

野外模拟降雨条件下径流小区产流产沙试验研究

温永福^{1,2}, 高鹏^{2,3}, 穆兴民^{2,3}, 赵广举^{2,3}, 孙文义^{2,3}

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:降雨引起的侵蚀产沙,是全球性的严重环境问题之一,在我国黄土区表现尤为突出。降雨及其产生的径流是引起黄土高原土壤侵蚀的主要动力,开展黄土区降雨产流产沙过程研究可为土壤侵蚀过程模型研发奠定基础,为水土保持与生态建设提供科学依据。利用野外模拟降雨试验研究了不同坡度、土地利用类型和雨强下径流、侵蚀产沙规律及相关关系。结果表明:在降雨过程中,产流时间随坡度、雨强的增大而变短,裸耕地产流时间短于自然草地。径流量随产流历时增加而增大,且坡度、雨强越大其值越大。产流过程中侵蚀产沙量呈先陡增、再陡减、最后趋于稳定的现象;坡度、雨强越大产沙量的峰值越大,峰值出现时间也相应提前。自然草地侵蚀产沙量极少,草地起着重要的固沙作用。建立径流与产沙回归关系,产沙量与径流量呈二次多项式函数关系,揭示了降雨过程中产流产沙变化规律。

关键词:人工模拟降雨;径流小区;径流;泥沙

中图分类号:S157.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)01-0023-07

Experimental Study on Runoff and Sediment Yield in Runoff Plot Under Field Simulated Rainfall Condition

WEN Yongfu^{1,2}, Gaopeng^{2,3}, MU Xingmin^{2,3}, ZHAO Guangju^{2,3}, SUN Wenyi^{2,3}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess

Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water

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

Abstract: Rainfall and runoff are the main dynamic factors which cause soil erosion on the Loess Plateau. Research on processes of rainfall, runoff and sediment yield can serve as development of process-based mode of soil erosion, soil and water conservation, and ecology construction on the loess region. The rule of erosion sediment and runoff infiltration relation was studied under different site conditions using field simulated rainfall. The results show that the runoff time becomes shorter when the slope and rain intensity increase and the time of runoff occurrence in bare arable land is shorter than that of natural grassland in the rainfall process. The volume of runoff increases when the duration increases, besides, the greater slope and rainfall intensity are, the larger the value is. The sediment-carrying capacity of the runoff first steeply increased, and then decreased sharply, and finally stabilized. The greater the slope is, the greater the rainfall intensity is, and the more advanced peak appearance time is. The natural grassland plays an important role in stabilizing the soil because the sediment-carrying capacity is very tiny in the grassland. Establishing a regression relation between runoff and sediment shows that the sediment yield and runoff follows the quadratic polynomial function, which reveals the variation rule of runoff and sediment yield during rainfall process.

Keywords: artificial rainfall; runoff plot; runoff; sediment

降雨引起的侵蚀产沙,是全球性的严重环境问题之一,在我国黄土区表现尤为突出。我国黄土地区是全球黄土分布面积和厚度最大的区域,该区地表植被覆盖差,土壤抗侵蚀能力弱,地形破碎复杂,多以暴雨形式降落。坡度、降雨强度、土地利用类型是影响水土流失的三个主要因素,坡度通过制约降雨径流冲刷和土壤颗粒的稳定性引起径流、侵蚀泥沙的变化^[1-2]。降雨强度是侵蚀原动力的主要来源。从接触地表开始,降雨分别以雨滴击溅、产流冲刷等过程分别对侵蚀产生重要影响^[3-4]。植被能够改善土壤的理化特性,并影响坡面径流的形成和发展,改变其水力特性,从而影响侵蚀的发生^[5]。近年来,学者们对坡耕地降雨的产流产沙的模拟进行了大量的研究工作,研究内容主要是从水土保持、土壤侵蚀与生物措施的角度进行^[6-7]。周继^[8]侧重分析了降雨过程中,土壤中的养分,微生物的变化,以及降雨条件下,对不同坡面成分的影响。证明坡度和雨强较小时,坡度是导致土壤侵蚀的主导因素;当雨强增大到临界坡度时,雨强则成为了导致土壤侵蚀的主导因素。耿晓东等^[9]通过室内模拟人工降雨试验,研究了坡度和雨强对紫色土坡面侵蚀产沙过程的影响。结果表明:坡度和雨强对坡面产沙过程和侵蚀形态的演变起着重要的作用。焦菊英等^[10]通过选定黄土高原林地草地,对不同坡度和雨强下的坡面径流和侵蚀的研究,证明坡度和雨强两个因素均与林草的有效盖度是呈正比的。在黄土丘陵沟壑区引起黄土高原严重土壤侵蚀的暴雨,主要是历时在 30 min 以内的短历时暴雨。本试

验重点研究在短历时降雨条件下,探讨径流小区产流产沙随不同坡度、雨强、土地利用类型变化而变化的特征,为黄土高原地区产流产沙机理研究和建立水土保持措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

径流小区位于北洛河上游吴起县(107°32′40″—108°32′45″E,36°44′53″—37°19′28″N),地貌属黄土高原梁状丘陵沟壑区,海拔 1 233~1 809 m。吴起县属半干旱温带大陆性季风气候,春季干旱多风,夏季旱涝相间,秋季温凉湿润,冬季寒冷干燥,年平均气温 7.8℃,极端最高气温 37.1℃,极端最低气温-25.1℃。年平均降雨量 483.4 mm。最大降雨量 631.4 mm,年最小降雨量 270.0 mm,6—9 月份平均降雨总量为 322.2 mm,为年平均降雨量 71.8%。黄土性土类是研究流域的主要土壤类型,且以初育黄绵土分布最为广泛。

1.2 径流小区设定

人工模拟降雨试验小区选择坡度为 12°和 25°两种坡度以及自然草地和裸耕地两种不同土地利用类型,共 4 个。小区的立地条件见表 1。每个小区面积约 10 m²(长×宽=2.5 m×4 m),小区四周由长 100 cm,宽 30 cm,厚 0.2 cm 的铁皮围成,铁皮插入土层深度为 25 cm,以消除侧向入渗的影响。小区下方安放集流槽,在人工降雨期间用塑料桶收集小区内各时段的所有地面径流,除去其中的泥沙,即为小区在降雨期间的径流量。

表 1 试验小区立地条件

土地类型	规格/m	坡度/(°)	坡向	植被类型与盖度
自然草地	2.5×4	12°	北(阴面)	长芒草、狗尾草、针茅、冰草、铁杆蒿;盖度 85%
自然草地	2.5×4	25°	北(阴面)	长芒草、狗尾草、针茅、冰草、铁杆蒿;盖度 80%
裸耕地	2.5×4	12°	北(阴面)	裸耕地
裸耕地	2.5×4	25°	北(阴面)	裸耕地

1.3 模拟降雨装置及样品采集

本次人工模拟降雨试验是用折射式单向喷射^[11]。降雨装置的雨水降落高度大于 5 m。喷头出水口为活动孔板,可以更换,配合阀门调节工作压力,以获得需要的降雨强度。本次试验主要进行 30 min 雨强分别为 1.3 mm/min 和 1.72 mm/min 的模拟。

1.4 试验方法

试验于 2015 年 7—9 月在陕西省延安市吴起县选定的径流小区进行。试验方案见表 2。为保证雨强的均匀性和稳定性,试验开始前测定靠近径流小区外侧 0~0.5 m 土壤前期平均含水率为 21.6%,之后

将径流小区用塑料布遮盖,在径流小区四周用雨量筒对雨强进行率定,当雨强稳定后,迅速将塑料布揭开并开始计时。当径流小区坡面上的水流呈层流状态,并由上到下流至出水口时视为产流开始,记录产流时间,之后重新开始计时,试验设计时长 30 min,试验每隔 1 min 在出口处接一次径流泥沙样。试验结束后,将泥沙样静置 6 个小时后倒去上层清液,用烘干法(105°)将样品烘干后称量泥沙重量。为保证每次降雨之前径流小区 0~0.5 m 平均含水率相同,每个径流小区每隔 4 d 进行一次降雨,这样可以使径流小区有充足时间达到土壤前期含水率。

表 2 试验设计方案				
土地类型	规格/ (m×m)	坡度/ (°)	雨强/ (mm·min ⁻¹)	重复 次数
自然草地	2.5×4	12°	1.3	1
自然草地	2.5×4	25°	1.72	1
裸耕地	2.5×4	12°	1.3	1
裸耕地	2.5×4	25°	1.72	1

2 径流、产沙影响因子分析

2.1 径流影响因子分析

2.1.1 坡度对径流的影响 相同雨强情景下,坡度越大,产流量越大,产流时间越小。试验中产流时间见表 3,径流量时间变化曲线见图 1A,C,累计径流量时间变化曲线见图 1B,D。表 3 表明,在 1.3 mm/min 条件下,12°坡度产流时间 261 s,25°坡度产流时间 197 s;1.72 mm/min 条件下,12°坡度产流时间 191 s,25°坡度产流时间 125 s。25°坡度条件下每 1 min 产流量均高于 12°坡度(图 1A,C)。两种坡度条件下,每 1 min 产流量随着时间均呈先增加后平稳的趋势(图 1A,C)。主要因为在降雨初期土壤入渗量大于降水量,当下渗率达到稳渗速率后,产流率也趋

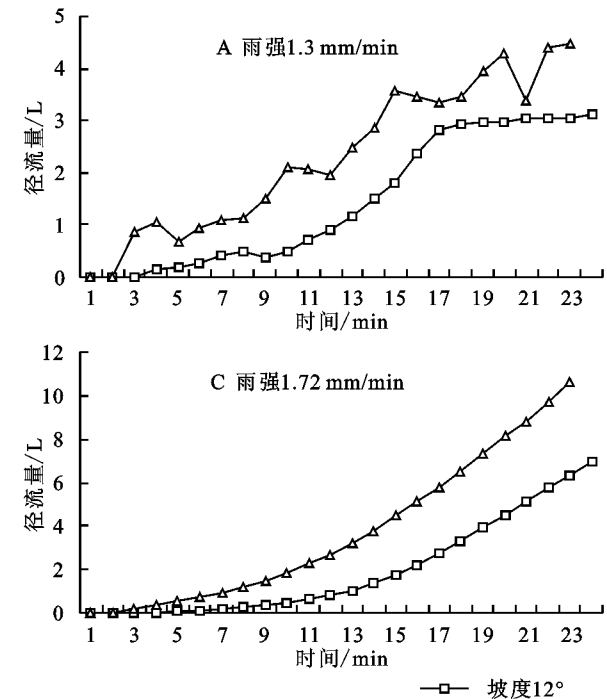


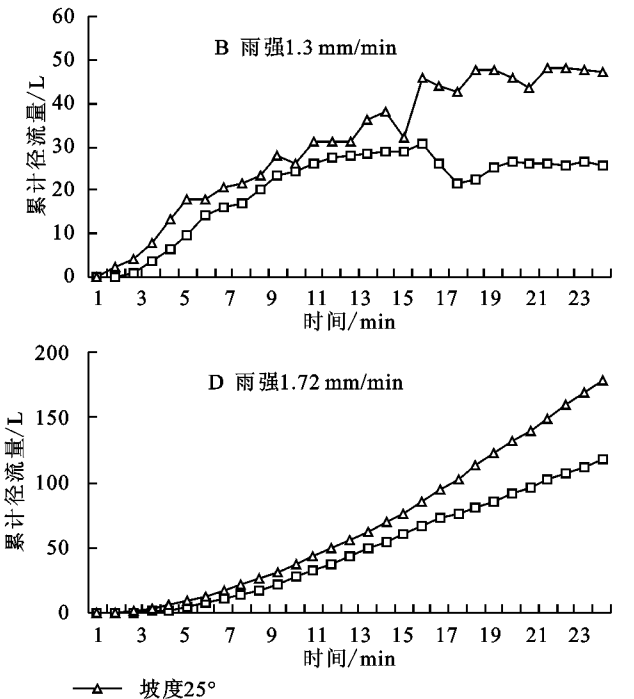
图 1 自然草地小区在两种雨强下不同坡度径流、累计径流量过程线

2.1.2 土地利用类型对径流的影响 不同土地利用类型对坡地产流影响差异明显^[13],草地产流明显少于裸地且草地达到稳定径流的历时要晚于裸地。对相同坡度、相同雨强、不同土地利用类型径流小区径流深、累计径流深见图 2。

分析表明,相同坡度,相同雨强下,裸地产流量曲线一直处于草地上方,表明裸地单位产流量大于草

于稳定。分析不同坡度条件下,径流小区的累积径流量时间变化曲线表明(图 1A,C),25°坡度 30min 累积产流量明显高于 12°坡度,在 1.3 mm/min 下约为其 1.2 倍,在 1.72 mm/min 下约为其 1.5 倍。1.3 mm/min 雨强 25°坡度条件下,产流时间大于 6 min 后,曲线斜率保持不变,这也表明产流率在某一段时间会达到稳定状态。不同坡度下径流量的差异性说明,坡度越大,沿坡方向重力分力越大,导致流速增加,入渗率减小,因此随着坡度的增加累计径流量也相应增加^[12]。

表 3 不同径流小区初始产流时间				
土地类型	规格/ (m×m)	坡度	雨强/ (mm·min ⁻¹)	产流 时间/s
自然草地	2.5×4	12°	1.3	261
自然草地	2.5×4	12°	1.72	197
自然草地	2.5×4	25°	1.3	191
自然草地	2.5×4	25°	1.72	125
裸耕地	2.5×4	12°	1.3	191
裸耕地	2.5×4	12°	1.72	123
裸耕地	2.5×4	25°	1.3	145
裸耕地	2.5×4	25°	1.72	72



地。1.3 mm/min 雨强条件下,12°坡度裸地产流量达到稳定时间为 13 min,草地为 17 min,25°坡度分别为 10 min 和 15 min;1.72 mm/min 条件下,12°坡度裸地产流量达到稳定时间为 13 min,草地为 21 min,25°坡度分别为 8 min 和 19 min。产生上述现象的主要原因是,植被在降雨过程中拦截了一部分雨水,草地具有增加地表粗糙度,减少径流流速,延长径流在小

区中停留时间,增加了下渗量;同时草地由于团聚体结构丰富,土壤孔隙度大,其土壤下渗能力大于裸地,因此草地产流量显著小于裸地。裸地径流达到稳定时间短

于草地,主要原因亦可归于下渗能力的不同。裸地由于无植被拦截,降雨迅速产流,下渗能力且下渗率很快达到稳定速率,因此其径流稳定时间较短。

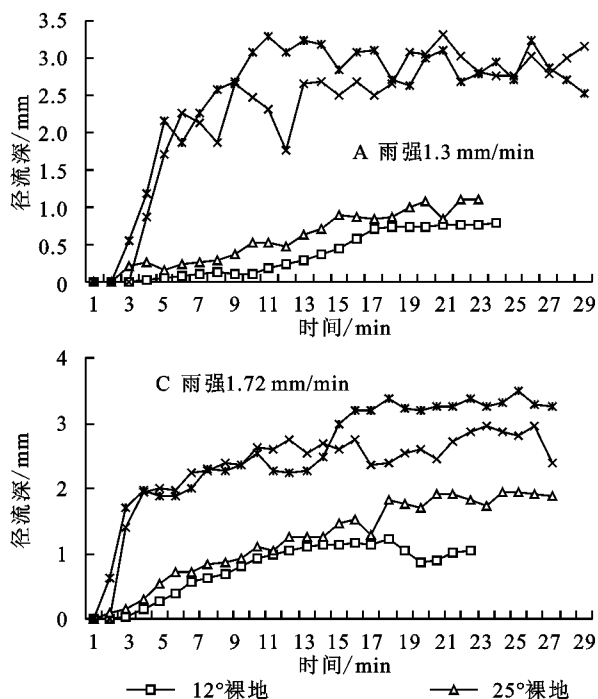


图2 两种雨强两种坡度下不同土地利用类型径流深、累计径流深过程线

与裸地相比,草地产流总量低于裸地。累计径流深随时间变化曲线见图2。分析表明,草地在雨强1.3 mm/min条件下,坡度12°,25°累计径流深分别为3.49 mm,5.31 mm,比裸地累计径流深分别减少83.14%,75.25%;在雨强1.72 mm/min条件下,12°,25°累计径流深分别为9.12 mm,17.80 mm,比裸地累计径流深分别减少65.61%,52.15%。这说明草地保水能力明显大于裸地^[14]。

3.1.3 雨强对径流影响 相同坡度和土地利用类型条件下,雨强越大产流量越大,径流达到稳定时间越短(图3)。12°草地条件下,1.3 mm/min雨强30 min中产流量为34.86 L,径流达到稳定时间为17 min,而1.73 mm/min雨强30 min中产流量为117.29 L,为前者的3.36倍,径流达到稳定时间为15 min,为前者的88.23%;25°草地条件下,1.3 mm/min雨强30 min中产流量为53.05 L,径流达到稳定时间为22 min,而1.73 mm/min雨强30 min中产流量为178.01 L,为前者的3.35倍,径流达到稳定时间为19 min,为前者的86.36%;12°裸地条件下,1.3 mm/min雨强30 min中产流量为247.55 L,径流达到稳定时间为13 min,而1.73 mm/min雨强30 min中产流量为290.22 L,为前者的1.17倍,径流达到稳定时间为7 min,为前者的53.85%;25°裸地条件下,1.3 mm/min雨强30 min中产流量为265.08 L,径流达到稳定时间为

22 min,而1.73 mm/min雨强30 min中产流量为350.43 L,为前者的1.32倍,径流达到稳定时间为17 min,为前者的77.27%。

对于草地和裸地来讲,产流量都随产流历时呈先增加后平稳的趋势,而累计径流量随产流历时呈逐渐增加的趋势。对于天然草地来讲,每1 min径流量随产流时间平缓增加,而对于裸耕地来讲,随产流历时呈急剧增加的趋势。这是因为对黄土丘陵沟壑区而言,坡耕地受到的人为扰动最剧烈、频繁;自然草地其良好的覆盖度、特有的根蘖繁殖能力、发达的根系以及枯草对径流产生了极大的降低和削弱作用^[15-16],截留率较高,因此其产流增加缓慢,起到了较好的截留保水作用。在雨强1.3 mm/min条件下,两种土地利用类型的产流强度波动性不大,而在雨强1.72 mm/min条件下,波动性很大,原因是从初始产流开始,由于农地土壤的结构特性导致入渗率的显著降低,产流量明显加强,具有较大的波动性。裸耕地小区土壤入渗率下降的主要原因在于农地小区进行了翻耕,使其结构稳定性较差,在雨滴的冲击下极易封实土壤毛管孔隙,从而阻碍了水分的正常入渗^[17-20]。这种剧烈波动性与降雨过程中局部坡面的塌陷所导致的坡面流态不稳有关。而且各雨强产流曲线差异明显,微小的雨强差别都可产生不同的产流量,对雨强的变化相当敏感。

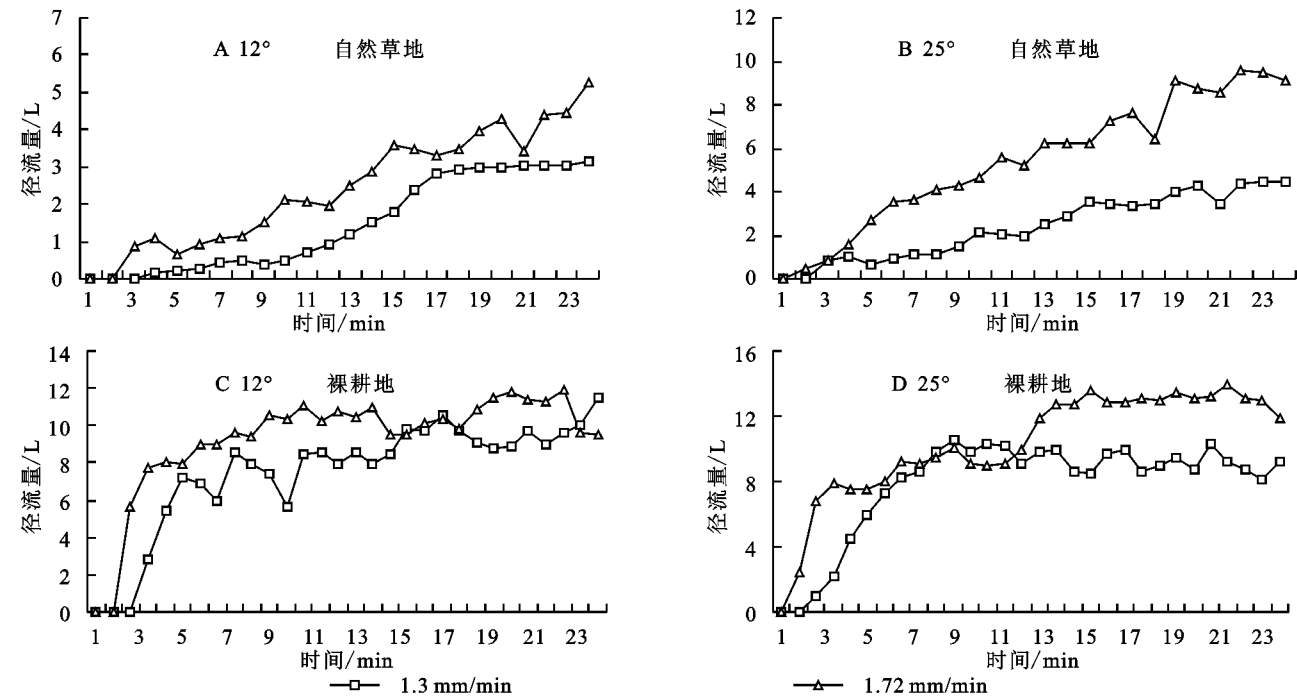


图 3 自然草地、裸耕地在两种坡度下不同雨强径流量过程线

2.2 产沙影响因子分析

由于天然草地覆盖度达到 80% 以上,产沙量极少。本次试验未采取泥沙样本,因此本试验重点研究裸耕地产沙影响因子的分析。

2.2.1 坡度对产沙影响 相同条件下,坡度越大,产沙量越大,产沙峰值越大,但两种坡度稳定产沙量相同。不同坡度条件下产沙量及累计产沙量时间变化曲线见图 4。从图 4A 可见,1.3 mm/min 雨强条件下,25°产沙时间早于 15°,且产沙量呈现“陡增陡降”的特点,到 10 min 后两种坡度产沙量基本相同。累计产沙量曲线也显示,10 min 前,25°坡曲线斜率明显大于 12°,10 min 后曲线斜率基本一致,表明 10 min 后两者产沙率基本相同(图 4B)。

1.73 mm/min 雨强条件下,亦表现出相同的变化特征(图 4C 和 4D)。就产沙峰值而言,坡度越大峰值越大,1.3 mm/min 雨强,12°和 25°坡度峰值分别为 34.66 g 和 85.33 g,1.72 mm/min 雨强,12°和 25°坡度峰值分别为 41.32 g 和 94.78 g。

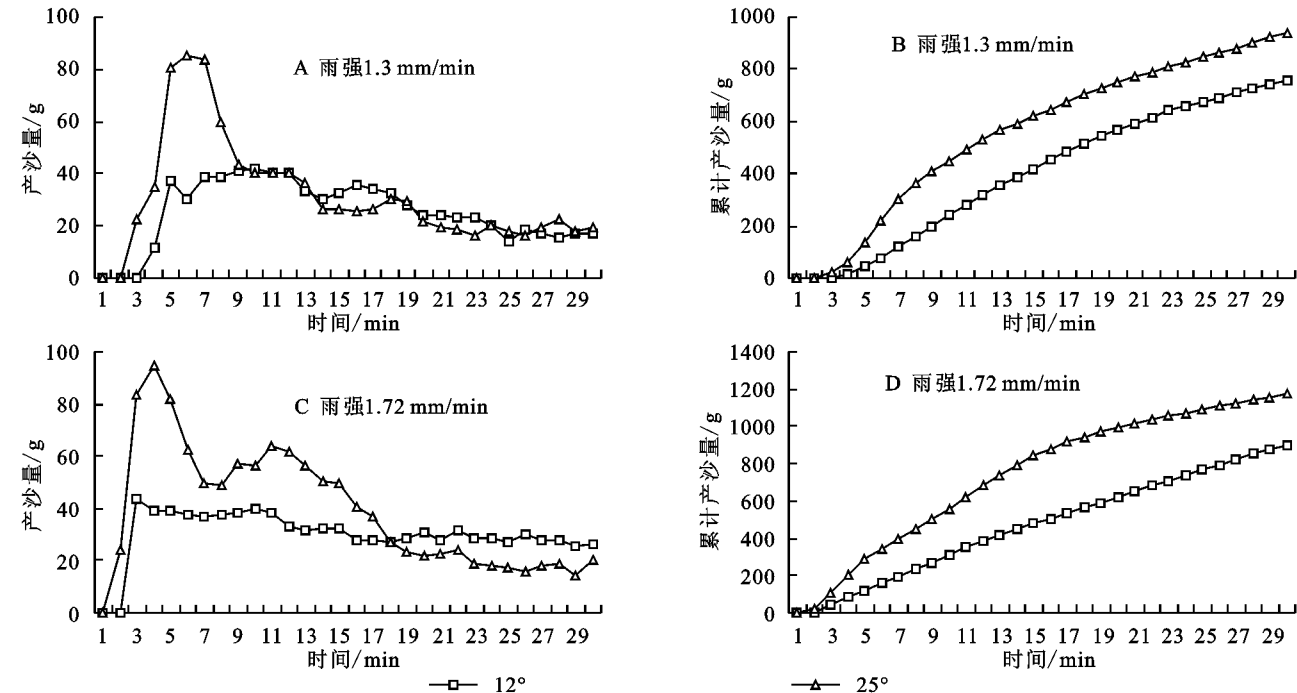


图 4 两种雨强条件下不同坡度产沙、累计产沙量过程线

分析不同坡度下,产沙量随时间变化表现出的差异性,主要原因可能有以下几点:(1) 坡度对土壤侵蚀的影响主要是通过影响土壤入渗而实现的。入渗量随坡度的增大而减小,坡度越大,降雨过程中入渗时间越短,土壤的入渗量越小,产生的径流量越大,因而产生的侵蚀量越大;(2) 坡度对溅蚀的影响。主要表现在雨滴直接冲击土壤表面,破坏土壤结构,进而使土粒分散、破坏和迁移。坡度较小时,即使严重的土粒飞溅,也不能引起严重的水土流失,而坡度较大时,飞溅的土粒向下坡方向飞溅的距离大于向上坡飞溅距离,为土壤侵蚀创造了有利条件;(3) 在雨强 1.3 mm/min,坡度 25°条件下,在产沙历时中有一段时间出现侵蚀泥沙量小于坡度 12°的情况。可能原因是,坡度对土壤侵蚀量的影响并非无限地呈正比增加,而是存在一个侵蚀临界坡度,当大于此临界坡度时,土壤侵蚀量反而随坡度的

增大而减小^[21]。

2.2.2 雨强对产沙影响 相同条件下,雨强越大,产沙量越大,产沙峰值越大,两种雨强稳定产沙量差异明显。不同雨强条件下产沙量及累计产沙量时间变化曲线见图5。从图5A可见,12°被坡度条件下,1.72 mm/min 雨强产沙时间早于 1.3 mm/min 雨强,且产沙量呈现“陡增陡降”的特点,到 21 min 两种雨强产沙量差异明显。累计产沙量曲线也显示,21 min 前,两者曲线斜率基本一致,21 min 后 1.72 mm/min 雨强曲线斜率明显大于 1.3 mm/min 雨强,表明 21 min 钟后两者产沙率差异明显(图5B)。25°坡度条件下亦表现出相同的变化特征(图5C和5D)。就产沙峰值而言雨强越大峰值越大,12°坡度,1.3 mm/min 雨强和 1.72 mm/min 雨强峰值分别为 39.97 g 和 43.5 g;25°坡 1.3 mm/min 雨强和 1.72 mm/min 雨强峰值分别为 85.33 g 和 94.78 g。

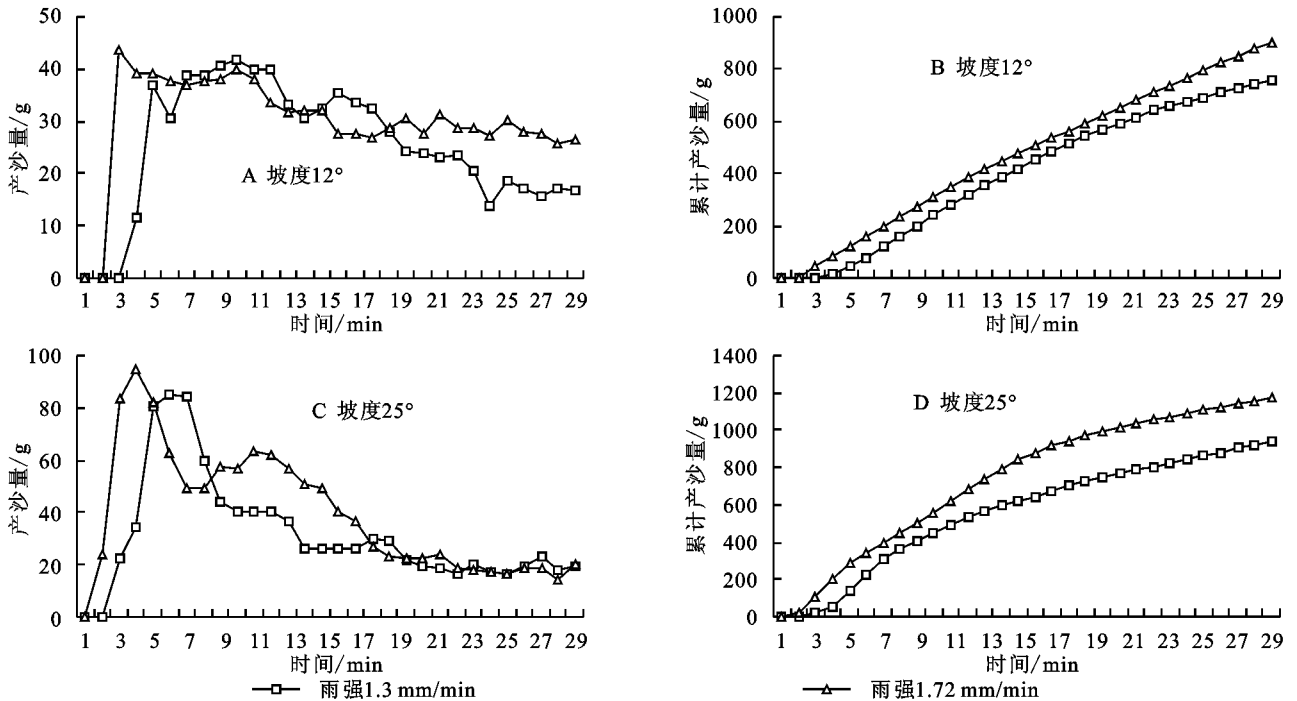


图5 两种坡度下不同雨强产沙、累计产沙量过程线

分析不同降雨强度下,侵蚀泥沙量随产流历程表现出的特征,主要原因可能有以下几点:(1) 在产流初期,坡面表土层比较松散,抗蚀能力低,为径流搬运提供了充足的物质来源,易受雨滴击溅和径流冲刷。雨强越大,降雨的击溅分散土壤团聚体的能力就越强,相应就为径流提供了更多可以携带的土壤颗粒,因此随着降雨的进行,当坡面开始出现产流时,雨强增大径流就存在可以携带更多土壤颗粒的可能性。因此在产流初期,不同雨强下泥沙都出现陡增现象,且雨强越大,侵蚀泥沙量达到的峰值越大。(2) 随着降雨过程的进行,一方面原地表松散土壤颗粒减少,在一

定程度上阻滞了土壤颗粒随径流流失的速度,径流在沿程流动中一些质量相对较大的土壤颗粒出现了沉积,所以迁移出去的颗粒逐渐减少,并最终趋于稳定;另一方面,降雨对坡面土粒的作用逐渐从溅蚀转化为薄层水流的冲刷,虽然薄层水流的冲刷也会对表土颗粒产生侵蚀作用,但是其更重要的作用可能是对土壤颗粒产生迁移和沉积作用,将土壤颗粒迁移出坡面或是在坡面对土壤颗粒进行一次再分配。同时雨滴溅蚀破坏了表层土壤颗粒的结构,形成了不易流失的结皮层^[22-23],坡面土壤侵蚀强度明显减小,因而径流产沙量逐渐降低并趋于稳定。

4 结论与讨论

(1) 相同雨强和土地利用类型条件下,坡度越大产流量和产沙量越大。相应的产流量与产沙量随时间变化均表现为先增大后稳定的变化特征。

(2) 相同雨强和坡度条件下,草地产流量和产沙量均低于裸地,且草地达到稳定产流量时间大于裸地。草地的保水减沙能力明显高于裸地。

(3) 相同坡度和土地利用类型条件下,雨强越大产流量和产沙量越大,且出现产流产沙历时短,但达到稳定的时间较长。

由于本次野外人工降雨试验的条件限制,可能会使试验的结果有某些偏差,所建函数关系还需要更多的实测数据来验证其合理性。同时,由于自然草地在小、中等雨强下,产沙量很少,本研究未能建立适合自然草地的径流与侵蚀泥沙的函数关系,还需要对其进行深入研究。

参考文献:

- [1] 李德利,王瑄,邱野.天然降雨条件下裸地、植被坡的产流产沙过程分析[J].安徽农业科学,2011,39(35):71-74.
- [2] 陈法扬.不同坡度对土壤侵蚀量影响试验研究[J].中国水土保持,1985(2):18-19.
- [3] 孙飞达,蒋志荣,王立.不同雨强下农地的产流产沙研究[J].甘肃科学学报,2005(1):53-56.
- [4] 焦菊英,王万中,郝小品.黄土高原不同类型暴雨的降水侵蚀特征[J].干旱区资源与环境,1999,13(1):34-42.
- [5] Finney H J. The effect of crop covers on rainfall characteristics and splash detachment[J]. Journal of Agricultural Engineering Research,1984,29(4):337-343.
- [6] Barnett A P, Rogers J S. Soil physical properties related to runoff and erosion from artificial rainfall[J]. Transactions of the ASAE,1966,9(1):123-125.
- [7] Bryan R B. The influence of slope angle on soil entrainment by sheet and rain splash[J]. Earth Surface Process, 1979,4:43-48.
- [8] 周继.人工模拟降雨条件下土壤颗粒变化及养分流失的

研究[D].重庆:西南大学,2009.

- [9] 耿晓东,郑粉莉,刘力.雨强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.
- [10] 焦菊英,王万中,李靖.黄土高原林草水土保持有效盖度分析[J].植物生态学报,2000,24(5):608-612.
- [11] 蒋定生,黄国俊.地面坡度对降雨入渗影响的模拟试验[J].水土保持通报,1984(20):10-13.
- [12] 唐春霞,姚军,何丙辉.紫色土坡耕地磷素径流流失特征分析[J].西南师范大学学报:自然科学版,2010,32(6):180-184.
- [13] 胡实,谢小立,王凯荣.红壤坡地不同土地利用类型地表产流特征[J].生态与农村环境学报,2007,23(4):24-28.
- [14] 陈鹏飞,陈丽华,王宇,等.黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型对坡地产流,产沙的影响[J].生态与农村环境学报,2010,26(3):199-204.
- [15] 卫伟,陈利顶,傅伯杰,等.半干旱黄土丘陵沟壑区降水特征值和下垫面因子影响下的水土流失规律[J].生态学报,2006,26(11):3847-3853.
- [16] Rai S C, Sharma E. Comparative assessment of runoff characteristics under different land use patterns within a Himalayan watershed[J]. Hydrological Processes, 1998,12(13):2235-2248.
- [17] 郭廷辅,段克甫.水土保持径流调控理论与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2004.
- [18] 信拴,赵聚宝.旱地农田土壤水分与调控技术[M].北京:农业出版社,1992.
- [19] Daniel Hillel. 尉庆丰,荆家海,王益权,译.土壤物理学概论[M].西安:陕西人民教育出版社,1982.
- [20] 高鹏,穆兴民.黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分入渗的对比试验[J].中国水土保持科学,2005,3(4):27-31.
- [21] 吴普特.动力水蚀试验研究[M].西安:陕西科学技术出版社,1997.
- [22] 吴发启,范文波.土壤结皮与降雨溅蚀的关系研究[J].水土保持学报,2001,15(3):1-3.
- [23] 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.