

模拟降雨条件下坡面水流流速与径流输出特征研究^{*}

张志玲¹, 范昊明², 郭成久², 武敏², 李洪丽², 韩英³

(1. 辽宁工程技术大学 资源与环境学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110161; 3. 中国科学院 沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

摘 要:利用室内人工模拟降雨试验,研究不同坡度径流小区的水流流速与径流输出特征间的关系。研究结果表明:定坡长土槽坡度变化为 5~20°时,水流流速随着坡面坡度的增加呈递增趋势;同时,同一坡度下坡面水流流速随时间的变化大体上是增加的过程;在模拟降雨条件下,30 min 内坡面水流速度的变化趋势分为 3 个阶段:降雨径流产生初期,坡面微形态的形成阶段和侵蚀沟形成阶段。在 25°坡面上,这 3 个阶段的界限不明显。另外,得出了径流量输出特征与水流速度有着密切的幂函数相关关系,且 5°,10°,15°,20°坡面流速与径流量的相关系数在 0.9 左右,但 25°坡面的相关系数较小。根据方差得出,5~25°坡面流速与径流量关系显著,坡度越大,流速对径流量的影响越显著,并分析出 20~25°是坡地土壤侵蚀的临界坡度。

关键词:模拟降雨;坡度;流速;径流量;临界坡度

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2008)06-0032-03

Study on the Relationship Between Flow Velocity of Sloping Face and Runoff Characteristic Under the Simulated Rainfall

ZHANG Zhi-ling¹, FAN Hao-ming², GUO Cheng-jiu², WU Min², LI Hong-li², HAN Ying³

(1. Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China; 2. College of Water Resources, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110161, China; 3. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China)

Abstract: The relationship between flow velocity of sloping face and runoff characteristic was studied under the simulated rainfall in this paper. The results indicated that: when the slope of the fixed long plot ranged from 5° to 20°, the flow velocity was increased along with the slope. Meanwhile, the flow velocity was increased with time at the same slope. The trend of flow velocity can be divided into three phases: the initial stage of runoff from precipitation; the stage of minute form on the slope face; the stage of rills came basically into shape. While the slope gradient was 25°, the demarcation of three stages was unclear. The close relationship between flow velocity of sloping face and runoff characteristic can be illustrated by power function $y = ax^b$ ($0 < b < 1$), and the correlation coefficient was around 0.9 when the slope ranges from 5° to 20°. According to the square, the relationship between flow velocity of sloping face and runoff is notable. The slope is bigger, and the velocity of flow was notable, and 20~25° is critical slope of hillside field's soil erosion.

Key words: simulated rainfall; slope gradient; flow velocity; the amount of rainfall; critical slope

土壤的加速侵蚀已成为全球性环境灾害之一,严重威胁着农业的发展和人类的生存,它既造成土地退化,同时又是水体非点源污染的重要原因^[1-3]。我国是世界上土壤侵蚀最严重的国家之一,其中有关土壤侵蚀机理的研究是目前主要的研究前沿之一。土壤水蚀主要是由于径流冲刷所产生的,坡面流速是计算坡面径流侵蚀动力的重要参数,降雨产生的径流流速直接影响到水流携带泥沙的能力。对坡面流流速进行精细的研究,是建立侵蚀过程模型的基础。夏卫生等^[4]

对冲刷条件下坡面水流速度与侵蚀产沙进行研究发现,水流速度是影响坡面产沙的主要原因,在低坡度时,细沟发育较慢,产沙量较少,坡度在 10~20°产沙量相差不大,到 25°时的产沙量反而比 20°的还少。

靳长兴^[5]研究了细沟和沟间侵蚀与流速的关系,得到了坡面流的流速方程式。本研究在人工降雨条件下用高锰酸钾染色剂法结合使用流速仪测量坡面流流速,并对不同坡度条件下坡面薄层水流速度对径流输出结果进行分析。

^{*} 收稿日期:2008-04-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40601054);辽宁省教育厅高等学校科学研究青年基金资助项目(05L403)

作者简介:张志玲(1983-),女,辽宁葫芦岛人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀规律及其治理方面的研究。E-mail: ling1983304@163.com

通信作者:范昊明(1972-),男,吉林白山人,博士,主要从事流域侵蚀、产沙与水土保持规划方面的研究。E-mail: fanhaoming@163.com

1 材料与方法

1.1 试验设备

试验在沈阳农业大学水利学院综合试验基地的人工模拟降雨试验大厅内进行,降雨装置为下喷式,主要由两部分组成:下喷式模拟降雨装置和双土槽径流试验小区。本装置降雨强度可在 20~90 mm/h 之间调节,降雨均匀度达到 80% 以上,喷头可覆盖的降雨面积为 5 m×5 m,直立管道高 9.5 m,向下的喷头连接于水平延伸管上,水平延伸管长 2.0 m,其离试验土槽顶端的高度为 7.8 m,降雨高度能够满足试验要求,

表 1 试验土壤的粒径组成

粒径/mm	>2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.075	<0.075
百分比/%	0.4	1.3	3.4	7.3	26.7	14.8	46.1

装土前,先在槽底垫 20 cm 厚的潮棕壤,之后采用分层装土,每次填土深度 5 cm,并适当压实,将土分 4 次均匀装入土槽,填土厚度共 20 cm,加上 20 cm 厚的底土,土层总厚度达 40 cm。控制土壤容重在 1.30 g/cm³ 左右,保持土壤前期含水量在 15% 左右,以减少对试验带来的影响。

1.1.2 降雨试验过程

试验径流小区坡型为直坡形,坡度采用 5°、10°、15°、20°、25° 坡面。小区长度均为 3 m,宽度 1.5 m。试验采用雨强 1.05 mm/min。降雨产生径流后开始记录,降雨历时 30 min。采用高锰酸钾染色剂法结合使用流速仪测量坡面流速,记录水流流过固定坡长的时间,换算成坡面流速。每隔 1 min 用烧杯收集径流量。

2 结果与分析

2.1 坡度对流速的影响

由降雨过程中的观测记录和图 1 不同坡度下水流速度随时间的变化所示,在 5°、10°、15°、20° 坡面,随着时间推移,数值总体呈上升趋势,在开始产生径流的前 10 min,不同坡面的流速在缓慢增加,并且同时间段的流速值相差不大,但在不同时间段出现了突减趋势,在 22、20、18、14 min 时达到了流速值的凹点,之后又继续增加。分析产生此种现象的原因,可以把 30 min 流速值分为 3 个变化阶段。

第一个阶段,降雨径流产生初期,5°、10°、15°、20° 坡面径流流速在前 10 min 都处于逐渐增加的状态。径流产生初期,坡面比较平整,水流阻力较小,径流含沙量很小,坡面径流用于输送泥沙所损耗的能量较少,因此,水流流速在坡面上逐渐递增。

第二个阶段,坡面微形态的形成阶段,径流流速突然减小,出现凹点,此时间段较短。第二阶段在 5°、10°、15°、20° 坡面产生的标志性时间分别为 22、20、18、14 min,可见随着坡度的增大,第二阶段发生的时间越来越提前。此阶段主要出现在侵蚀沟出现之前,当径流侵蚀力超过土壤的抗蚀能力时,坡面开始出现一系列间距大致相等的跌坎,跌坎的出现使得坡面径流流程增加,阻力增大,径流流速减小;同时,跌坎进一步发育成断续细沟沟头,强烈的溯源侵蚀和随之而来的沟壁坍塌使得径流含沙量迅速增大,减缓了径流的动能,使得径流流速迅速降低。根据流速凹点产生的时间,可辨别

雨滴终点速度大小接近自然降雨速度。双土槽径流试验小区,长为 3 m(包括出口汇流段 0.18 m)、宽 1.5 m、高 0.8 m,模型底部留有直径 5 mm 小孔,用以排出雨水。小区的坡度可调:在 0~30° 之间可任意选取,通过升降开关进行控制。

1.2 试验方法

1.2.1 土壤准备

试验用土取自沈阳市东陵区表层 30 cm 的潮棕壤,粒径组成如表 1。从野外运回的土壤经风干一周后,过 10 mm 孔径的筛网去除石块等杂质并混合均匀,备试验所用。

即将产生细沟侵蚀的时间。

第三个阶段,侵蚀沟形成阶段,径流流速逐渐增加。由于侵蚀沟形成,坡面水流会很快汇集以股流的形式向下流动,径流含沙量和沿程阻力也将减小,因此,坡面径流流速也开始增加。

25° 坡面这三个阶段的界限不明显,并且随时间变化坡面流速有很大的波动性和无规律性,在径流产生初始阶段,流速增加迅速,10~16 min 时,坡面流速趋于稳定,流速达到 0.25 m/min 左右,18~26 min 流速减少到 0.2 m/min 左右,随之,又出现了增加的趋势。

另外,随着坡面坡度的增加,水流流速呈递增趋势,坡度越大,平均流速越大。

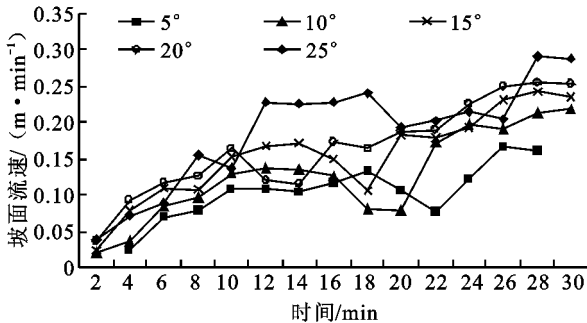


图 1 不同坡度下水流速度随时间的变化

2.2 坡面流速与径流输出的关系

对不同坡度的坡面水流流速和对应时刻的径流量数据采用直线方程、指数方程、幂函数方程和对数方程进行回归分析,研究不同坡度下,坡面水流流速与径流量之间的关系,并选用回归相关系数最高的回归模型来拟合两者的关系。

根据回归分析,发现流速与径流量之间用幂函数 $y = ax^b$ 的线性方程描述效果比较好,并得到 5°、10°、15°、20°、25° 的幂函数回归方程,坡度为 5°、10°、15°、20° 的幂函数回归方程中存在 $0 < b < 1$ 的函数规律,且坡面流速与径流量的相关系数达到 0.9 左右,其中 10° 坡面的相关系数达到 0.989 3,说明流速和径流量之间用幂函数拟合非常好。随着坡度的增大,水流流速也随之增大,径流具有更大的能量,可见水流流速是径流量的函数,由此用简单的幂函数关系可以准确地模拟坡面薄层水流的平均流速。5°、10°、15°、20° 坡面流速与

径流量之间存在明显的相关关系,但 25° 坡面的相关系数比较小,流速与径流量的相关系数仅有 0.524 6。另外,对不同坡度下的坡面流速与径流量在 0.05 水平上进行方差分析,坡面坡度 5~25° 的 $F \gg F_{0.05} = 4.196 0$,且 F 值随坡度增加大体增大。25° 坡面 F 值达到了 121.279 6,可见坡面流速与径流量关系显著,坡度越大,流速对径流量影响越显著,但在 25° 坡面上流速与径流间已不遵守幂函数关系。

表 2 不同坡度下流速(y)与径流量(x)的回归分析

坡度	回归方程	相关系数	F
5°	$y = 2931.9 x^{1.5068}$	$R^2 = 0.8934$	58.1156
10°	$y = 1385.4 x^{1.0042}$	$R^2 = 0.9893$	65.3645
15°	$y = 1270.1 x^{1.0934}$	$R^2 = 0.9006$	62.1001
20°	$y = 1453.0 x^{1.2494}$	$R^2 = 0.9045$	65.1112
25°	$y = 323.16 x^{0.1415}$	$R^2 = 0.5246$	121.2796

2.3 坡面临界坡度的分析

由 2.1 所知,在 30 min 模拟降雨时间内,把 5°,10°,15°,20° 坡面流速分成 3 个阶段。概括起来,这 3 个阶段是坡面下垫面的形态变化过程,分别为:坡面较平整阶段;坡面微形态的形成阶段;侵蚀沟形成阶段。可见对于 5°,10°,15°,20° 坡面下垫面的形态变化影响了流速和径流量,致使流速与流量间存在密切的相关关系,但当坡度达到 25° 时,由图 1 所示,水流流速随时间的变化已与 5°,10°,15°,20° 坡面完全不同,25° 坡面已打破了原有的水流流速和流量原有的遵守幂函数相关关系(表 2),水流的携沙能力也随时间发生了变化,如图 2 所示,5°,10°,15°,20° 坡面的泥沙输出量随时间递增,25° 坡面的泥沙输出量随时间存在递减的趋势,由于水流的携沙能力发生变化,致使 25° 坡面土壤侵蚀的发生发展过程发生了变化。因此,本试验研究表明,20~25° 是坡地土壤侵蚀的临界坡度。根据靳长兴等^[5]对坡面土壤侵蚀临界坡度问题的研究,流速与单宽流量、坡度之间存在着密切的关系;胡世雄等^[6]从动能原理入手,推导出坡面侵蚀的临界坡度为 22~26°。本试验在分析径流与流速间关系时,得出 20~25° 是坡地土壤侵蚀的临界坡度。可以看出,本实验结果与胡世雄等人推导的结论基本一致。

3 结论

(1) 通过模拟降雨条件下坡面水流速度、径流输出量的测量和分析,可以了解水流流速与坡度有密切的联系。随着坡面坡度的增加,水流流速呈递增趋势。同一坡度下坡面水流流速随着时间推移,总体上呈上升趋势。

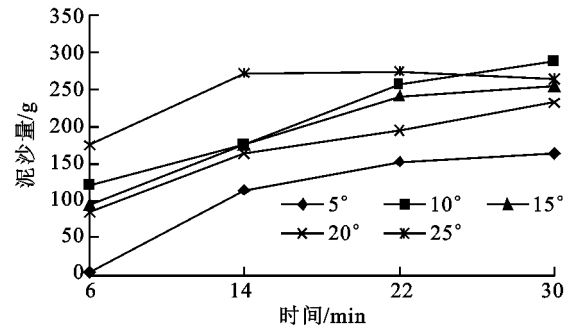


图 2 不同坡度下泥沙输出量随时间的变化

(2) 在模拟降雨条件下 30 min 内坡面水流速度的变化趋势分为 3 个阶段:第一阶段是降雨径流产生初期,坡面的水流流速呈现缓慢递增的趋势;第二个阶段,坡面微形态的形成阶段,径流流速突然减小,此时间段较短。第二阶段发生的时间随着坡度的增加越来越提前;第三个阶段,侵蚀沟形成阶段,径流流速逐渐增加。5°,10°,15°,20° 坡面这 3 个阶段较为明显,25° 坡面这 3 个阶段的界限不明显。

(3) 径流量的输出特征与水流速度有着密切的关系,对数据的回归分析表明,流速与径流量之间用幂函数 $y = ax^b$ ($0 < b < 1$) 的线性方程描述效果比较好,且 5°,10°,15°,20° 坡面流速与径流量的相关系数在 0.9 左右,说明 5°,10°,15°,20° 坡面流速与径流量之间存在明显的相关关系,但 25° 坡面的相关系数比较小。另外,坡面流速与径流量关系显著,坡度越大,流速对流量的影响越显著。

(4) 本试验在分析流速与径流量间关系时,得出 20~25° 是坡地土壤侵蚀的临界坡度。

参考文献:

- [1] 高佩玲. 流域土壤侵蚀测量系统研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 76-78.
- [2] 朱显谟. 黄土高原的形成与整治对策[J]. 水土保持通报, 1991, 11(1): 3-7.
- [3] 常茂德, 赵光耀, 田安民. 黄土高原小流域综合治理与发展农业经济[J]. 水土保持研究, 1996, 3(4): 88-92.
- [4] 夏卫生, 雷廷武, 张晴雯, 等. 冲刷条件下坡面水流速度与产沙关系研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(6): 876-880.
- [5] 靳长兴. 论坡面侵蚀的临界坡度[J]. 地理学报, 1995, 50(3): 234-239.
- [6] 胡世雄, 靳长兴. 坡面土壤侵蚀临界坡度问题的理论与实验研究[J]. 地理学报, 1999, 54(4): 347-356.