

降雨和汇流条件下浅沟侵蚀过程试验研究

吴桐嘉, 潘成忠, 罗明杰, 刘春雷, 汪啸宇

(北京师范大学 水科学研究院 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875)

摘 要: [目的] 探究含沙水流汇入对含有浅沟微地形的裸土和草地坡面的侵蚀产沙过程的影响, 为该地区浅沟侵蚀治理提供理论依据, 并为坡沟系统的土壤侵蚀模型建立奠定基础。[方法] 通过降雨和放水相结合的野外模拟试验和人工建筑的浅沟模型开展研究。[结果] 含沙水流汇入裸土浅沟坡面的侵蚀量增加了 15%~58%, 而对草地浅沟坡面的侵蚀影响不显著, 说明草地恢复对于减少由汇流作用的侵蚀具有显著效益。试验条件下裸坡和草地坡面泥沙浓度都在产流开始时达到最大然后逐渐降低, 最后达到稳定, 然而含沙水流汇入使得泥沙浓度达到稳定所需的时间延长。含沙水流汇入能够显著增加浅沟发育速度, 特别是浅沟沟宽和下切深度增加明显, 草地恢复可以显著减缓浅沟的下切侵蚀, 进而减缓浅沟的发育速度。对于裸土和草地浅沟坡面, 含沙水流汇入显著增加了浅沟部位流速, 尤其是草地浅沟部位各坡段流速平均增幅达到了 55%。[结论] 增加含沙水流汇入会显著增加裸坡坡面上的浅沟侵蚀量和浅沟的发育速度, 而对草地坡面上浅沟的侵蚀和发育影响不显著。

关键词: 侵蚀; 浅沟; 含沙水流; 草地; 模拟降雨

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)04-0022-08

中图分类号: S157

文献参数: 吴桐嘉, 潘成忠, 罗明杰, 等. 降雨和汇流条件下浅沟侵蚀过程试验研究[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 22-29. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2019. 04. 004; Wu Tongjia, Pan Chengzhong, Luo Mingjie, et al. Experimental study on ephemeral gully erosion processes under simulated rainfall and silt-laden inflows[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 22-29.

Experimental Study on Ephemeral Gully Erosion Processes Under Simulated Rainfall and Silt-laden Inflows

Wu Tongjia, Pan Chengzhong, Luo Mingjie, Liu Chunlei, Wang Xiaoyu

(College of Water Sciences, Key Laboratory for Water and Sediment Sciences,
Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] The influences of silt-laden inflow on ephemeral gully erosion process of bare slope and grassland slope were studied in order to provide theoretical basis for soil erosion control of ephemeral gully and lay a foundation for establishing a soil erosion model for loess areas. [Methods] A series of field rainfall simulation experiments were conducted on an artificial ephemeral gully (EG) to investigate the impacts of upslope inflow on runoff and erosion processes within the EG. [Results] The silt-laden inflow significantly increased the erosion of the bare slope with ephemeral gully by 15%~58%, and had no significant effect on the erosion of the grassland with ephemeral gully, indicating that grassland had significant benefits for reducing the erosion caused by the convergence. Under the experimental conditions, the sediment concentration of the bare slope and the grassland slope reached the maximum at the beginning of the runoff and then gradually decreased, and finally kept stable. However, the time required for the sediment concentration to stabilize under the silt-laden inflow increased. The silt-laden inflow accelerated the development of ephemeral gully, especially on the width and the depth of the ephemeral gully. While the grassland significantly slowed down the erosion

收稿日期: 2019-01-22

修回日期: 2019-03-22

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土丘陵沟壑区退耕植被对坡沟系统侵蚀产沙的阻控机制与定量评估”(41771305); 国家重点自然科学基金项目“退耕驱动近地表特性变化对侵蚀过程的影响及其动力机制”(41530858)

第一作者: 吴桐嘉(1993—), 女(汉族), 内蒙古自治区乌海市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。E-mail: 201621470012@mail.bnu.edu.cn。

通讯作者: 潘成忠(1980—), 男(汉族), 江苏省灌云县人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持、水环境、流域生态与管理研究。E-mail: pancz@bnu.edu.cn。

of the ephemeral gully, especially the development of ephemeral gully under cut retarded. For the bare slope and grassland with ephemeral gully, the silt-laden inflow increased the flow velocity of the ephemeral gully, especially the average velocity of the grassland with ephemeral gully increased by 55%. [Conclusion] The amount of ephemeral gully erosion and the speed of ephemeral gully development on bare slope increased with increasing silt-laden inflow, while the impact on the erosion and development of the ephemeral gully on grassland slope was not significant.

Keywords: soilerosion; ephemeral gully; silt-laden inflow; grassland; simulated rainfall

土壤侵蚀是世界范围内的主要环境问题^[1]。我国黄土高原地区水土流失严重,是世界上土壤侵蚀问题最严重的地区之一^[2]。浅沟侵蚀在黄土丘陵沟壑区占有重要地位,其侵蚀量约占沟间地总侵蚀量的 70%^[3]。相对于黄土高原地区片蚀和细沟侵蚀研究^[4,5],浅沟侵蚀研究还有待加强^[6],而浅沟侵蚀对于明晰黄土高原地区的坡沟侵蚀产沙机制具有重要意义。目前,对浅沟侵蚀发生的临界坡长与坡度及其影响因素、汇水面积、浅沟横断面形态等方面的调查统计分析已经取得了一定进展^[7-9]。现有研究将浅沟侵蚀的影响因素总结为地形因子、侵蚀动力因子阻控因子^[7]。秦伟等^[8]基于 RS 和 GIS 技术提取了地形参数,认为坡长、坡度和汇水面积决定了浅沟侵蚀的发展。基于已有研究和室内模拟降雨开展小尺度的浅沟侵蚀模拟试验,浅沟侵蚀预报模型的建立也取得了一定进展^[7,10-11]。但是,关于坡面含沙水流汇入对野外坡耕地浅沟的径流产沙和侵蚀形态综合影响方面的研究还较少^[7-11]。在当前国家实行退耕还林还草这一重大生态工程背景下,植被恢复会显著改变浅沟

的来水来沙条件以及浅沟的侵蚀输沙过程^[12],研究浅沟侵蚀产沙变化规律对含沙水流的响应,对于如何科学合理布设浅沟及坡面林草措施具有重要指导意义。为此,本研究通过野外模拟试验减少土壤扰动,对比研究降雨和有含沙水流汇入对浅沟侵蚀产沙变化规律,揭示裸坡和退耕还林还草坡面上含沙水流的汇入对浅沟侵蚀产沙过程及浅沟形态发育的影响,以期为该地区浅沟侵蚀治理提供理论依据,并为坡沟系统的土壤侵蚀模型建立奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验土壤

野外试验在北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室怀来野外试验站(40°20'N,115°37'E)开展。

试验站内径流小区大小为 2 m×5 m,其土壤类型为次生黄土母质发育的褐土,土壤容重为 1.40 g/cm³。土壤的基本性质详见表 1,土壤粒径采用 MS 2000 型激光粒度分析仪测定。

表 1 试验土壤机械组成

机械组成/ mm	石砾 (>2)	粗砂粒 (2~0.25)	细砂粒 (0.25~0.05)	粗粉粒 (0.05~0.02)	细粉粒 (0.02~0.002)	黏粒 (<0.002)
比例%	0	6	32.7	30.4	11.5	19.5

1.2 试验装置

为了模拟浅沟侵蚀,在径流小区内部人工构建了一个浅沟模型(长 4.5 m,宽 1 m,深 0.3 m),横截面近似于 V 形,两侧宽为 0.5 m(图 1)。

径流小区的顶部安装了由聚氯乙烯(PVC)材料(长 2.0 m,直径 0.15 m)制成的稳流管,稳流管内侧有一排等间距(1 cm)的小圆孔。紧靠稳流管下端装有长 0.5 m,宽 2 m 的稳流板。

坡面汇水从进水管中进入稳流管通过小圆孔和稳流板溢流过渡后流入小区。

该装置有效地保证了水流均匀、稳定的流入小区。降雨器采用的是中国水土保持研究所开发的便携式降雨模拟器。

1.3 试验设计

考虑到黄土高原地区短历时暴雨侵蚀的特点,选取了 60 mm/h 的降雨强度和 15 L/min 的放水流量,水流含沙浓度为 20,40 和 80 g/L。为了保证浅沟侵蚀充分发育,降雨和放水历时都为 60 min。由于浅沟通常出现在 15°~35°的坡面上^[8],因此本文试验坡度设定为浅沟出现的临界坡度 15°。为了研究已进行退耕还林还草坡面上的浅沟对含沙水流汇入的响应,在径流小区内种植了当地常见牧草波斯菊。波斯菊具有较高的耐旱性和景观效益,广泛应用于减少洪水和侵蚀风险,已有研究表明其具有较好的径流泥沙拦截效益^[13]。经过两年的生长,草种高约 30 cm,目视观察覆盖率为 50%。具体试验设计详见表 2。



图 1 浅沟侵蚀径流小区示意图

表 2 试验设计参数

试验序号	植被盖度/ %	降雨量/ (mm·h ⁻¹)	放水流量/ (L·min ⁻¹)	含沙浓度/ (g·L ⁻¹)
B ₁	0	60	0	0
B ₂	0	60	0	0
B ₃	0	60	0	0
IB ₁	0	60	15	20
IB ₂	0	60	15	40
IB ₃	0	60	15	80
G ₁	50	60	0	0
G ₂	50	60	0	0
G ₃	50	60	0	0
IG ₁	50	60	15	20
IG ₂	50	60	15	40
IG ₃	50	60	15	80

为了研究小区内不同部位的侵蚀情况,在小区浅沟部位布设了 45 根侵蚀针。侵蚀针列间距为 0.25 m,行间距为 0.5 m(图 1)。每根侵蚀针刻度范围为 -15~15 cm,最小间隔为 0.5 cm。在每次试验之前,将侵蚀针垂直插入倾斜坡面,使“0”刻度线恰好落在坡面上^[14]。同时,为了减少侵蚀针的迎水面积,使侵蚀针宽度方向和小区长度方向平齐。为了最大限度的降低风的扰动,所有的试验均在夏季凌晨 5 点左右开展,此时风速基本小于 0.3 m/s。每次试验结束后,将小区自然放置一段时间,待小区的土壤不再粘结成块后,将表层土壤(20 cm)深翻 2~3 次,取小区周围表土适量回填和压实,同时保证小区内浅沟尺寸和试验前保持一致。随后,每天测量 3 次小区土壤含水量,直到土壤含水量为 12%左右,在第 2 天进行下 1 次试验。试验开始前,校准降雨强度和均匀性以满足试验要求。每场试验主要分为 3 个步骤,第 1 步是采用 60 mm/h 雨强进行 60 min 降雨。试验过程中,开始产流后前 20 min,由于径流变化幅度较大,每隔

1 min 在径流小区出口处用塑料桶接一组径流样,20 min 后径流变化相对不大,每隔 3 min 接一组径流样,试验结束到产流停止再接一组径流样,共计 21 组径流样。用染色剂(KMnO₄)法测定两侧坡面和浅沟流速,并用数码照相机每隔 5 min 拍照一次,记录浅沟形态的演变过程。对每组径流样,测量其体积,用烘干法测定泥沙量。第 2 步是进行数据记录和准备,时间为 60 min。降雨结束后,拍照记录浅沟形态,用方格纸勾画浅沟形态,用于浅沟形态特征和侵蚀空间分布分析。记录侵蚀针读数,用于浅沟部位侵蚀量的计算。读取每根侵蚀针正、反两面标志线出露高度或掩埋深度,出露高度(净侵蚀)记为正,掩埋深度(净沉积)记为负,仍在坡面(侵蚀沉积平衡记为 0)。侵蚀针正反两面读数差异较大时,取平均值作为最终读数。标定放水流量,为下一步试验进行准备。第 3 步是进行降雨(60 mm/h)和放水(15 L/min)相结合的模拟试验,时间为 60 min。径流样,流速和浅沟形态测定方法与第一步相同。

1.4 数据处理与分析

利用侵蚀针法计算浅沟部位的侵蚀量,其原理是每 1 根侵蚀针的读数代表其控制面积内的平均侵蚀(沉积)深度。侵蚀针法^[15-16]具体表达式为:

$$M=\frac{s}{n\cos\theta}\sum_{i=1}^nd_i\gamma \tag{1}$$

式中: M ——一次试验坡面总侵蚀产沙量(g); i ——侵蚀针编号; d_i ——试验结束后*i*号侵蚀针的读数(cm); n ——侵蚀针总数量; γ ——土壤容重(g/cm³); s ——坡面水平投影面积(cm²); θ ——坡度。

2 结果与分析

2.1 浅沟侵蚀量

裸坡和草地坡面在降雨条件下的侵蚀产沙量结

果详见表 3。由表 3 可知,种植了波斯菊的径流小区浅沟部位、坡面部位和整个小区的侵蚀产沙量分别减少了 6.5,1.6 和 2.6 倍。可以看出草地恢复能够在降雨条件下显著减少浅沟部位的侵蚀量。这主要是因为植被能够拦截雨滴减小雨滴动能,同时植被的恢复能够改变土壤结构,降低土壤可蚀性,进而减少径流泥沙。其他研究者在不同地区、不同植被类型及不同气候条件也得出了相似结论^[17-19]。和只降雨条件下不同,增加含沙水流汇入后草地对坡面部位的减沙效益更显著,对浅沟部位的减沙效益降低,径流小区浅沟部位的、坡面部位和整个小区的侵蚀产沙量分别减少了 3.4,11.6 和 7.2 倍。这是因为波斯菊的茎秆会阻碍径流,改变径流的流向,水流更容易汇入到中部的浅沟,减少了坡面部位的侵蚀。同时增加了含沙水流和坡面水流的汇入后,浅沟部位汇集的水流增加,流速增加,径流的搬运能力增强,草地对泥沙的拦截效益下降。因此在降雨加放水条件下草地对浅沟部位泥沙拦截效益下降,对坡面部位的泥沙拦截效益增加。增加含沙水流汇入,对裸坡和草地浅沟坡面的侵蚀量都有显著影响(表 3)。裸坡上增加了含沙水流汇入,整个小区侵

蚀产沙量增加,是只降雨条件下的 1.15~1.58 倍,其中坡面部位的侵蚀量显著增加。这一结论与其他研究者^[20-21]的研究结果相似,增加坡面水流汇入会导致浅沟侵蚀产沙量显著增加。然而在草地坡面上,增加含沙水流整个小区的侵蚀产沙量并不是呈现出单一的增加趋势,在含沙浓度为 20 和 40 g/L 时整个小区的侵蚀产沙量分别下降了 33%和 15%,其中坡面部位的侵蚀产沙量显著减少。这可能是因为草地改变了土壤结构,增加土壤抗蚀能力,在经过一个小时后的降雨,小区表层易剥离搬运的土壤减少,再进行降雨加放水试验也无法侵蚀剥离下层土壤。

根据表 3 对比浅沟侵蚀在不同植被盖度、降雨和含沙水流条件下对坡面总侵蚀产沙量的贡献率可以发现,裸坡上浅沟部位侵蚀量占总产沙量的 43%,草地条件下仅为 21%;增加坡面含沙水流汇入后,裸坡上浅沟部位的侵蚀产沙量占总产沙量的 31%,草地条件下为 48%,基本不超过 50%。在浅沟和坡面投影面积相同的情况下,径流小区内的总侵蚀产沙量并不是主要受浅沟侵蚀量的影响,而是受到坡面部位侵蚀影响显著。

表 3 径流小区内部各侵蚀量

试验序号	侵蚀量/kg				试验序号	侵蚀量/kg			
	浅沟	坡面	整体	比例		浅沟	坡面	整体	比例
B ₁	43.40	44.44	87.34	50%	IB ₁	79.10	179.60	258.70	29%
B ₂	53.90	87.22	141.12	38%	IB ₂	60.20	250.10	310.30	26%
B ₃	53.90	78.16	132.06	41%	IB ₃	95.20	164.23	259.43	37%
平均	50.40	69.94	120.17	43%	平均	78.17	197.98	276.14	31%
G ₁	5.60	19.44	25.04	22%	IG ₁	7.00	15.48	22.48	31%
G ₂	7.84	33.80	41.64	19%	IG ₂	11.20	17.27	28.47	39%
G ₃	—	—	—	—	IG ₃	35.70	13.29	48.99	73%
平均	6.72	26.62	33.34	21%	平均	17.97	15.35	33.31	48%

2.2 浅沟侵蚀产沙过程

径流量和泥沙浓度随时间的变化过程,可以从一个方面反映土壤侵蚀的动态变化过程。图 2 描述了降雨条件下径流强度和泥沙浓度随降雨历时的变化趋势。总体上,裸坡和草地坡面上,径流量在降雨条件下表现出一致的规律:随着降雨时间的增加,径流强度逐渐增加,然后达到稳定状态。不同的是,草地拦蓄径流效应显著,草地平均径流为 4.73 L/min,最大径流为 5.50 L/min;而裸坡坡面上最大径流能够达到 8.70 L/min,平均径流为 7.41 L/min。草地坡面的径流拦蓄率(径流后期坡面径流基本稳定后的拦蓄率)为 36%。增加含沙水流汇入后(图 3),裸坡坡面上最大径流能够达到 27.51 L/min,平均径流为 24.22 L/min,草地平均径流为 18.03 L/min,最大径流为 21.23 L/min,与裸坡相比,草地的稳定径流速

率降低了 26%。这是因为草覆盖降低了雨滴的动能防止表面土壤密封,草地增加了表面粗糙度阻碍了陆地流动并增加了渗透时间,同时草根提高了土壤入渗能力^[22]。其他研究者^[23-24]在降雨条件下测得不同类型植被不同盖度的草地降雨拦蓄率为 14%~75%,与本研究结果相似。如图 2—3 所示,在只降雨条件和降雨加放水条件下,泥沙浓度都表现出相似的变化趋势,即泥沙浓度在产流开始时达到最大值,然后逐渐降低,最后达到稳定状态,这与 Martinez-Mena 等^[25]人的研究结果相同。不同的是裸坡和草地坡面泥沙浓度达到稳定所需的时间不同,降雨条件下,裸坡达到稳定时所需要的为 20~30 min,增加了含沙水流汇入后达到稳定所需的时间更久,为 40~50 min;而草地泥沙浓度在两种条件下达到稳定所需要的时间都为 10 min 左右。

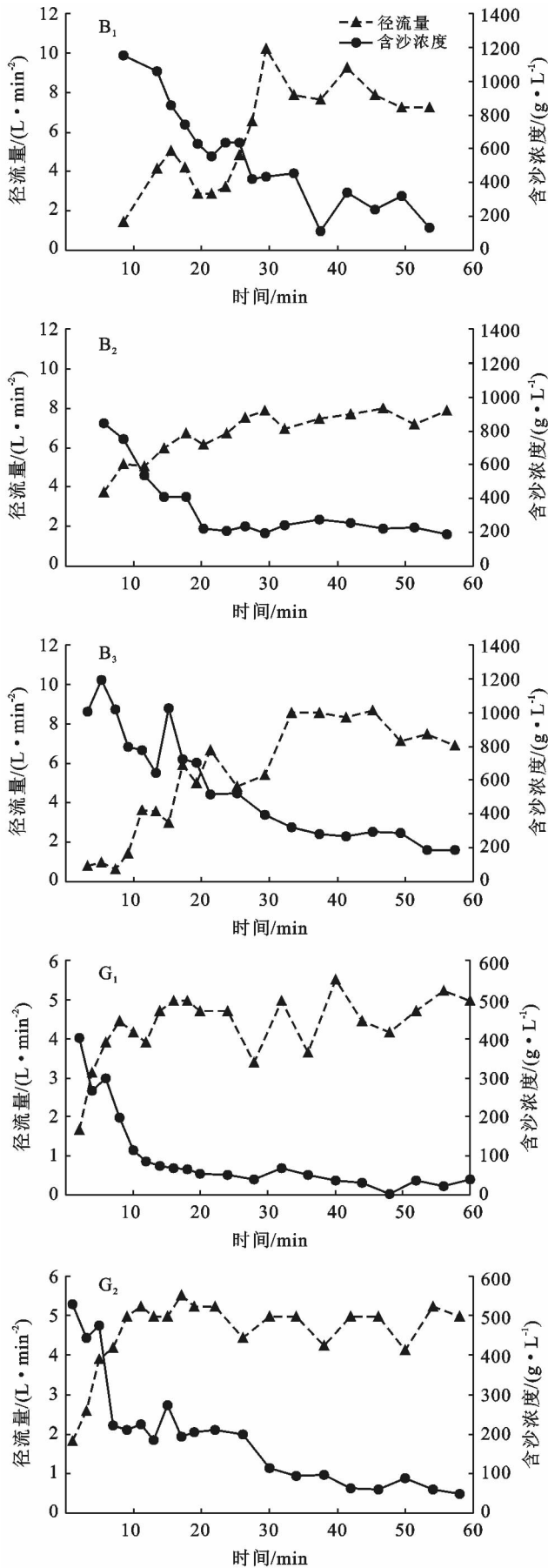


图 2 降雨条件下径流强度和泥沙浓度随时间变化

2.3 浅沟形态

在只降雨和降雨加放水条件下的浅沟发育形态如图 4 所示。在已经形成的浅沟上进行降雨试验,会首先在两侧坡面以及中间的浅沟沟槽上形成一些断断续续的不连续的细沟,首先在下坡段出现,随着径流雨水的汇集,逐步发生下切侵蚀和溯源侵蚀,向坡中及坡上部位发育贯通。增加含沙水流汇入后,可以发现浅沟发育速度明显增快,新生成的细沟迅速贯通整个坡面,沟道下切明显,形成大量的跌坎,因此增加含沙水流汇入后,无论是草地还是裸坡浅沟部位的侵蚀都有明显的增加。在试验条件下浅沟的沟壁扩张都不明显,浅沟沟壁上出现了很多细小的纹路和细沟,并且根据侵蚀针的读数可以发现沟壁上存在面蚀,但是浅沟的横向扩张并不明显,其主要的侵蚀形式为下切侵蚀和溯源侵蚀。和康宏亮等^[26]人通过室内降雨和野外放水冲刷相结合的模拟试验结果不同,他们发现浅沟平均沟宽及沟深变化范围分别为 4.45~17.09 cm 和 1.88~10.15 cm,沟宽变化幅度更大。这可能是因为康宏亮等人试验模拟的是雏形浅沟,雏形浅沟发育初期横向侵蚀明显,而已经具有明显宽度和深度的浅沟再次侵蚀发育则以下切侵蚀和溯源侵蚀为主。结合图 4 和表 4 可以发现,草地恢复显著减缓了浅沟的发育速度,尤其是浅沟的下切侵蚀,沟道平均深度减少 88%,沟道的宽度减少了 25%。

表 4 浅沟部位上形成的沟道形态特征

试验序号	支沟数量	支沟侵蚀量/kg	沟道平均宽度/cm	沟道平均深度/cm
IB ₁	0	0	14.13	2.51
IB ₂	2	1.32	13.27	4.78
IB ₃	0	0	16.33	4.63
IG ₁	4	0.21	10.54	0.37
IG ₂	5	0.33	11.89	0.53
IG ₃	4	0.65	10.21	0.49

2.4 浅沟流速

坡面径流流速是影响坡面侵蚀的主导因子^[27],流速大小的变化影响着径流携带泥沙的能力。如图 5 所示,只降雨条件下,随着水流逐渐汇集,受到的重力分力增加,水流流速加快,流速沿坡面向下基本呈现增加趋势。裸坡上浅沟部位流速最大为 0.27 m/s,草地上浅沟部位的最大流速为 0.22 m/s,在坡面各坡段上草地浅沟部位流速和坡面部位的流速分别低于裸坡上相应部位的流速。这是因为草地的恢复提高了土壤的入渗能力,降低了坡面产流,进而使得径流流速减小。

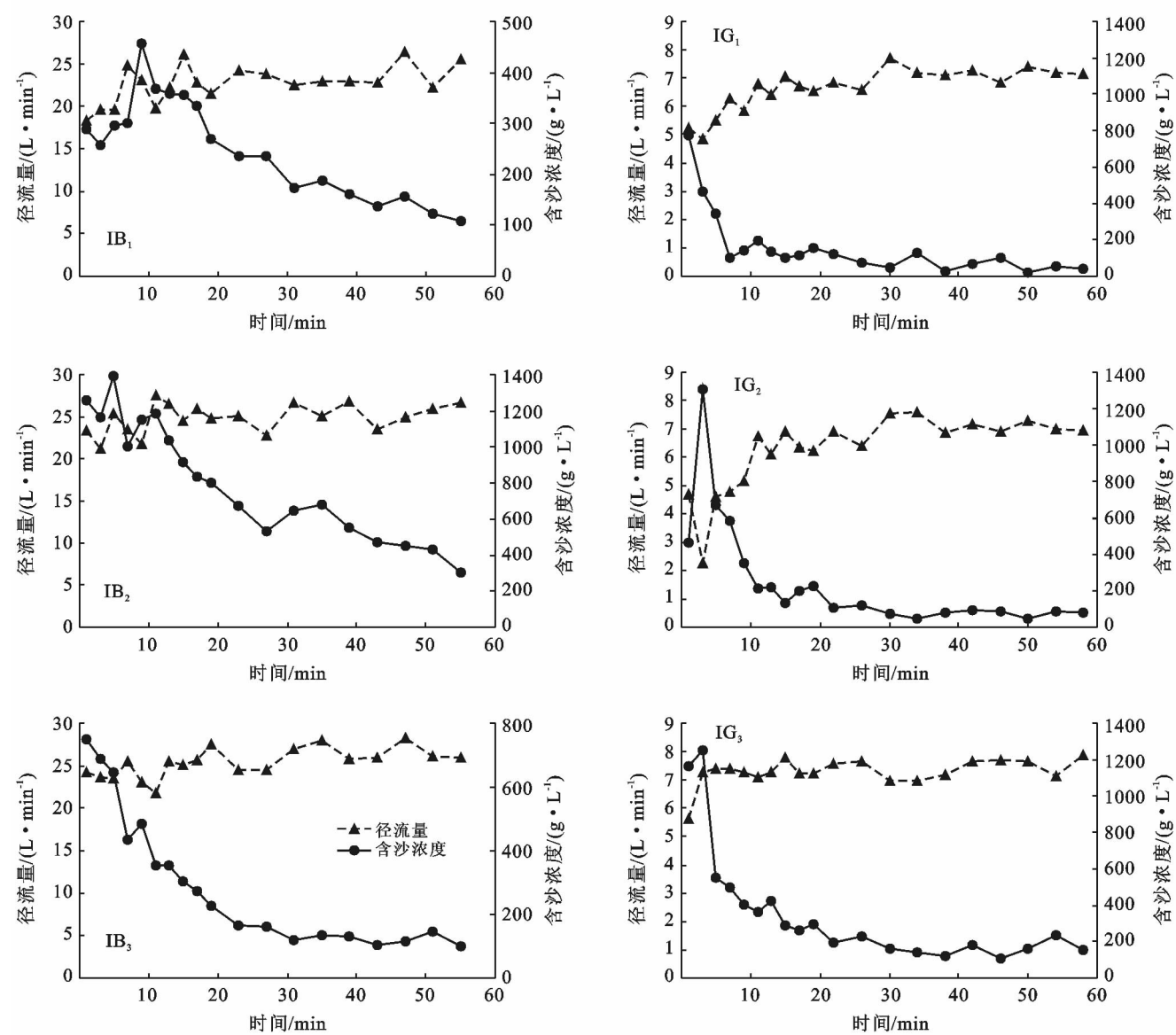


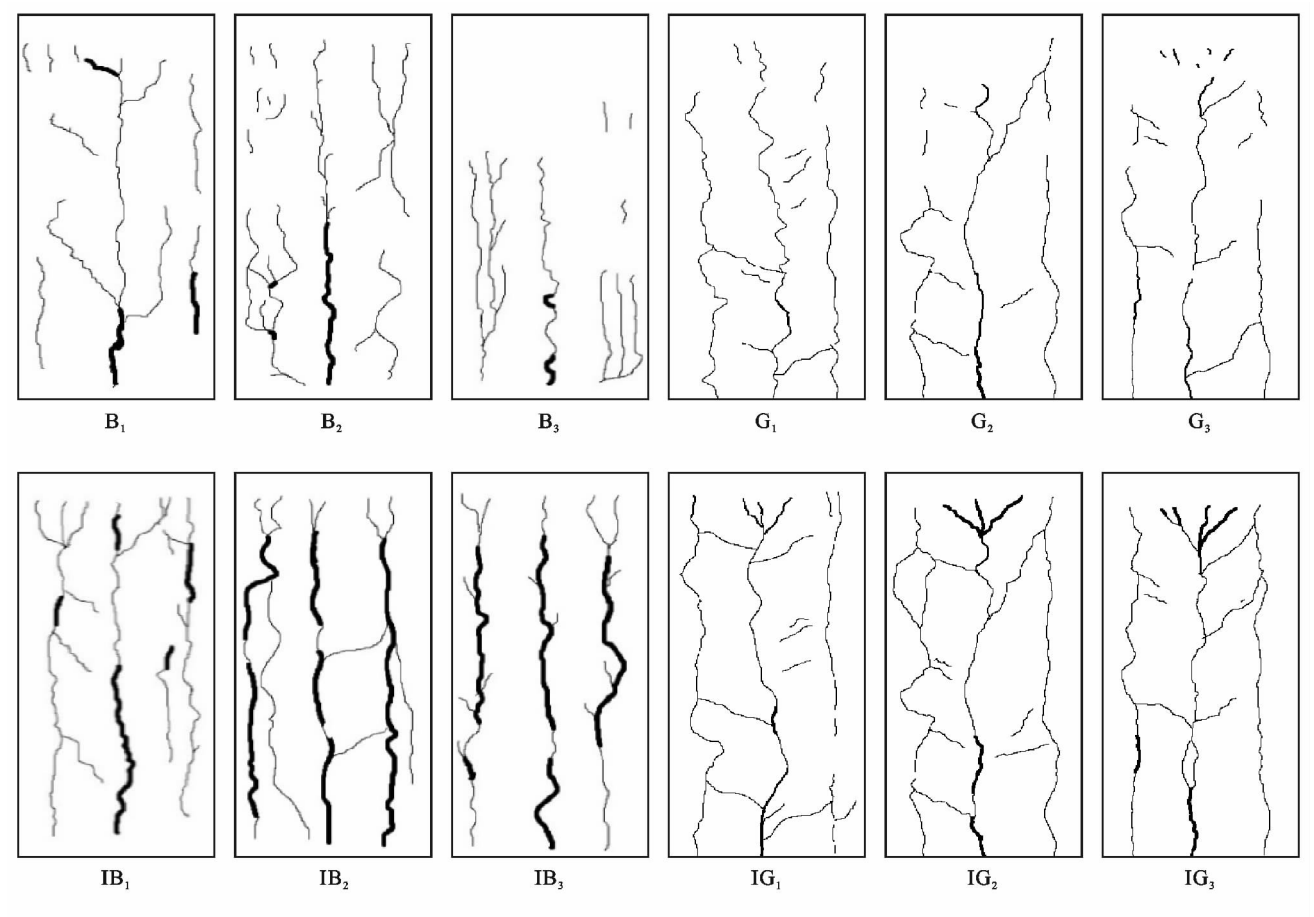
图 3 降雨加放水条件下径流强度和泥沙浓度随时间变化

由于水流的含沙浓度对流速的影响较小,因此将不同浓度的含沙水流条件下各坡段的流速进行平均。从图 5 可以看出,增加了坡面含沙水流汇入后,裸坡上浅沟部位、坡面部位流速以及草地上浅沟部位 B,C 断面的流速略高于 D 断面的流速。主要是因为随着径流搬运能力的提升,逐渐剥蚀坡面表层的土壤,会在 D 坡段的坡面和浅沟沟槽上先出现细沟,以至于会造成土体的下切,在坡面和浅沟沟槽上产生细沟,短时间内增加了坡面流速,但随着沟道的发育,沟道内跌坎的发生使径流阻力增大,对径流产生消能作用,直到沟道逐渐贯通 B,C 断面、发生溯源侵蚀、产生沟道下切、沟壁扩张等剧烈的侵蚀过程,甚至引发沟壁塌陷等重力侵蚀,导致径流流速低于 B,C 断面。草地上坡面部位流速变化规律则相反,B,C 断面流速略低于 D 断面流速,这是因为坡面上汇集的水流收到波

斯菊茎秆的阻挡,改变了水流的流向汇入到浅沟中,因此坡面上的水流减少,坡面流速降低。

增加含沙水流汇入后,主要增加了坡上及坡中(A,B,C 段)的流速,D 坡段仅草地上浅沟部位流速增大,其他部位流速没有明显增加。且草地上浅沟最大流速为 0.29 m/s 略大于裸坡上浅沟流速,上文提到的草地坡面上大量水流汇入浅沟是草地浅沟流速大于裸坡的原因之一,裸坡条件下地表没有障碍物阻挡,坡面水流较为顺直,流速最大能够达到 0.21 m/s,而草地坡面流速最大仅为 0.13 m/s。另一个原因是,裸坡浅沟上新形成的沟道深度较大,且有大量的跌坎,也导致了裸坡浅沟水流流速较小。对比有无含沙水流汇入可以发现,草地上坡面流速增幅最小各坡段流速平均增加 0.01 m/s,草地上浅沟各坡段流速平均增加 0.09 m/s。草地上浅沟流速增幅最大,增长了

55%，而裸坡上浅沟和坡面流速增幅各坡段流速增幅相同都是 0.04 m/s。因此草地恢复改变了小区内水流的分配及径流流速，这也是上文所提到的增加含沙水流汇入后草地坡面侵蚀量减少的原因之一。



注：线段粗细表示沟道的宽度；粗线表示沟道宽度大于 15 cm，细线表示沟道宽度小于 15 cm。

图 4 降雨条件下和降雨十含沙水流条件下的浅沟形态

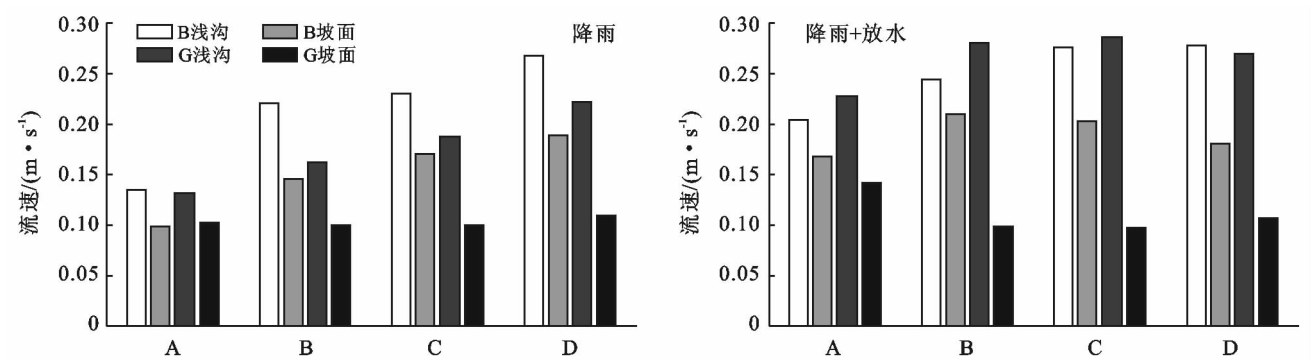


图 5 坡面各坡段径流流速变化过程

3 结论

(1) 含沙水流汇入显著增大了裸土浅沟坡面的侵蚀量，而对草地浅沟坡面的侵蚀影响不显著，这说明草地恢复对于减少由汇流作用的侵蚀具有显著效益。

(2) 裸坡和草地上泥沙浓度都在产流开始时达到最大值然后逐渐降低，最后达到稳定，但含沙水流汇入后，裸坡泥沙浓度达到稳定所需的时间延长。

(3) 含沙水流汇入能够显著增加浅沟发育速度，特别是浅沟沟宽和下切深度，但是草地恢复可以显著减缓浅沟的下切侵蚀，进而减缓浅沟的发育速度。

(4) 对于裸土和草地浅沟坡面,含沙水流汇入显著增加了浅沟部位流速,尤其是草地坡面上浅沟部位的流速,且对浅沟中上部位流速增幅更显著。

[参 考 文 献]

- [1] Sun Wenyi, Shao Quanqin, Liu Jiyuan, et al. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China[J]. *Catena*, 2014, 121: 151-163.
- [2] Cheng Hong, Zou Xueyong, Wu Yongqiu, et al. Morphology parameters of ephemeral gully in characteristics hillslopes on the Loess Plateau of China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 94(1): 4-14.
- [3] 张科利. 浅沟发育对土壤侵蚀作用的研究[J]. *中国水土保持*, 1991(4): 17-19.
- [4] Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, et al. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs[J]. *Catena*, 2003, 50(2/4): 91-133.
- [5] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[J]. *土壤学报*, 1956, 4(2): 99-115.
- [6] Castillo C, Gomez J A. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 160: 300-319.
- [7] Gong Jiaguo, Jia Yangwen, Zhou Zuhao, et al. An experimental study on dynamic processes of ephemeral gully erosion in loess landscapes [J]. *Geomorphology*, 2011, 125(1): 203-213.
- [8] 秦伟, 朱清科, 赵磊磊, 等. 基于 RS 和 GIS 的黄土丘陵沟壑区浅沟侵蚀地形特征研究[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 58-64.
- [9] 武敏, 郑粉莉, 黄斌. 黄土坡面汇流汇沙对浅沟侵蚀影响的试验研究[J]. *水土保持研究*, 2004, 11(4): 74-76, 90.
- [10] Liu S, Bliss N, Sundquist E, et al. Modeling carbon dynamics in vegetation and soil under the impact of soil erosion and deposition[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(2): 1074-1078.
- [11] Guo Mingming, Wang Wenlong, Li Jianming, et al. Effect of tillage on runoff and sediment yields and morphology development characteristic of ephemeral gully in loessial region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(15): 114-123.
- [12] 张光辉. 退耕驱动的近地表特性变化对土壤侵蚀的潜在影响[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15(4): 143-154.
- [13] Li Changjia, Pan Chengzhong. The relative importance of different grass components in controlling runoff and erosion on a hillslope under simulated rainfall[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558: 90-103.
- [14] 祁有祥, 杨建英, 辜再元, 等. 土壤侵蚀速率近景摄影测量法(CRPE)的野外试验研究[J]. *中国水土保持*, 2012(5): 36-37, 76.
- [15] 胡国庆, 董元杰, 史衍玺, 等. 坡面土壤侵蚀空间分异特征的磁性示踪法和侵蚀针法对比研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 53-57.
- [16] 杨建英, 祁有祥, 赵廷宁, 等. 基于侵蚀针和近景摄影测量的侵蚀速率测定方法试验研究[J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(3): 90-94.
- [17] Edeso J M, Merino A, Gonzalez M J, et al. Soil erosion under different harvesting managements in steep forestlands from northern Spain[J]. *Land Degradation & Development*, 1999, 10(1): 79-88.
- [18] Casermeiro M A, Molina J A, Caravaca M, et al. Influence of scrubs on runoff and sediment loss in soils of Mediterranean climate[J]. *Catena*, 2004, 57(1): 91-107.
- [19] Abrahams A D, Parsons A J, Luk S H. Hydrologic and sediment responses to simulated rainfall on desert hillslopes in southern Arizona [J]. *Catena*, 1988, 15(2): 103-117.
- [20] 车小力, 王文龙, 郭军权, 等. 上方来水来沙对浅沟侵蚀产沙及水动力参数的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(3): 26-31.
- [21] 郭军权, 刘敏, 王文龙. 上方来水对浅沟侵蚀产沙的野外放水冲刷试验研究[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(3): 49-52.
- [22] Bajracharya R M, Lal R. Crusting effects on erosion processes under simulated rainfall on a tropical Alfisol [J]. *Hydrological Processes*, 1998, 12(12): 1927-1938.
- [23] Pan Chengzhong, Shangguan Zhouping. Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grassplots under simulated rainfall conditions[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 331(1): 178-185.
- [24] Benito E, Santiago J L, De Blas E, et al. Deforestation of water-repellent soils in Galicia(NW Spain): Effects on surface runoff and erosion under simulated rainfall [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(2): 145-155.
- [25] Martínez-Mena M, Castillo V, Albaladejo J, et al. Relations between interrill erosion processes and sediment particle size distribution in a semiarid Mediterranean area of SE of Spain[J]. *Geomorphology*, 2002, 45(3): 261-275.
- [26] 康宏亮, 王文龙, 薛智德, 等. 冲刷条件下黄土丘陵区浅沟侵蚀形态及产流产沙特征[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(20): 161-170.
- [27] 夏卫生, 雷廷武, 刘春平, 等. 降雨条件下坡面薄层水流速度特征[J]. *水利学报*, 2004, 35(11): 0119-0123.