

间歇性与连续性降雨对黄土坡面细沟侵蚀影响的比较

何育聪¹, 郑浩杰¹, 韩剑桥^{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.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 采用室内模拟降雨试验, 对比了间歇性降雨与连续性降雨对黄土坡面细沟侵蚀的影响差异, 量化了间歇性降雨相对于连续性降雨条件的试验误差, 并评估该试验方法在坡面侵蚀模拟中的适宜性。结果表明: (1) 低雨强 (≤ 60 mm/h) 时, 对于间歇性降雨试验, 坡面细沟产沙大幅降低, 误差达 -40.8% , 伴随着沟宽、沟深和割裂度等形态指标的减小, 误差介于 $-33\% \sim -45\%$; 产流误差较小, 为 0.4% 。(2) 高雨强 (≥ 90 mm/h) 时, 产流产沙、细沟形态的各项指标误差均不大, 为 $3\% \sim 12\%$, 对试验结果影响相对较小。(3) 在采用间歇性降雨试验方法时, 建议采用高雨强试验条件 (≥ 90 mm/h), 才能准确模拟天然降雨的细沟侵蚀过程, 且在高雨强时应控制间歇性降雨试验每一阶段的降雨历时, 避免累积产沙量的持续快速增长而导致细沟侵蚀剧烈发展, 误差进一步增大。由于土壤性质的区别, 该试验结果在其他区域的适用性还有待深入研究。研究结果可为坡面细沟侵蚀的过程与机理研究提供技术支撑。

关键词: 黄土; 雨强; 细沟形态; 产流产沙; 间歇性降雨

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)06-0008-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.06.002

Comparative Study on the Influence of Intermittent and Continuous Rainfall on Rill Erosion of Loess Slope

HE Yucong¹, ZHENG Haojie¹, HAN Jianqiao^{2,3}

(1. College of Water Conservancy and Construction Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Based on indoor simulated rainfall test, this study compared the influence of intermittent rainfall and continuous rainfall on rill erosion on loess slope, quantified and compared the experimental errors of intermittent rainfall relative to continuous rainfall conditions, and evaluated the suitability of this experimental method in slope erosion simulation. The results showed that: (1) At low rainfall intensity (≤ 60 mm/h), for the intermittent rainfall test, the rill sediment production on the slope was significantly reduced with an error of -40.8% , and the error was between $-33\% \sim -45\%$ along with the decreasing of ditch width, ditch depth and cleavage degree. The error of runoff production was small (0.4%). (2) When the rainfall intensity was high at 90 mm/h and 120 mm/h, the errors of various indexes of sediment and runoff production and rill morphology were all small, ranging from 3% to 12% , which had relatively little impact on the test results. (3) When the intermittent rainfall test method was used, it was suggested to adopt the high rainfall intensity test conditions (≥ 90 mm/h) to accurately simulate the rill erosion process of natural rainfall, and the rainfall duration of each stage of intermittent rainfall test should be controlled in case of high rain intensity, so as to avoid the continuous and rapid growth of accumulated sediment yield which led to the sharp development of rill erosion and further increase of error. Because of the difference of soil properties, the applicability of the test results in other areas needed further study. The results could provide technical

收稿日期: 2020-03-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(41807067, 41907061)

第一作者: 何育聪(1999—), 男, 在读本科生, 主要从事泥沙运动力学研究。E-mail: 18188425393@163.com

通信作者: 韩剑桥(1987—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事泥沙运动力学研究。E-mail: hjq13@163.com

support for the study of rill erosion process and mechanism.

Keywords: loess; rainfall intensity; rill morphology; runoff and sediment yield; intermittent rainfall

细沟侵蚀是坡面侵蚀的主要方式之一,其侵蚀泥沙量可达到坡面总侵蚀量的 70% 以上,是导致土地退化、面源污染等环境问题的重要原因^[1-3]。研究细沟演化的过程与机理对保护土地资源、维持生态环境高质量发展具有重要意义。

细沟侵蚀受降雨、地形、土壤质地与地表状况等因素的综合影响,这些因素均是通过增强或削弱降雨径流侵蚀能力和土壤抗侵蚀能力来影响细沟发育^[4-7]。黄土区关于细沟侵蚀主要集中于细沟演变、产流产沙及其动力学机制等方面的研究^[3-9]。裴冠博等^[7]发现,晋西黄绵土坡面细沟从坡面的中下部开始发育,相继表现为跌坎—细沟—细沟网—细沟崩塌。在一定的坡度、坡长与下垫面条件下,降雨是坡面细沟侵蚀的关键因素,影响着坡面产流产沙和细沟形态演化^[8-11]。目前在关于水土保持领域的研究中,人工降雨模拟试验已经成为了一种重要的研究方法^[12-13]。已有学者^[13-14]对人工降雨模拟试验的方法进行了相似性研究,柯奇画等^[13]通过文献数据和观测数据,分析了人工降雨模拟试验与天然降雨小区观测在径流、泥沙方面的差异发现,在雨强较小时,人工降雨模拟试验的水沙结果较差。除此之外,基于人工降雨试验的细沟侵蚀研究在连续降雨条件下也难以观测细沟形态变化特征。目前在连续降雨中采用人工尺测手段的误差较大,也难以获取详细的 DEM,而采用三维激光扫描仪和摄影测量技术等非接触式测量方法,虽消除了雨滴影响,但也难以观测被径流覆盖的细沟区域。为解决上述问题,已有研究^[15-18]采用了间歇性降雨方法,即在一定时间间隔暂停降雨,采用三维激光扫描或摄影测量技术获取高精度地形资料。吴淑芳等^[16]采用 3 场间歇性降雨,详细观测了土壤侵蚀演变过程中的地形参数;郭慧莉等^[17]在 5 场间歇性降雨之间,使用大型三维激光扫描仪获取地表高程数据。这种概化处理,增加了坡面细沟演化过程中的地形数据采集频率,反映了细沟形态的变化过程。但是,间歇性降雨的试验方法打断了天然降雨的连续性,而其对坡面产流产沙和细沟形态演化的影响还鲜有研究,试验误差亟需科学评估。

为此,本文采用室内降雨试验的方法,比较了间歇性降雨与连续性降雨对坡面产流产沙及细沟形态的影响,量化间歇性降雨的试验误差,评估该试验方法的适宜性,以期为黄土区坡面细沟侵蚀的过程与机理研究提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2018 年 9 月 29 日至 11 月 15 日在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅进行。降雨由下喷式降雨设备提供,降雨覆盖面积为 27 m×18 m,降雨高度 18 m,满足使所有雨滴达到终点速度的要求。模型设备为变坡土槽,长 10 m,宽 1 m,深 0.5 m,坡度调节范围为 0~30°(图 1)。模型用土取自黄土高原丘陵沟壑区延安市安塞区的耕层黄绵土,容重 1.25 g/cm³。

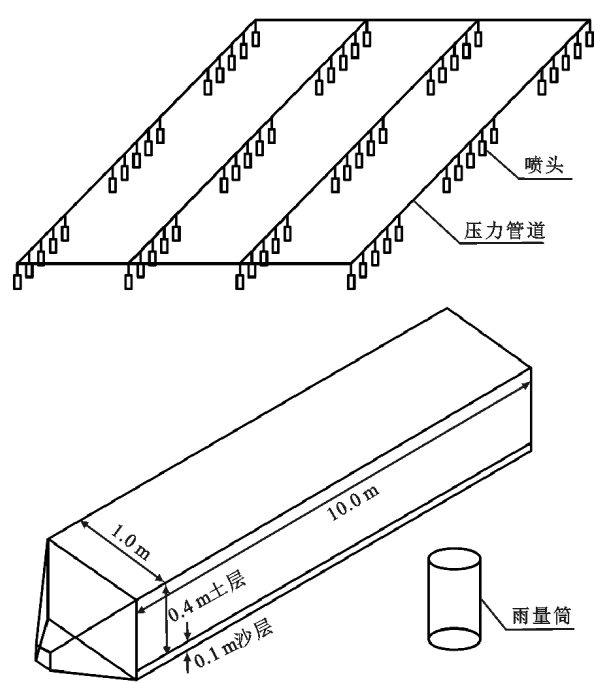


图 1 试验装置示意

1.2 试验设计

短历时、高强度暴雨是造成黄土区水土流失的主要降雨特征^[19],根据侵蚀性降雨特征,降雨强度选为 60,90,120 mm/h。由于细沟侵蚀在 10°~30°的裸露坡耕地上表现最明显^[20],而 25°是坡耕地研究的上限,据此,设计坡度定为 20°。对不同降雨强度分别设置连续性降雨与间歇性降雨试验,共进行 6 次试验。连续性降雨试验和间歇性降雨试验的降雨历时设置为 60 min;对于间歇性降雨试验,将降雨历时划分为 4 个 15 min 的降雨阶段(P1~P4 阶段),每相邻 2 个阶段之间作为间歇期,停止降雨 15 min,以满足测量的时间要求。

1.3 试验方法

为减小下垫面平面差异对试验结果的影响,试验统一采用平面均匀的概化下垫面,所有试验土样自然风干

并过 10 mm 筛,以除去杂草和石块。在装土之前,先在土槽底部填 10 cm 厚天然细沙,并铺上透水纱布,土槽底部采用梅花形打孔来模拟天然土壤透水状况,以保持试验土层的透水性接近天然坡面。填土时将 40 cm 厚土层分层填装,每次填土厚度为 5 cm,容重控制在 1.3 g/cm^3 。由于黄绵土的细沟发育随机性大^[8],且人工布置的土槽表面难以达到理论上的平整,造成初始地貌上的跌坎、洼地随机分布,对细沟的走向及发育均有显著影响。为此,本试验考虑沿坡长方向在土槽中央布置一条宽 3 cm、深 1 cm,坡上坡下均匀的“V”形凹槽,引导水流汇集形成主细沟,以减小坡面初始形态引起的随机误差,保障上下游下垫面的均一性。

降雨系统将水喷射至空中,水流在空气阻力作用下破碎形成不同大小的雨滴,与天然降雨的雨滴相似^[19],降雨高度为 18 m,满足所有雨滴达到终点速度,且室内降雨试验消除了风的影响。试验前 1 天,对土槽进行雨强为 30 mm/h 的预降雨,降雨历时为坡面出现产流为止,使得各组试验有相同的土壤含水量,并使孤立分散的土壤颗粒湿润固结。降雨后静置 24 h,以减小下垫面的空间变异性。为保证模拟降雨的准确性和均匀性,降雨前先将土槽覆盖塑料布,在其上方均匀布设 6 个雨量筒,反复率定雨强,在降雨强度和均匀度均满足要求后开始正式降雨,降雨均匀度需 $>90\%$,实际降雨强度和目标降雨强度误差需 $<5\%$ 。

1.4 指标观测与计算

从降雨开始时刻起,在降雨过程中,每隔 1 min 用标有刻度的塑料白瓶和径流桶采集 1 次泥沙径流样品。试验结束后,将塑料白瓶带回试验室静置 24 h,采用烘干法计算得出含沙量,再根据径流桶和塑料白瓶中水深计算出径流量。

降雨开始前后与间歇期采用三维激光扫描仪(莱卡 HDS6100)扫描坡面,获得不同时段的坡面扫描数据。采用 Cyclone 软件进行去噪、拼接、坐标系统一等初始处理,从而得到去除无效点后同一坐标系下的多时相坡面 DEM,用于细沟形态的分析。

本文以连续性降雨的试验结果为标准值,计算间歇性降雨的试验结果误差。误差为正值表明间歇性降雨试验的各指标值大于连续性降雨试验的各指标值,反之为小于连续性降雨试验各指标的值。分析参数包括径流率、产流量、产沙率、产沙量与细沟形态参数。其中细沟形态参数包括沟宽、沟深及细沟割裂度,计算公式为:

细沟沟宽($\bar{D}$, m)是指坡面所有细沟侵蚀宽度的

加权平均值:

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i D_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (1)$$

式中: D_i 为坡面每条细沟的沟宽(m); S_i 为坡面每条细沟的平面面积(m^2)。

细沟沟深($\bar{H}$, m)是坡面所有细沟侵蚀深度的加权平均值:

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i h_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (2)$$

式中: h_i 为坡面每条细沟的沟深(m)。

细沟割裂度(μ)是指坡面单位面积内所有细沟平面面积之和,能客观反映坡面的破碎程度和细沟侵蚀强度:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{A} \quad (3)$$

式中: A 为坡面面积(m^2)。

2 结果与分析

2.1 产流对比

由图 2 可知,在 3 种雨强条件下,间歇性降雨试验各个阶段的产流规律基本相似,即在每一阶段的初期,径流率迅速增大并达到相对稳定。在间歇性和连续性降雨试验中,产流率在某些时段都略有降低。相对于连续性降雨试验,间歇性降雨试验 P1 阶段的产流误差在 2% 以内,而 P2~P4 阶段的误差介于 $-6.7\% \sim 12.3\%$,各阶段产流误差和雨强大小、降雨阶段顺序无明显关系。

从累积产流量曲线来看,3 种雨强下的累积产流量误差都不大(图 3)。雨强为 60, 90, 120 mm/h 时,误差分别为 0.4%, 6.8%, 7.7%, 均在 10% 以内。雨强为 60 mm/h 时,间歇性降雨与连续性降雨条件下的累积产流量过程无明显差别。而当雨强为 90, 120 mm/h 时,累积曲线从 P3 阶段开始出现差异。3 种雨强条件下,间歇性降雨试验的总产流量误差均较小。

2.2 产沙对比

由图 4 可知,在 3 种雨强条件下,产沙过程有一定的相似性。即在间歇处理后的每次降雨初始时刻,产沙率都接近零,经过 5 min 的迅速增加后,产沙率增速逐渐放缓。在 6 场试验中,产沙率过程波动均较为频繁,其中间歇性降雨试验的产沙率波动更大。当雨强为 60 mm/h 时,间歇性降雨试验 P3~P4 阶段的平均产沙率误差分别达到 -71.0% , -55.0% ; 雨

强为 90,120 mm/h 雨强时,各阶段平均产沙率误差介于 $-20.6\% \sim 18.9\%$,且各阶段的产沙误差有正有负,与雨强大小和阶段顺序无明显关系。

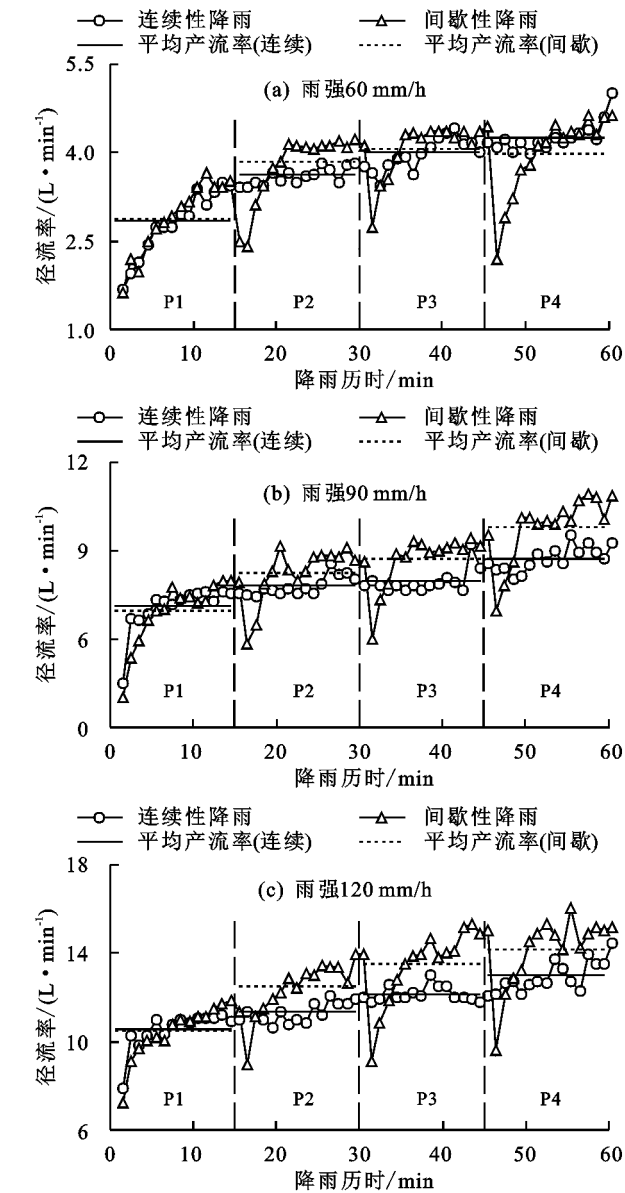


图2 间歇性与连续性降雨的径流率变化过程

由图5可知,当雨强为 90,120 mm/h 时,间歇性与连续性降雨试验的产沙量累积过程差别不大,总产沙量误差分别为 10.5%,9.1%,间歇性降雨试验 P2~P4 阶段的累积产沙量增速明显变大,且在每阶段后期增速大于连续性降雨试验的累积产沙量增速。而当雨强为 60 mm/h 时,间歇性降雨试验的累积产沙量从 P3 阶段开始明显降低,总产沙量误差达到 -40.8% 。因此,间歇处理后,总产沙量在高雨强条件下变化不大,而在低雨强时明显减少。

2.3 细沟形态对比

由图6可知,雨强为 60,90,120 mm/h 时,沟宽误差分别为 -45% ,12%,9%;沟深误差 -33% ,8%,3%;割裂度误差 -37% ,4%,7%。可见在 60 mm/h

雨强下,间歇处理后的沟宽、沟深和割裂度均明显减小,误差均大于 -33% ;而在 90,120 mm/h 雨强下,间歇处理后各项形态指标均略有增大,误差较小,为 $3\% \sim 12\%$ 。表明间歇处理后,细沟侵蚀在低雨强时被明显抑制,而在高雨强时有小幅加剧。

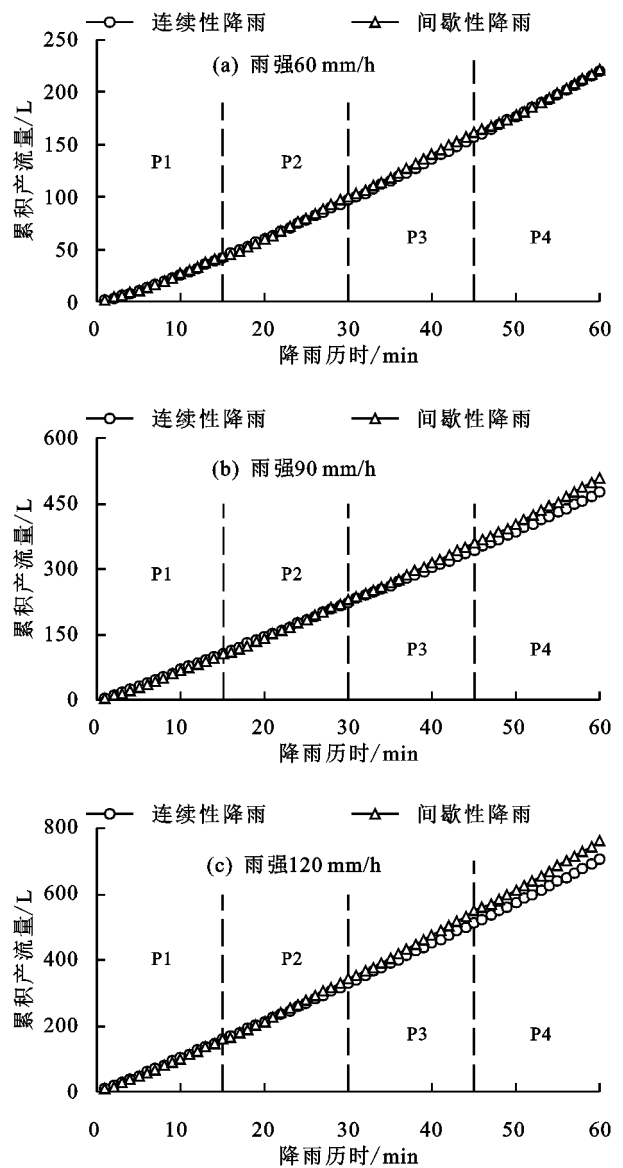


图3 间歇性与连续性降雨的累积产流量曲线

3 讨论

本研究表明,当雨强为 60 mm/h 时,总产流量误差为 0.4%,而总产沙量误差较大,为 -40.8% ,尤其在试验后期的 P3~P4 阶段,达到了 -71.0% , -55.0% ;且沟宽、沟深和割裂度等形态指标明显减小,介于 $-33\% \sim -45\%$,细沟侵蚀被抑制。而当雨强为 90,120 mm/h 时,间歇处理对坡面产流产沙、细沟形态影响均较小,各项指标误差均在 $3\% \sim 12\%$,细沟侵蚀小幅加剧。间歇性降雨试验 P2~P4 阶段的累积产沙量增速持续变大并超过连续性降雨的累积产沙量增速。

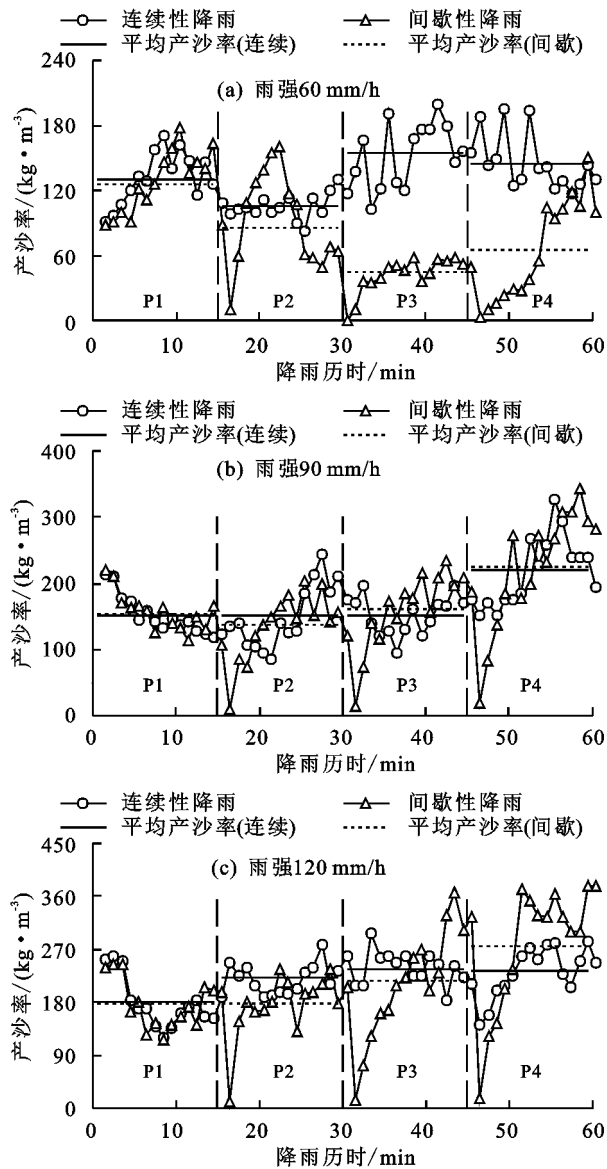


图 4 间歇性与连续性降雨的产沙过程

从坡面产流产沙机制来看,在降雨强度和汇水面积一定时,黄土坡面产流主要取决于土壤本身的入渗条件^[8],而产沙主要来自沟壁崩塌和径流冲刷;预降雨和间歇期形成的物理结皮可阻碍水分入渗并保护土壤^[21],同时加强径流冲刷作用、导致产沙增加。而雨滴打击作用会破坏结皮,使保护作用被削弱。细沟侵蚀过程中会偶发沟壁崩塌,短时间内阻碍水流运移,并且受试验误差影响,导致产流率在某些时段会降低,但不影响整体的变化规律。雨强为 60 mm/h 时,受预降雨结皮的影响,间歇、连续性降雨试验的下渗能力均被充分抑制,从而使第 1 阶段的产流误差较小;间歇处理后,预降雨结皮和间歇期结皮的共同作用,使径流冲刷和沟壁崩塌均被抑制,细沟各形态指标减小,也导致 P3、P4 阶段产沙显著减少,总产沙量也相应的大幅降低。当雨强为 90、120 mm/h 时,对于间歇性降雨试验,虽有间歇期物理结皮形成,但雨

滴打击作用增强并破坏结皮,削弱了结皮对坡面的保护作用,导致其坡面条件与连续性降雨试验的坡面条件相近,产流率和产流量只有小幅增加,又由于黄绵土崩塌频繁且具有随机性^[8],各阶段产沙率相较于连续性降雨试验有增有减,而产流增加,径流冲刷作用加强,导致总产沙量增速在每阶段不断变大且总产沙量有小幅增加,细沟侵蚀略有加剧,细沟各形态指标均小幅增加。印证了结皮会阻碍入渗,促进径流,加剧细沟侵蚀的观点^[22-23],但在低雨强时,细沟侵蚀可能会被明显抑制,这与吴发启等^[24]的研究结论一致。

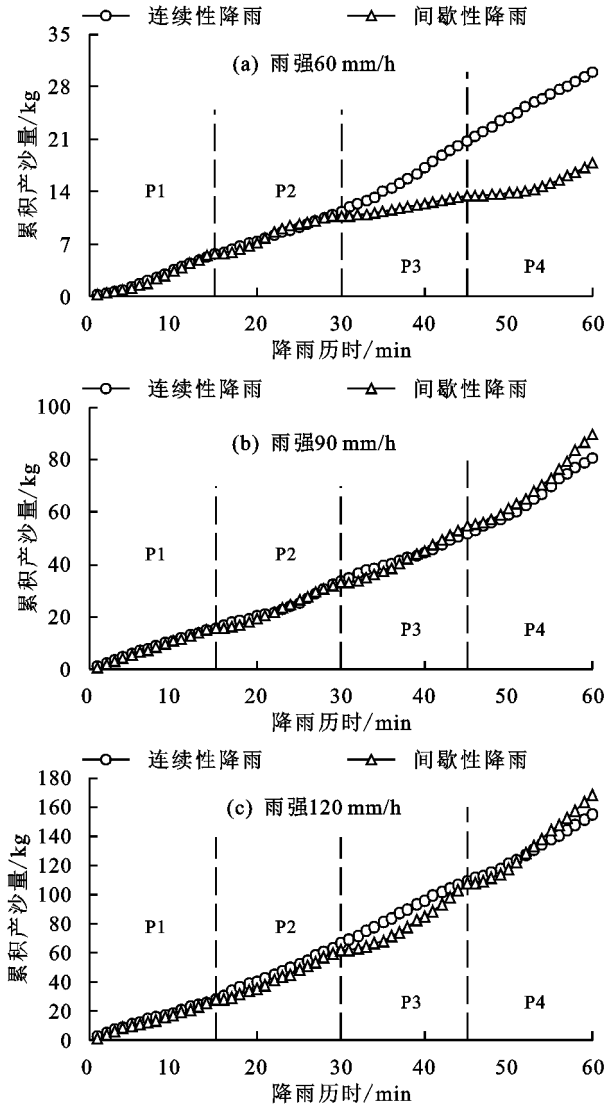


图 5 间歇性与连续性降雨产沙量累积曲线

根据上述分析,间歇性与连续性降雨试验在产流方面差异均不大。但在低雨强下(≤ 60 mm/h),受间歇期物理结皮影响,细沟侵蚀被明显抑制,产沙量明显减小。而在高雨强时(≥ 90 mm/h)与天然降雨的细沟侵蚀过程较为接近,产沙误差较小。值得注意的是,在高雨强时,间歇处理后的每阶段累积产沙量增速都不断变大,如果每阶段的降雨历时加长,可能会导致细沟侵蚀明显加剧。

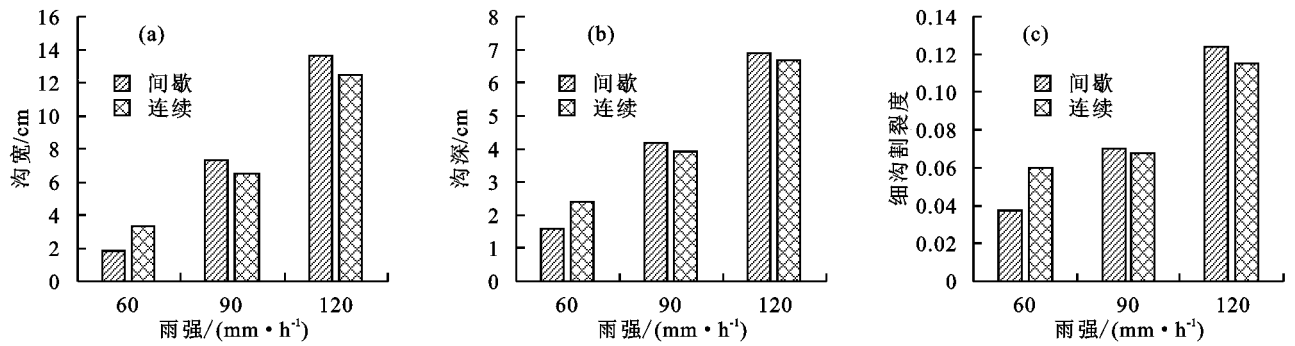


图 6 间歇性降雨与连续性降雨的细沟形态对比

4 结论

(1)低雨强(≤ 60 mm/h)时,对于间歇性降雨试验,受预降雨和间歇期物理结皮的影响,径流冲刷和沟壁崩塌均被抑制,细沟各形态指标减小,误差介于 $-33\% \sim -45\%$,且总产沙量大幅降低,误差达 -40.8% 。总产流量误差较小,为 0.4% 。

(2)高雨强(≥ 90 mm/h)时,虽然间歇期也有物理结皮形成,但受雨滴打击破坏,坡面条件与连续性降雨接近,产流产沙、细沟形态的各项指标误差均较小,为 $3\% \sim 12\%$,对试验结果的影响较小。

(3)在采用间歇性降雨试验方法时,建议采用高雨强试验条件(≥ 90 mm/h),才能准确模拟天然降雨下黄土坡面的细沟侵蚀过程。且在高雨强时应控制间歇性降雨试验每一阶段的降雨历时,避免累积产沙量的持续快速增长及细沟侵蚀剧烈发展,误差进一步增大。

参考文献:

- [1] 盛贺伟,孙莉英,蔡强国.黄土坡面细沟发育形态对侵蚀特征的影响[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(4): 679-688.
- [2] Wang X, Zhao X L, Zhang Z X, et al. Assessment of soil erosion change and its relationships with land use/cover change in China from the end of the 1980s to 2010 [J].Catena,2016,137:256-268.
- [3] He J J, Sun L Y, Gong H L, et al. Laboratory studies on the influence of rainfall pattern on rill erosion and its runoff and sediment characteristics[J].Land Degradation and Development,2017,28:1615-1625.
- [4] Wirtz S, Seeger M, Ries J B. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion process[J]. Catena,2012,91:21-34.
- [5] Sun L, Fang H, Deli Q I, et al. A review on rill erosion process and its influencing factors[J].Chinese Geographical Science,2013,23(4):389-402.
- [6] Chen X Y, Huang Y H, Zhao Y, et al. Analytical method for determining rill detachment rate of purple soil as compared with that of loess soil[J].Journal of Hydrology,2017,549:236-243.
- [7] 裴冠博,龚冬琴,付兴涛.晋西黄绵土坡面细沟形态及其

对产流产沙的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):79-84,182.

- [8] 和继军,宫辉力,李小娟,等.细沟形成对坡面产流产沙过程的影响[J].水科学进展,2014,25(1):90-97.
- [9] 陈俊杰,孙莉英,蔡崇法,等.不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素[J].土壤学报,2013,50(2):281-288.
- [10] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.雨滴打击对黄土坡面细沟侵蚀特征的影响[J].农业机械学报,2015,46(8):104-112,89.
- [11] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J].农业机械学报,2015,46(7):162-170.
- [12] 王洁,胡少伟,周跃.人工模拟降雨装置在水土保持方面的应用[J].水土保持研究,2005,12(4):188-190,194.
- [13] 柯奇画,张科利.人工降雨模拟试验的相似性和应用性探究[J].水土保持学报,2018,32(3):16-20.
- [14] 赵玉丽,牛健植.人工模拟降雨试验降雨特性及问题分析[J].水土保持研究,2012,19(4):278-283.
- [15] 吴淑芳,张永东,卜崇峰.黄土细沟侵蚀演化过程及其水力学特性试验研究[J].泥沙研究,2015,40(6):72-80.
- [16] 吴淑芳,刘政鸿,霍云云,等.黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟[J].土壤学报,2015,52(1):48-56.
- [17] 郭慧莉,孙立全,吴淑芳,等.黄土高原地区鱼鳞坑坡面侵蚀演化过程及水力学特征[J].土壤学报,2017,54(5):1125-1135.
- [18] 孙立全,吴淑芳,郭慧莉,等.人工掏挖坡面侵蚀微地貌演化及其水力学特性分析[J].水科学进展,2017,28(5):720-728.
- [19] 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.
- [20] 白清俊,马树升.细沟侵蚀过程中水流跌坑的发生机理探讨[J].水土保持学报,2001,15(6):62-65.
- [21] 乔宇,徐先英.干旱荒漠区物理结皮的土壤水文效应[J].中国农学通报,2015,31(7):206-211.
- [22] 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等.降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J].农业机械学报,2014,45(2):169-175.
- [23] 程琴娟,蔡强国,李家永.表土结皮发育过程及其侵蚀响应研究进展[J].地理科学进展,2005,24(4):114-122.
- [24] 吴发启,范文波.土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响[J].中国水土保持科学,2005,3(2):97-101.