

# 降雨强度和坡度对粘黄土坡面片蚀的影响

盛贺伟<sup>1</sup>, 郑粉莉<sup>1</sup>, 蔡强国<sup>2</sup>, 孙莉英<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 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;  
2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环与地表过程重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 通过设计2种降雨强度(90, 120 mm/h)和4个地表坡度(10°, 15°, 20°, 25°)的模拟降雨试验, 研究了降雨强度和坡度对粘黄土坡面片蚀的影响。结果表明, 试验条件下当降雨量相同时, 降雨强度和坡度对径流量的影响不显著, 而对坡面片蚀量的影响非常显著。当降雨强度由90 mm/h增加到120 mm/h时, 在相同坡度条件下坡面片蚀量增加76.2%~128.0%; 当坡度由10°变化到25°时, 90 mm/h和120 mm/h两种降雨强度坡面片蚀量分别增加29.3%~72.1%和1.8%~75.4%。在降雨历时相同时, 降雨强度由90 mm/h增加到120 mm/h可使相同坡度条件下坡面径流量和片蚀量分别增加19.5%~26.0%和103.8%~162.2%; 当坡度由10°增加至25°时, 坡面片蚀量在90 mm/h和120 mm/h两种降雨强度下分别增加25.1%~67.4%和1.8%~75.0%。降雨强度对稳定阶段坡度侵蚀速率的相对贡献大于82%, 远大于坡度对稳定阶段侵蚀速率的相对贡献。

**关键词:** 降雨强度; 坡度; 片蚀; 稳定阶段侵蚀速率; 粘黄土

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)06-0013-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2016.06.003

## Effects of Rainfall Intensity and Slope Gradient on Sheet Erosion at the Clay Loess Hillslope

SHENG Hewei<sup>1</sup>, ZHENG Fenli<sup>1</sup>, CAI Qiangguo<sup>2</sup>, SUN Liying<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

**Abstract:** There are more literatures related to sheet erosion on the loess sloping and sand loess sloping, but there are little information on sheet erosion on the clay loess sloping. Therefore, the purpose of this study was to investigate effects of rainfall intensity and slope gradient on sheet erosion at the clay loess sloping by using simulated rainfall. The experiment treatment included two rainfall intensities (90 mm/h and 120 mm/h) and four slope gradients (10°, 15°, 20° and 25°). The results showed that under the same rainfall, effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff rate had no significant difference; while both of them on sheet erosion had significant difference. Under the same slope gradient, when rainfall intensity increased from 90 mm/h to 120 mm/h, the sheet erosion increased 76.2%—128.0%. As slope gradient changed from 10° to 25° under both of 90 and 120 mm/h, the sheet erosion increased 29.3%—72.1% and 1.8%—75.4%, respectively. Under the same rainfall duration, when rainfall intensity increased from 90 mm/h to 120 mm/h, the runoff rate and sheet erosion increased 19.5%—26.0% and 103.8%—162.2%, respectively. A slope gradient shifted from 10° to 25°, the sheet erosion under the both of 90 mm/h and 120 mm/h increased 25.1%—67.4% and 1.8%—75.0%, respectively. The relative contribution of rainfall intensity to stable-stage sheet erosion rate was above 82%, which was much higher than that of slope gradient.

**Keywords:** rainfall intensity; slope gradient; sheet erosion; stable-stage sheet erosion rate; clay loess soil

黄土高原地区土壤侵蚀严重, 片蚀作为坡面径流侵蚀的初始阶段, 阐明坡面片蚀过程可为认识和揭示坡面侵蚀过程, 建立坡面侵蚀过程模型提供重要科学依据重要, 也为坡面土壤侵蚀防治提供理论指导<sup>[1]</sup>。过去几十年我国黄土高原降雨强度和坡度对土壤片蚀的影响研究主要集中于黄绵土和砂黄土<sup>[1-3]</sup>。刘志等<sup>[2]</sup>指出黄绵土坡面的片

收稿日期: 2016-05-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(41471229, 41271304); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金项目(A314021402-1518)

第一作者: 盛贺伟(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: heweisheng@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 郑粉莉(1960—), 女, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀过程研究。E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

蚀量随坡度的增加先增大后减小,存在变化的临界坡度,片蚀量与降雨强度呈幂函数关系;刘俊娥等<sup>[1]</sup>认为砂黄土坡面的片蚀量随坡度的增加而增大,片蚀量与降雨强度呈指数函数关系。在国外,Singer 等<sup>[4]</sup>的研究结果表明,在 3%~50%(1.7°~26.6°)坡度范围内,粉粘壤土坡面片蚀与坡度呈二次方关系,而壤土坡面片蚀量与坡度呈三次方关系。上述研究结果表明,对于不同的试验土壤,降雨强度和坡度对片蚀的影响存在较大差异<sup>[5]</sup>,而我国粘黄土坡面片蚀特征的研究鲜有报道。因此,本文采用室内模拟降雨的方法,以黄土区粘黄土为试验材料,研究降雨强度和坡度对粘黄土坡面片蚀的影响,为构建黄土高原坡面片蚀侵蚀模型提供基础数据。

## 1 材料与方方法

### 1.1 试验装置与材料

人工模拟降雨试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室模拟降雨大厅进行,采用侧喷式自动模拟降雨系统。降雨系统将水喷射至空中,受空气阻力作用把水流破碎形成不同大小的雨滴,与天然降雨的雨滴比较相似<sup>[6]</sup>。试验所用土槽为 1 m(长)×0.5 m(宽)×0.4 m(深)的可调式坡度钢槽,土槽底部均匀分布 4×4 个孔径为 1 cm 的排水孔,土槽坡度调节范围为 0~30°,此坡长下坡面均无细沟形成,土槽下端设有集流装置用于采集降雨过程中的径流泥沙样。

以杨凌(北纬 34°16'57",东经 108°04'52")地区的粘黄土为试验用土,采样时间为 2015 年 6 月。土样均取自农耕地表层(0—20 cm)。试验土壤样品的颗粒组成为:粘粒(<0.002 mm)含量 26.6%,粉粒(0.002~0.05 mm)含量 62.47%,砂粒(>0.05 mm)含量 9.47%,有机质(重铬酸钾外加热法<sup>[7]</sup>)含量 13.3 g/kg,土壤容重 1.13 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 试验设计

根据黄土高原侵蚀性暴雨标准<sup>[8]</sup>( $I_5 = 1.52$  mm/min),设计降雨强度为 90,120 mm/h,分别相当于  $I_5$  的 1 倍和 1.32 倍。为保证 2 种降雨强度下总降雨量的相同,对应 90,120 mm/h 降雨强度的降雨历时分别为 60,45 min;据中国科学院黄土高原综合科学考察队耕地坡度分级数据,设计坡度分别为 10°,15°,20°和 25°,基本代表了黄土丘陵区主要地表坡度。所有试验均重复 2 次。具体试验设计见表 1。

### 1.3 试验步骤

试验前将土样自然风干并过 10 mm 筛,除去杂草和石块。试验土槽填土时,在土槽底部铺设 5 cm 厚的细沙,以保证试验土槽具有良好的透水性。细沙层之上采用分层(每层 5 cm)填土的方式填充土槽,共填充 6 层,填土深度为 30 cm。填土之前控制土壤含水量在 10%左右,按设计填土容重(1.13 g/cm<sup>3</sup>)及实测土壤含水量计算每层应装填土质量。每层填土均采用边填充边压实的方式,并对各层装土表面做打毛处理,减少土层间不整合现象的影响,使下垫面土壤条件的变异性达到最小。装土结束后,用特制平尺对土壤表面进行刮平,形成试验前期大致相同的地表糙度。正式降雨前测定土壤表层 5 cm 质量含水量为(10.11±0.72)%。

表 1 试验设计

土壤	降雨强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	降雨量/ mm	降雨 历时/min	坡度/ (°)
粘黄土	90	90	60	10
				15
				20
				25
	120	90	45	10
				15
				20
				25

正式降雨开始后仔细观察坡面产流情况,记录初始产流时间,90 mm/h 降雨下前 5 个样品每 1 min 采样 1 次,接下来 10 个样品每 2 min 采样 1 次,剩下的样品每 3 min 采样 1 次,直至降雨历时达到 60 min;120 mm/h 降雨下前 9 个样品每 1 min 采样 1 次,剩下的样品每 2 min 采样 1 次,直至降雨历时达到 45 min。降雨结束后,称量接取样品的质量,同时将样品烘干后再称重计算含沙量。

## 2 结果与分析

### 2.1 降雨强度和坡度对坡面径流和侵蚀特征的影响

降雨量相同时各坡面径流量随坡度增加而增大,但除 90 mm/h 降雨强度和 25°坡面的径流量与 10°坡面径

流量有显著差异外,其他坡度的坡面径流量无显著差异(表 2)。在降雨历时(45 min)相同时,对于 90 mm/h 降雨强度,25°坡面的径流量与 10°坡面径流量有显著差异,而其他坡度的坡面径流量无显著差异。对于 120 mm/h 降雨强度,各坡度间的坡面径流量无显著差异,而降雨强度对坡面径流量的影响有明显差异,相同坡度下当降雨强度由 90 mm/h 增加到 120 mm/h,坡面径流量增加 19.5%~26.0%(表 3),且降雨强度对坡面径流量的影响随坡度的增加而增大,这与李桂芳等<sup>[9]</sup>的结论相一致。李裕元等<sup>[10]</sup>研究表明降雨强度的增加对坡面径流强度有显著影响,且随着降雨强度增加,土壤入渗率明显减弱,从而由降雨转化的地表径流量随之增加。

与坡面径流量相比,降雨强度和坡度对坡面片蚀量的影响有显著差异。降雨总量相同时,在相同坡度下降雨强度由 90 mm/h 增加到 120 mm/h,坡面片蚀量增加 76.2%~128.0%(表 2)。在降雨历时(45 min)相同时,相同坡度下降雨强度由 90 mm/h 增加到 120 mm/h,坡面片蚀量增加 103.8%~162.2%(表 3),与 Balacco<sup>[11]</sup>的结论相一致。其原因主要是在径流形成后,水流对土体的分离、搬运动力来源于雨滴的打击力和受其扰动的水流,降雨强度愈大则雨滴击溅地表启动的颗粒越多,且降雨强度愈大会增加雨滴的打击扰动,使坡面水流的紊动性增加,此外径流速率的增加也会剥蚀和输移更多的土壤颗粒。

表 2 降雨量相同时坡面径流量和片蚀量

降雨强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	降雨量/ mm	坡度/ (°)	径流量/ mm	片蚀量/ (g·m <sup>-2</sup> )
90	90	10	51.5±1.9a	357.1±3.9a
		15	53.8±0.2ab	461.8±1.1b
		20	54.7±1.4ab	533.9±5.4bc
		25	60.5±0.8b	614.5±2.8c
120	90	10	49.9±3.6a	798.5±4.7d
		15	51.6±0.8a	813.5±0.4d
		20	54.6±1.7ab	1032.7±5.6e
		25	55.8±2.4ab	1400.9±12.4f

注:同一列不同字母表示差异显著性( $P<0.05$ ),表中数据形式为均值±标准差。下同。

降雨总量相同时,在 90,120 mm/h 降雨强度下,坡度由 10°增加至 25°时,坡面片蚀量分别增加 29.3%~72.1%和 1.8%~75.4(表 2);在降雨历时(45 min)相同时,在 90,120 mm/h 降雨强度下,坡度由 10°增加至 25°时,坡面片蚀量分别增加 25.1%~67.4%和 1.8%~75%(表 3)。双因素方差分析表明,降雨强度与坡度的交互作用对片蚀量有极显著正向效应( $P<0.01$ ),与张会茹等<sup>[12]</sup>得出的降雨强度的增加会放大坡度效应的结论相同。降雨强度为 90 mm/h 时,坡面径流速率较小,径流所具有的能量较小,剥蚀土壤的能力较弱,片蚀量随坡度增加主要是坡度增加以及水分的消散使得土壤稳定性变差;降雨强度为 120 mm/h 时,坡面径流速率较大,径流紊动性增强且对坡面的剪切和剥蚀作用也增大。此时,具有更大侵蚀动能的径流对稳定性变差的土壤的剥蚀作用随着坡度的增加而放大,加剧产沙<sup>[13]</sup>。

表 3 45 min 降雨历时的坡面径流量和片蚀量

降雨强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	降雨 历时/min	坡度/ (°)	径流量/ mm	片蚀量/ (g·m <sup>-2</sup> )
90	45	10	41.1±2.1a	319.0±4.6a
		15	41.5±0.4ab	399.1±1.7b
		20	43.3±1.8ab	483.8±5.8c
		25	48.2±0.9bc	534.3±3.1c
120	45	10	49.9±3.6bcd	798.5±4.7d
		15	51.6±0.8cd	813.5±0.4d
		20	54.6±1.7cd	1032.7±5.6e
		25	55.8±2.4cd	1400.9±12.4f

## 2.2 降雨强度和坡度对坡面径流和侵蚀过程的影响

### 2.2.1 降雨强度和坡度对坡面径流过程的影响

不同降雨强度和坡度的径流速率变化规律基本一致(图 1),从开始产流后径流速率以较快的速率增大,产流 10~20 min 后趋于稳定,并一直持续到降雨结束,且稳定在某一径流速率值上下波动。降雨开始后降水入渗使土壤含水量增大,同时溅蚀颗粒堵塞土壤孔隙均使入渗速率降低,当入渗速率小于雨强时,降雨会迅速形成径流;随着降雨的继续进行,土壤入渗达到稳定后,大部分降雨

形成坡面径流,所以径流速率变化趋于稳定。

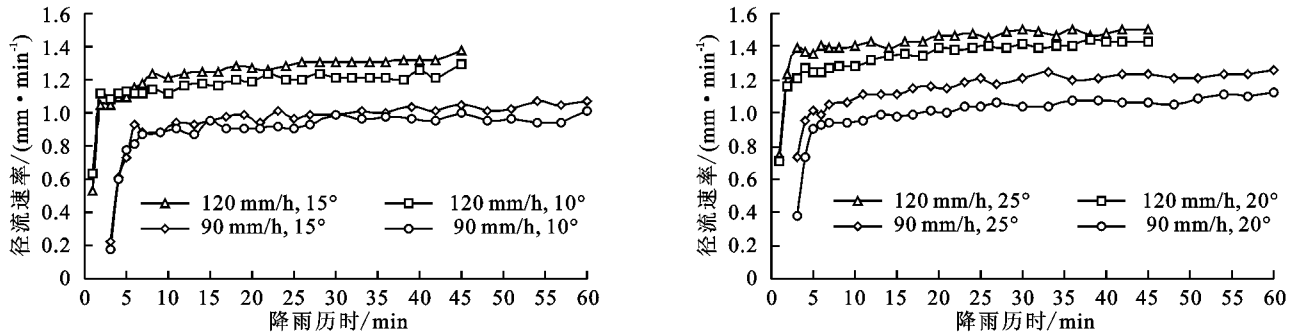


图 1 坡面径流速率随降雨历时的动态变化

120 mm/h 降雨强度下坡面产流时间较 90 mm/h 降雨强度下同坡度坡面提前 44~60 s; 90, 120 mm/h 降雨强度下, 不同坡度坡面的产流时间无显著差异, 与陈俊杰等<sup>[14]</sup>的结论相同。雨滴的击溅作用使细颗粒填充和堵塞土壤孔隙, 降低入渗<sup>[15]</sup>。随着降雨强度的增大, 雨滴的击溅作用增强, 降低土壤入渗速率, 缩短产流时间。

90 mm/h 降雨强度下, 坡面径流速率在降雨 20 min 以后达到稳定状态; 120 mm/h 降雨强度下, 坡面径流速率在降雨 10 min 以后达到稳定状态, 其达到稳定阶段径流速率的时间均大于刘俊娥等<sup>[1]</sup>的研究结果。其原因是可能是试验条件的差异引起<sup>[16]</sup>, 本研究未做前期降雨处理, 且坡面有较大粗糙度; 而刘俊娥等<sup>[1]</sup>的试验进行了前期降雨, 削弱了土壤含水量及前期地表糙率的影响。

降雨强度由 90 mm/h 增加到 120 mm/h, 坡面稳定阶段径流速率增加 20.4%~29.8%; 坡度由 10° 增加至 25° 时, 90, 120 mm/h 降雨强度坡面的稳定阶段径流速率分别增加 4.6~17.1% 和 5.0%~11.8%, 与 Fox 等<sup>[17]</sup>的结论相同。其原因是坡面水层压力随坡度的增加在垂直坡面方向大幅减少, 减弱入渗。此外坡度的增大利于坡面径流的形成和发展, 也会导致更多的降雨转化为径流<sup>[18]</sup>。

2.2.2 降雨强度和坡度对径流含沙量的影响 不同于前人研究片蚀过程中径流含沙量随降雨历时增加呈先上升后平稳的结论, 本试验中径流含沙量随降雨历时呈先下降后平稳(图 2)。试验地表处理方式的不同是造成此差异的重要原因。本试验研究中, 由于降雨试验前对坡面表土进行了翻松处理, 使地表存在大量分散的土壤颗粒, 降雨产流后坡面片流有充足的松散物质搬运, 从而使坡面产流初期径流含沙量较大。随着降雨过程的继续, 土壤孔隙被填充, 土壤不易冲刷, 此时侵蚀处于剥蚀限制状态<sup>[2,12,19]</sup>, 由于在降雨强度和径流强度均不变的情况下, 降雨和径流分散和搬运的侵蚀物质保持一定, 所以坡面径流含沙量也趋于稳定状态。降雨强度由 90 mm/h 增加到 120 mm/h, 坡面稳定阶段径流含沙量增加 139.2%~164.3%; 坡度由 10° 增加至 25° 时, 90, 120 mm/h 降雨强度坡面的稳定阶段径流含沙量分别增加 9.1%~70.5% 和 9.9%~88.5%(图 2)。

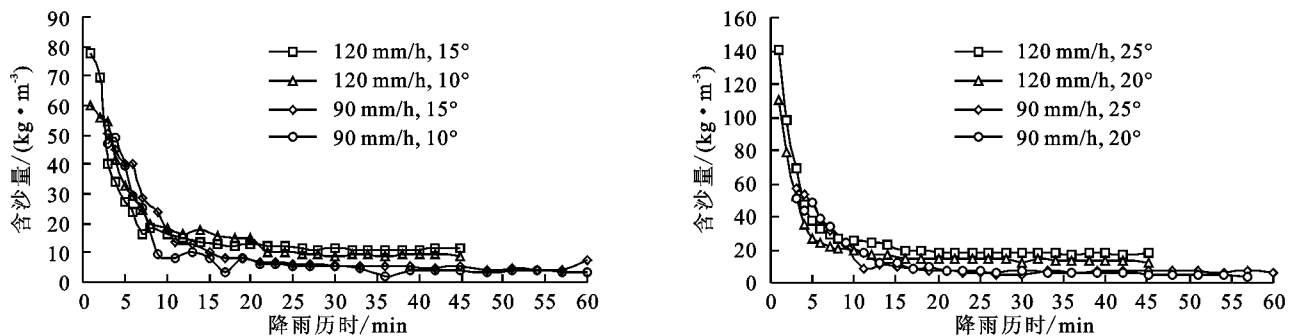


图 2 坡面径流含沙量随降雨历时的动态变化

### 2.3 降雨强度和坡度对坡面侵蚀速率的影响

坡面侵蚀速率随降雨历时的变化呈先增加后减少最后趋于稳定的变化趋势(图 3), Zhang 等<sup>[20]</sup>和 Zheng 等<sup>[21]</sup>也指出, 片蚀速率随着降雨历时的延长会趋于稳定。其主要原因是坡面径流形成初期, 坡面上有大量分散的土粒, 这些土粒在坡面薄层水流的搬运下, 出现坡面侵蚀速率的高峰; 此后, 随着降雨历时的延长, 土壤表面经雨滴打击形成较致密的临时结皮层, 增加了土壤抗侵蚀力, 使坡面侵蚀速率逐渐下降并趋于稳定。侵蚀速率在降雨初期急剧上升也说明侵蚀过程初期是以泥沙搬运为主导的阶段, 而后迅速减小说明侵蚀过程由泥沙搬运能力为主的阶段向以分散能力为主的阶段转变, 且 120 mm/h 降雨强度转变的时间早于 90 mm/h。

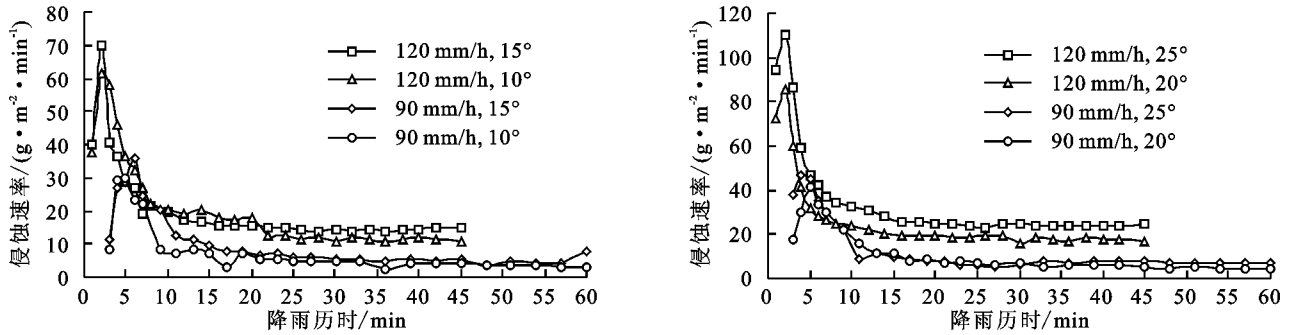


图 3 坡面侵蚀速率随降雨时的动态变化

当地面坡度由  $10^\circ$  增加至  $25^\circ$  时,在 90,120 mm/h 降雨强度下,坡面稳定阶段的侵蚀速率分别增加了 12.0~102.4% 和 12.5%~113.5%;降雨强度由 90 mm/h 增加到 120 mm/h,不同坡度条件下,坡面稳定阶段的侵蚀速率增加了 207.1%~243.4%。

为了区分降雨强度和坡度对坡面片蚀的贡献,以 90 mm/h 降雨强度,  $10^\circ$  坡度为基准,采用耿晓东等<sup>[13]</sup> 的研究方法评估了降雨强度和坡度对稳定阶段侵蚀速率的贡献(表 4)。从表 4 可以看出,雨强对坡面稳定阶段侵蚀速率的贡献大于 82%,与 Guy 等<sup>[22]</sup> 得出片蚀输沙中降雨强度作用占 85% 的结论相似。Kinnell<sup>[23]</sup> 也指出降雨引起的片蚀过程中泥沙的启动主要源于降雨击溅;程金花等<sup>[24]</sup> 研究表明溅蚀量与降雨强度呈指数关系;Fu 等<sup>[25]</sup> 在短坡(0.5 m)试验的结果表明溅蚀量占总片蚀量的很大部分。可见,短坡长坡面片蚀量主要取决于降雨强度。

此外,坡度对坡面稳定阶段侵蚀速率的贡献随坡度的增加而增大,而雨强对坡面稳定阶段侵蚀速率的贡献随着坡度的增加而减小(表 4)。这是因为随着坡度的增加,径流流速增大,对坡面土壤的剥蚀作用增强,从而导致坡度对坡面侵蚀速率的贡献相应增加。

表 4 坡度与雨强对稳定阶段侵蚀速率贡献率

坡度 $i/$ ( $^\circ$ )	90 mm/h	120 mm/h	总增量/ ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ )	坡度增量/ ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ )	雨强增量/ ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ )	坡度 贡献率/%	雨强 贡献率/%
	侵蚀速率 $e_i/$ ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ )	侵蚀速率 $E_i/$ ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ )					
10	3.7	11.2	7.6	0.0	7.6	0.0	100.0
15	4.6	14.3	10.6	0.9	9.7	8.5	91.6
20	5.0	17.2	13.6	1.4	12.2	10.0	90.0
25	7.4	24.0	20.3	3.8	16.6	18.4	81.6

### 3 结论

通过模拟降雨试验,研究了降雨强度和坡度对粘黄土坡面片蚀的影响,主要结论为:

(1) 试验条件下当降雨量相同时,降雨强度和坡度对径流量的影响不显著,当降雨强度由 90 mm/h 增加到 120 mm/h 时,在相同坡度条件下坡面片蚀量增加 76.2%~128.0%;当坡度由  $10^\circ$  变化到  $25^\circ$  时,对于 90,120 mm/h 降雨强度,片蚀量分别增加 29.3%~72.1% 和 1.8%~75.4%。当降雨历时相同时,降雨强度由 90 mm/h 增加到 120 mm/h 时,在相同坡度条件下坡面径流量增加 19.5%~26.0%,片蚀量增加 103.8%~162.2%;当坡度由  $10^\circ$  增加至  $25^\circ$  时,对于 90,120 mm/h 降雨强度,片蚀量分别增加 25.1%~67.4% 和 1.8%~75.4%。

(2) 90 mm/h 降雨强度下,坡面径流速率在降雨 20 min 以后达到稳定状态;而 120 mm/h 降雨强度坡面径流速率在降雨 10 min 以后达到稳定状态。降雨强度由 90 mm/h 增加到 120 mm/h,坡面稳定阶段径流速率增加 20.4%~29.8%;坡度由  $10^\circ$  增加至  $25^\circ$  时,90,120 mm/h 降雨强度下的坡面稳定阶段径流速率分别增加 4.6~17.1% 和 5.0%~11.8%。

(3) 坡面侵蚀速率随降雨历时的变化呈现先增加后减少最后趋于稳定的变化趋势。当地面坡度由  $10^\circ$  增加至  $25^\circ$  时,在 90,120 mm/h 降雨强度下,坡面稳定阶段侵蚀速率分别增加 12.0~102.4% 和 12.5%~113.5%;降雨强度由 90 mm/h 增加到 120 mm/h,不同坡度条件下,坡面稳定阶段的侵蚀速率增加了 207.1%~243.4%。

(4) 量化了降雨强度和坡度对坡面侵蚀速率的贡献,雨强对稳定阶段侵蚀速率的贡献率大于 82%;坡度对稳定阶段侵蚀速率的贡献率随坡度的增加而增大,而雨强对坡面稳定阶段侵蚀速率的贡献随着坡度的增加而减小。本文仅研究了降雨强度和坡度粘黄土坡面片蚀的影响,以后需要采用相同的研究方法,对比分析沙黄土、黄绵土和粘黄土坡面的片蚀特征。

## 参考文献:

- [1] 刘俊娥,王占礼,高素娟.黄土坡面片蚀过程试验研究[J].水土保持学报,2011,25(3):35-39.
- [2] 刘志,江忠善.降雨因素和坡度对片蚀影响的研究[J].水土保持通报,1994,14(6):19-22,61.
- [3] Liu J E,Wang Z L,Yang X M,et al. The impact of natural polymer derivatives on sheet erosion on experimental loess hill-slope[J]. Soil and Tillage Research,2014,139(2):23-27.
- [4] Singer M J,Blackard J. Slope angle-interrill soil loss relationships for slopes up to 50%[J]. Soil Science Society of America, 1982,46(6):1270-1273.
- [5] Kinnell P I A,Cummings D. Soil slope gradient interactions in erosion by rain-impacted flow[J]. Transactions of the Asae, 1993,36(2):381-387.
- [6] 张光辉,刘宝元,李平康.槽式人工模拟降雨机的工作原理与特性[J].水土保持通报,2007,27(6):56-60.
- [7] 刘光崧.土壤理化分析与剖面描述[M].北京:中国标准出版社,1996:7,32.
- [8] 周佩华,王占礼.黄土高原土壤侵蚀暴雨的研究[J].水土保持学报,1992,6(3):1-5.
- [9] 李桂芳,郑粉莉,卢嘉,等.降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J].农业机械学报,2015,46(4):147-154.
- [10] 李裕元,邵明安.降雨条件下坡地水分转化特征实验研究[J].水利学报,2004,35(4):48-53.
- [11] Balacco G. The interrill erosion for a sandy loam soil[J]. International Journal of Sediment Research,2013,28(3):329-337.
- [12] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):40-43.
- [13] 耿晓东,郑粉莉,刘力.降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J].泥沙研究,2010(6):48-53.
- [14] 陈俊杰,孙莉英,刘俊体,等.不同坡长与雨强条件下坡度对细沟侵蚀的影响[J].水土保持通报,2013,33(2):1-5.
- [15] 唐泽军,雷廷武,张晴雯,等.雨滴溅蚀和结皮效应对土壤侵蚀影响的试验研究[J].土壤学报,2004,41(4):632-635.
- [16] Agassi M,Bradford J. Methodologies for interrill soil erosion studies[J]. Soil and Tillage Research,1999,49(4):277-287.
- [17] Fox D M,Bryan R B,Price A G. The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions[J]. Geoderma, 1997,80(1/2):181-194.
- [18] 黄俊,吴普特,赵西宁.坡面生物调控措施对土壤水分入渗的影响[J].农业工程学报,2010,26(10):29-37.
- [19] Mahmoodabadi M,Sajjadi S A. Effects of rain intensity, slope gradient and particle size distribution on the relative contributions of splash and wash loads to rain-induced erosion[J]. Geomorphology,2016,253(1):159-167.
- [20] Zhang X C,Nearing M A,Miller W P,et al. Modeling interrill sediment delivery[J]. Soil Science Society of America,1998, 62(2):438-444.
- [21] Zheng F L, Huang C H, Norton L D. Vertical hydraulic gradient and run-on water and sediment effects on erosion processes and sediment regimes[J]. Soil Science Society of America Journal,2000,64(1):4-11.
- [22] Guy B T,Dickinson W T,Rudra R P. The roles of rainfall and runoff in the sediment transport capacity of interrill flow[J]. Transactions of the ASABE,1987,30(5):1378-1386.
- [23] Kinnell P I A. The impact of slope length on the discharge of sediment by rain impact induced saltation and suspension[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2009,34(10):1393-1407.
- [24] 程金花,秦越,张洪江,等.华北土石山区模拟降雨下土壤溅蚀研究[J].农业机械学报,2015,46(2):153-161.
- [25] Fu S H,Liu B Y,Liu H P,et al. The effect of slope on interrill erosion at short slopes[J]. Catena,2011,84(1):29-34.

