观点认为, 随坡长增加, 径流量增加, 侵蚀量增加, 在侵蚀增加以后, 水流含沙量也增加, 水体搬运泥沙所消耗的能量加大, 侵蚀减弱, 两者相互消长, 结果从坡上到坡下侵蚀没有很大的差异^[6]。我国学者从 20 世纪 50 年代开始深入研究了坡长对坡面侵蚀产沙的影响。罗来兴^[7]的研究结果表明, 黄土区坡地上的冲刷量随坡长

收稿日期: 2007-04-04

修回日期: 2007-10-03

资助项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB407201); 中国科学院西部行动计划(二期)项目(KZCX2-XB2-05-03)

作者简介: 汪晓勇(1982—), 男(汉族), 安徽无为, 人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail: wangxiaoyong2238@163.com。

通信作者: 郑粉莉(1960—), 女(汉族), 陕西省蓝田县, 人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程、预报和侵蚀环境效应评价研究。

E-mail: flzh@ms.isw.ac.cn。

的增加, 侵蚀呈强弱交替变化; 郑粉莉^[8] 等认为黄土坡耕坡面侵蚀产沙量随坡长的变化呈强弱波状起伏变化; 蔡强国^[9] 等的研究结果也表明坡面侵蚀产沙量随坡长呈现增加趋势, 但当坡长大于临界坡长时, 单位面积侵蚀量随坡长的增加而减少。由于坡面径流和侵蚀受降雨、下垫面性质和人类活动等诸多因素影响, 各单个因子对侵蚀产沙过程的影响很复杂, 而且相互对坡面侵蚀搬运一过程产生影响, 坡长对侵蚀的影响因地因时而异。因此关于坡长对侵蚀一搬运过程的专门研究还相对薄弱。本文通过不同降雨强度的模拟降雨试验, 定量研究 15° 时坡面坡长在黄土坡面侵蚀一搬运过程中的侵蚀产沙作用, 以期为建立具有物理成因的坡面侵蚀预报模型提供理论支持, 为坡面水土保持措施规划和配置提供科学依据。

1 试验设计与研究方法

试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀人工模拟降雨大厅进行, 试验所用降雨设备为侧喷式的人工降雨设备, 降雨均匀度大于 80%, 降雨高度为 16 m, 可以满足所有的雨滴达到终点速度。试验土槽长 8 m, 宽 2 m。每次试验前按照试验设计, 用 PVC 板分隔成两个 1 m 宽和不同坡长

(1~8 m) 的试验小区。试验用土为陕北安塞耕层土(黄绵土), 所有试验土样自然风干并过 10 mm 筛。试验土槽底层装填 10 cm 沙子, 并铺上透水纱布, 以保证良好的透水性, 然后在沙层上填 50 cm 的黄土。填土时采用分层装土, 每次装土深度 5 cm, 使下垫面土壤条件的变异性达到最小。50 cm 的填土土层分为耕层和犁底层, 其中耕层深度为 20 cm, 土壤容重控制在 1.05~1.10 g/cm³ 左右; 犁底层填土深度为 30 cm, 容重控制在 1.25~1.30 g/cm³ 左右。填土时采用边填充边压实的方法, 以减小边界效应的影响。试验前一天, 用 30 mm/h 降雨强度进行前期降雨, 至坡面出现产流为止, 前期降雨的目的是保证每次试验下垫面地表状况均一。试验设计包括 8 个坡长: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 和 8 m; 3 种降雨强度: 50, 75 和 100 mm/h; 降雨历时约 30 min; 地面坡度为 15° (表 1)。为了确保降雨均匀度和降雨强度达到试验要求, 每次试验前后均对降雨强度进行 2 次率定, 2 次率定误差不超过 5%。试验开始后, 当试验土槽产流时, 每隔 2 min 全部采集土槽的 15 个径流泥沙样, 并用秒表测定径流泥沙采集时间。降雨试验结束后, 量得每一个径流泥沙样的体积, 并用烘干法求得径流含沙量和侵蚀产沙量。

表 1 试验设计

雨强	坡长/ m	试验场次	雨强	坡长/ m	试验场次	雨强	坡长/ m	试验场次
50 mm/h	1	8	75 mm/h	1	9	100 mm/h	1	14
	2	11		2	4		2	21
	3	3		3	18		3	2
	4	19		4	12		4	7
	5	5		5	1		5	17
	6	24		6	22		6	13
	7	15		7	16		7	10
	8	20		8	6		8	23

注: 每个试验处理重复 2 次, 试验设计遵循随机化原理。

2 试验结果与分析

2.1 坡长对坡面径流的影响

模拟降雨实测径流量表明(图 1), 在 50, 75 和 100 mm/h 降雨强度下, 坡面径流量与坡长之间都表现了很好的正相关。在坡度为 15° 和降雨强度为 50 和 75 mm/h 雨强时, 径流量随坡长的增加幅度基本相同的。而在降雨强度为 100 mm/h 下, 当坡长小于 5 m 时, 径流量随坡长的增加幅度较小; 而当坡长增加到 5 m 时, 径流量随坡长变化增加的幅度明显增

加。这说明在大雨强下, 当达到一定坡长时, 上坡的汇水改变了下坡的径流过程。从图 1 还可以看出, 在坡长小于 2 m 时, 3 种雨强下径流量增加幅度基本相同, 说明在小坡长时, 雨强对径流量随坡长变化不甚敏感; 而当坡长大于 2 m 时, 径流量随坡长的增加幅度随雨强的增加而显著增大, 表明在坡长较长时, 径流量随坡长的变化显然受降雨强度制约。

2.2 坡长与坡面总侵蚀产沙量的关系

将模拟降雨试验得到的坡面侵蚀量和径流含沙浓度数据点绘于图 2 和图 3, 可以清楚看出, 在坡度

为 15° 和降雨强度为 50 mm/h 时,坡面总侵蚀量随坡长增加而呈明显增加的趋势,侵蚀产沙量从坡长为 1 m 时的 3.9 g/min 增加到坡长为 8 m 时的 510.0 g/min ;径流含沙浓度也随坡长的增加而增加,从坡长为 1 m 时的 4.2 kg/m^3 增加到坡长为 8 m 时 98.7 kg/m^3 。这是因为随坡长增加,径流量增大,径流的能量增加,侵蚀动力就增强,因此坡面侵蚀量增加。在坡度为 15° 时和降雨强度为 75 和 100 mm/h 时,侵蚀量随坡长变化呈波状增加的趋势。坡长由 1 m 变化为 2 m 时,坡面侵蚀产沙量分别从 13.2 g/min 减少到 5.0 g/min 和从 30.2 g/min 减少到 5.9 g/min ,说明在短坡长时,上方汇入的水流增加了径流的侵蚀能力和输移能力,但随径流量的增加,径流深增加削弱了雨滴的打击作用,上方汇入的水流能量不足于消耗搬运其所挟带的泥沙,因而侵蚀量减少。

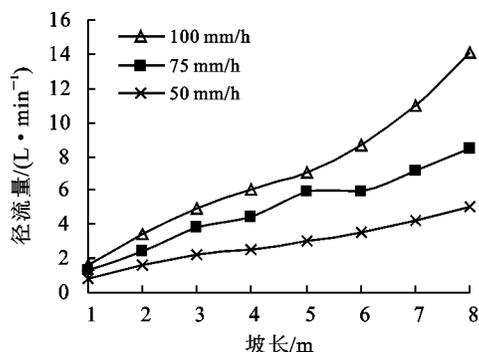


图1 坡长对径流量的影响

当坡长超过 2 m 时,坡面侵蚀量又随坡长的增加呈急剧性的增加趋势。这是因为随着坡长的增加,径流量增加,坡上方汇流使坡下方的侵蚀能量增加,从而促进了坡下方的侵蚀作用。当坡长增加到 4 m 时,侵蚀量和径流含沙浓度都达到第一个峰值,坡面侵蚀量分别达到 1832.0 和 1878.1 g/min ,径流含沙浓度也分别达到 409.2 和 308.1 kg/m^3 。此后侵蚀量出现随坡长增加而减少的趋势,这是因为随着坡长的增加,坡下方在接受上坡汇流的同时,需要消耗大量的能量用于搬运上方汇流中挟带的泥沙,当达到一定的含沙浓度时,坡面径流所有的侵蚀能量不足以抵消搬运上方来沙所消耗的能量,使侵蚀量减少,径流含沙浓度也随之降低。在 75 和 100 mm/h 的雨强时,当坡长为 5 m 时,坡面侵蚀量和径流含沙浓度都出现第二个谷值,坡面侵蚀量分别为 228.7 和 1236.9 g/min ,径流含沙浓度为别为 38.2 和 165.6 kg/m^3 。随后坡面侵蚀量又随坡长的增加而急剧增加,达到一定坡长时,侵蚀量和径流含沙浓度又将出现第二个峰值。

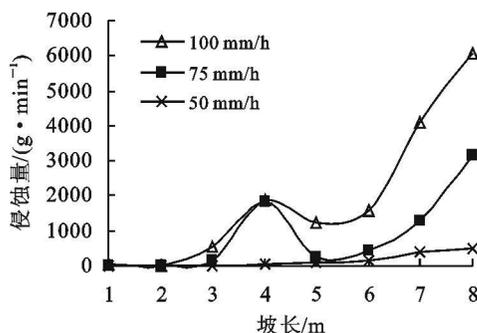


图2 坡长对侵蚀量的影响

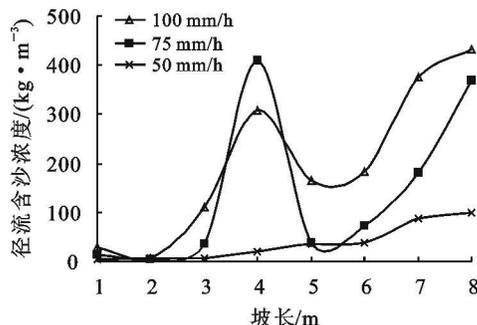


图3 坡长对径流含沙浓度的影响

2.3 坡长对坡面侵蚀—搬运过程的影响

2.3.1 坡长与单位面积输沙率的关系分析

将实测到的侵蚀量换算成单位面积输沙率。结果发现,在坡度为 15° 和降雨强度为 50 mm/h 时,单位面积输沙率随坡长增加而增加,在坡长小于 3 m 时单位面积输沙率随坡长增加的增幅较少,当坡长由 1 m 增加到 3 m 时,单位面积输沙率由 $3.9\text{ g}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 变化到 $5.6\text{ g}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$;而当坡长大于 3 m 时,单位面积输沙率随坡长的增加呈大幅度增加的趋势。这说明在坡度为 15° 和降雨强度为 50 mm/h 时,坡上方汇水挟带的泥沙被全部搬运,且坡上方汇水在坡下方引起了净侵蚀产沙量。当降雨强度为 75 和 100 mm/h 时,坡长由 1 m 增加到 2 m 时,单位面积输沙率减小,这说明上坡的来沙未被全部搬运,且在坡下方发生沉积。而当坡长大于 2 m 时,单位面积输沙率急速增加,并在坡长为 4 m 时达到一个峰值,分别为 458.0 和 $469.5\text{ g}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$,这说明当坡长增加时,上方汇流具有较强的侵蚀分散能力,不仅完全搬运上方的产沙量,还在坡面下方引起了大量的净侵蚀量。当坡长由 4 m 增加到 5 m 时,单位面积输沙率急剧减小,又出现了一个谷值,分别为 45.7 和 $247.4\text{ g}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 。当坡长增加到 5 m 之后,单位面积输沙率又开始增加。

2.3.2 坡长对坡面侵蚀—搬运过程的影响 由表 2 可以看出,在坡度为 15° 和降雨强度为 50 mm/h 时,随坡长的增加,上方汇流都在坡下方产生了净侵蚀量,且净侵蚀量都大于坡长为 1 m 时的侵蚀产沙量 (3.9 g/min),这说明在坡度为 15° 和降雨强度为 50 mm/h 时,随着坡长的增加,整个坡面上各单位坡段皆以侵蚀—搬运为主。在坡度为 15° 时,降雨强度为 75 和 100 mm/h 时,坡长由 1 m 增加到 2 m 和由 4 m 增加到 5 m 时,上方汇流不仅不在坡下方产生净侵蚀量,而且由于水流能量用于消耗搬运上方汇流所挟

带的泥沙,而使坡下方侵蚀量减少,在 $1-2 \text{ m}$ 和 $4-5 \text{ m}$ 坡段坡面侵蚀现象以侵蚀—沉积过程为主。而在其余坡段,随坡长的增加,上方汇流都在坡下方产生了净侵蚀量,这些坡段坡面侵蚀现象以侵蚀—搬运过程占主导作用。这说明在坡度为 15° 和降雨强度为 75 和 100 mm/h 时,随着坡长的增加,反复出现侵蚀—沉积占主导作用或侵蚀—搬运占主导作用的侵蚀现象。由以上分析可知,坡长对坡面侵蚀—搬运过程起着很大的作用,并在很大程度上受降雨强度和下垫面性质等因素综合作用的影响。

表 2 增加单位坡长引起的净侵蚀量

雨强	坡段/ m	增加单位		雨强	坡段/ m	增加单位		雨强	坡段/ m	增加单位	
		坡长的净 侵蚀量/ ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	土壤侵蚀 现象			坡长的净 侵蚀量/ ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	土壤侵蚀 现象			坡长的净 侵蚀量/ ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	土壤侵蚀 现象
50 mm/h	0—1	3.9	侵蚀—搬运	75 mm/h	0—1	17.3	侵蚀—搬运	100 mm/h	0—1	48.9	侵蚀—搬运
	1—2	6.3	侵蚀—搬运		1—2	- 5.3	侵蚀—沉积		1—2	- 29.1	侵蚀—沉积
	2—3	6.7	侵蚀—搬运		2—3	128.2	侵蚀—搬运		2—3	543.4	侵蚀—搬运
	3—4	34.4	侵蚀—搬运		3—4	1 691.7	侵蚀—搬运		3—4	1 314.9	侵蚀—搬运
	4—5	56.6	侵蚀—搬运		4—5	- 1 603.3	侵蚀—沉积		4—5	- 641.2	侵蚀—沉积
	5—6	26.2	侵蚀—搬运		5—6	213.2	侵蚀—搬运		5—6	343.6	侵蚀—搬运
	6—7	250.6	侵蚀—搬运		6—7	839.7	侵蚀—搬运		6—7	2 534.8	侵蚀—搬运
	7—8	125.3	侵蚀—搬运		7—8	1 852.1	侵蚀—搬运		7—8	1 946.5	侵蚀—搬运

3 结论

本文利用模拟降雨试验,研究了 50 、 75 和 100 mm/h 的降雨强度下 15° 坡面坡长对坡面侵蚀—搬运过程的影响。

(1) 坡长是影响坡面径流量的重要因素,且受降雨强度的制约。在 50 和 75 mm/h 降雨强度时,坡面径流量随单位坡长的增加呈现均匀的增加现象;而 100 mm/h 降雨强度下时,当坡长小于 5 m 时,径流量随坡长增加的幅度较小;而当坡长增加到 5 m 时,径流量随坡长变化增加的幅度明显增加,坡长愈长,径流量随坡长变化的幅度受雨强的影响越明显。

(2) 坡长对坡面侵蚀产沙量具有重要作用,在坡度为 15° 和降雨强度为 50 mm/h 时,坡面总侵蚀量随坡长增加而呈明显增加的趋势,在坡度为 15° 和降雨强度为 75 和 100 mm/h 时,坡面侵蚀量随坡长的变化呈现波状的强弱交替变化,在一定的坡长范围内坡面侵蚀量出现峰值和谷值交替现象。

(3) 随着坡长的增加,单位面积输沙率呈强弱交替变化;坡面侵蚀现象也呈以侵蚀—搬运过程为主与以侵蚀—沉积过程为主的交替现象。

[参 考 文 献]

- [1] Cook H L. The nature and controlling variables of the water erosion process[J]. Am Soc Agri, 1936, 39: 65—73.
- [2] 陈永宗,景可,蔡强国. 黄土高原现代侵蚀与治理[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [3] Laws J O, Parsons D A. The relationship of raindrop size to intensity[J]. AM, Geophys, Unino, 1943, 24: 452—460.
- [4] Zingg A W. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff [J]. Agricultural Engineering, 1940, 21(2): 59—64.
- [5] Wischmerier H H, Smith D D, Uhalnd R E. Evaluation of factors in the erosion equation[J]. Agriculture Engineering, 1958, 39(8): 458—462.
- [6] Langbein W B, Suchumm S A. Yield of Sediment in Relation to Mean Precipitation [J]. Trans, AM, Geophys Union, 1958, 39: 230—236.
- [7] 罗来兴. 甘肃华亭粮食沟坡侵蚀量的野外观测及其初步分析结果[J]. 地理学资料, 1958(2): 111—118.
- [8] 郑粉莉,唐克丽. 坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究[J]. 土壤学报, 1989, 26(2): 109—116.
- [9] 蔡强国. 坡长在坡面侵蚀产沙过程中的作用[J]. 泥沙研究, 1989(4): 84—91.