

工程堆积体坡面细沟侵蚀形态空间变化

牛耀彬¹, 吴旭¹, 高照良^{2,3}, 毕如田¹, 吕春娟¹

(1.山西农业大学 资源环境学院, 山西 太谷 030801; 2.中国科学院 水利部

水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为揭示工程堆积体坡面细沟形态空间变化规律以及细沟形态参数与坡度和流量之间的关系,选取 5,9,13,17 L/min 放水流量,对 24°,28°和 32°堆积体进行放水冲刷试验,运用沟长、沟宽、沟深等指标描述细沟发育过程。结果表明:在 24°和 32°堆积体坡面,放水流量最大时,沟长发育最快;在相同放水流量条件下,随着坡度增大沟长发育越变缓。在 24°堆积体坡面,沟宽在所有放水流量条件下呈现差异化发育,剧烈发育集中在 1~6 m,相对平稳发育在 6~9 m;在 28°和 32°堆积体坡面,放水流量为 5,9,13 L/min 时,沟宽在 3~9 m 发育相对平稳。在试验条件下,坡面沟深发育整体呈现减小趋势,波动变化集中在 1~5 m;在同一坡度条件下,平均沟宽和沟深均随放水流量增大而增大,而在同一流量条件下,除放水流量为 5 L/min 时,平均沟宽和沟深随坡度无显著差异,表明流量对细沟形态指标影响大于坡度。沟宽在坡面不同位置发育基本一致,沟深由坡上到坡下却逐渐变小,坡面细沟侵蚀形态可概化为“楔形”。研究结果对于生产建设项目工程堆积体坡面防护措施的合理配置具有重要意义。

关键词:土壤侵蚀; 侵蚀形态; 空间变化; 工程堆积体; 细沟

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)06-0032-07

Spatial Variation of Rill Erosion Morphology on the Slope of Engineering Accumulation

NIU Yaobin¹, WU Xu¹, GAO Zhaoliang^{2,3}, BI Rutian¹, LÜ Chunjuan¹

(1.College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu,

Shanxi 030801, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of

Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;

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

Abstract: In order to explore the spatial variation of rill morphology on slope of engineering accumulation, the relationships between rill morphology parameters and slope gradients and flow discharge were analyzed. In this study, scouring-erosion experiments were conducted on steep slopes of engineering accumulation under different slope gradients (24°, 28° and 32°) with different flow discharges (5, 9, 13 and 17 L/min). The indicators such as rill length, rill wide and rill depth were used to describe the rill development process. The results indicate that the rill length develops fastest when flow discharge is 17 L/min under the slope gradients of 24° and 28°, while the development of rill length becomes slower with the increase of slope gradients under the same flow discharge; the rill width presents a differentiated development on the slope of 24° under all flow discharges, which can be divided into two stages: a rapid development stage in 1~6 m and a subsequent slow development stage in 6~9 m, while the slow development in 3~9 m of rill width on the slope gradients of 24° and 28° is observed under discharges of 5, 9 and 13 L/min; under the experiment conditions, the development of rill depth on the slope shows a decreasing trend, and the fluctuation is concentrated in 1~5 m; the averages of rill width and depth both increase with increase of flow discharge under the same slope condition; in contrast, except for 5 L/min, there are no significant differences in average of rill width and

收稿日期:2021-01-16

修回日期:2021-02-06

资助项目:国家自然科学基金(41671283);山西省高等学校科技创新项目(2020L0141,2020L0146);山西农业大学科技创新基金(博士科研启动)项目(2020BQ38,2020BQ44);山西省优秀博士来晋工作奖励(SXYBK Y2019029)

第一作者:牛耀彬(1990—),男,甘肃天水人,讲师,博士,研究方向为工矿人为侵蚀过程和土地整治。E-mail:15529021275@163.com

通信作者:高照良(1969—),男,河南灵宝人,研究员,博士,博士生导师,主要从事农业水土工程和荒漠化防治研究。E-mail:gzl@ms.iswc.ac.cn

depth between slope gradients under the same flow condition, indicating that the effect of flow discharge on rill morphology parameters is greater than that of slope gradient; the rill width develops basically consistent in different positions of the slope, while the rill depth presents a decreasing trend from the upslope to downslope; the rill erosion morphology on the slope of engineering accumulation can be classified as ‘wedge-shape’. These results have important implication for the reasonable allocation of protective measures on slope of engineering accumulation in production and construction projects.

Keywords: soil erosion; erosion morphology; spatial variation; engineering accumulation; rill

工程堆积体已成为生产建设项目水土流失的重要来源^[1]。由于大面积工程开挖和重型机械碾压,导致堆积体土壤结构遭受破坏,加上植物根系缺乏,土壤抗冲性极差,极易产生水土流失^[2-3]。特别是在短历时、高强度降雨条件下,细沟在坡面迅速形成,引发剧烈的土壤侵蚀^[4-6]。工程堆积体坡面细沟侵蚀研究已成为生产建设项目土壤侵蚀研究的热点和趋势。因此,研究堆积体坡面细沟形态变化对于明确堆积体土壤侵蚀过程具有重要意义。

细沟侵蚀发生过程具有随机性,细沟侵蚀形态演化具有复杂性。主要表现为细沟形态通过分叉、分级、合并等影响着细沟内水流结构。细沟侵蚀过程中,集流槽出口产沙量、坡面流体力学特性、细沟侵蚀形态等相互作用组成了耦合系统。相关研究表明,细沟形态演变过程对产沙产生重要影响^[7-8],大多数研究集中关注细沟输沙过程,研究还涉及不同下垫面条件^[9]、细沟流水动力学特性^[10-11]、细沟形态特征等^[12]。现有研究主要运用两类参数刻画细沟形态特征,传统参数如细沟长度、宽度、深度、密度等,分形几何为代表的非线性量化参数如分形维数、拓扑参数、地貌信息熵等参数等^[13]。然而,现有研究大多集中在侵蚀结束后、或间歇性降雨条件下细沟形态特征的提取和量化^[14-16],而关于细沟形态动态变化过程,特别是细沟纵深发育过程及空间变化过程的研究较少。

因此,本文通过野外实地放水冲刷试验,模拟坡面径流条件下工程堆积体坡面细沟发育过程,基于传统细沟形态刻画参数,量化工程堆积体坡面细沟纵深发育过程,分析工程堆积体坡面细沟形态空间变化规律,以期为工程堆积体坡面防护措施的合理配置提供一定的理论参考。

1 材料与方法

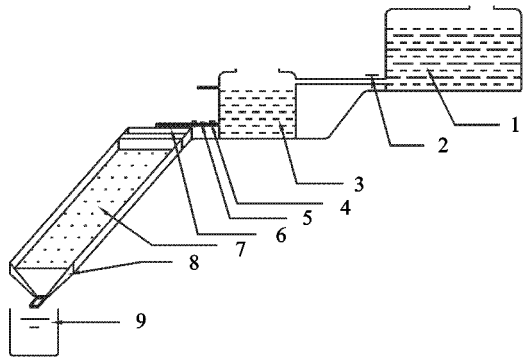
1.1 试验区概况

本试验在中国科学院长武黄土高原农业生态试验站(35°14′24.5″N,107°41′21.24″E,海拔1 107 m)进行,属典型高原沟壑区。该区属温带半湿润大陆性季风气候,多年平均降水量为579.6 mm,夏季常有洪

涝灾害,主要集中在7—9月,占全年降水量的55%左右。试验区塬川相间,沟谷发育,属旱作农耕区。森林类型属暖温带落叶阔叶林地带,主要毛白杨(*Populus tomentosa*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、白羊草(*Bothriochloa ischcemum*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)等。

1.2 试验设计与观测

试验小区建在人工开挖坡面上,小区弃土为当年回填土,回填土来自边坡开挖产生的弃土,坡面无植被覆盖,试验小区长10 m,宽1 m,覆土厚50 cm,依据黄土高原侵蚀性降雨的瞬时降雨强度标准($I_{15} \geq 0.852$ mm/min)和($I_5 \geq 1.520$ mm/min)及前期预试验,确定放水流量分别为5,9,13,17 L/min。野外调查发现堆积体边坡坡度大多集中在25°~40°,因此试验设定的坡度为24°,28°和32°。为了保证试验本底基本相同,试验开始前对所有试验小区同时进行弃土回填和坡面整理。由于坡面细沟发育随机性较强,为了保证试验结果的确定性,试验设计之初进行了大量野外调查,结果表明,在堆积体坡面平均每1 m宽分布1条完整细沟,所以在坡面整理时,人为使坡面整体呈现微凹型,确保坡面只发育1条细沟,既保证试验结果可靠性又便于观测和数据采集。试验开始前,先用撒水器均匀地在土表面撒水,使土壤表面充分饱和,但未发生产流,然后用塑料布覆盖24 h。用环刀取3个不同断面0—20 cm土壤测定初始土壤容重和含水率,土壤容重范围为1.24~1.42 g/cm³,平均为1.32 g/cm³,变异系数为4.54%。土壤质量含水率范围为15.20%~17.86%,平均为16.50%,变异系数为5.99%。堆积体土壤质地为砂壤,土石比超过9:1,粒径多在1 mm以下,而碎石粒径范围是指>10 mm的砾石,土壤颗粒粒径0.2~0.1 mm,0.1~0.05 mm,0.05~0.02 mm,0.02~0.01 mm,0.01~0.005 mm,0.005~0.002 mm,0.002~0.001 mm,<0.001 mm含量依次为0.37%,5.82%,32.09%,24.90%,11.38%,7.13%,5.82%,12.49%。试验小区及放水装置示意图见图1。



注:1.储水桶;2.水阀;3.恒压桶;4.水阀;5.流量计;6.稳流槽;7.试验小区;8.集流槽;9.集流桶。

图 1 试验小区及放水装置示意图

放水装置包括储水桶、恒压桶、稳流槽、水阀、流量计等,在小区上方采用恒压放水,保证出水量均匀。每次试验时间为 45 min。地表产流后开始计时,最初 3 min 内每隔 1 min 测定 1 次浑水总量、断面流速、流宽,用 500 ml 的泥样瓶收集径流泥沙样品,泥沙样品采用烘干法计算径流含沙量,3 min 后每隔 3 min 测定 1 次。在坡面连续布设测量断面,包括稳流槽出水口和集流槽入水口,共有 11 个测量断面,测量断面间隔 1 m,分别测量每个断面细沟的沟长、沟宽和沟深,当细沟发育到达集流槽入水口时,沟长不再

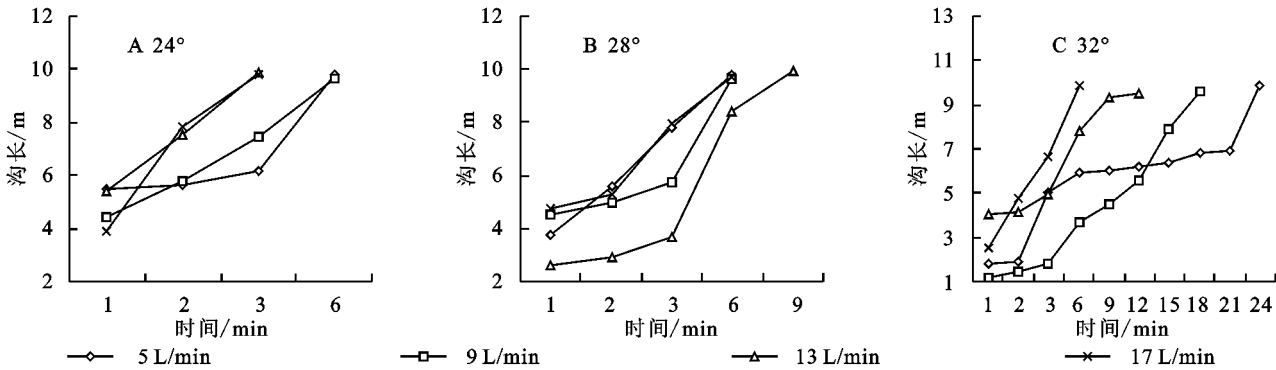


图 2 工程堆积体坡面沟长随产流时间的发育进程

从图 2A 可以看出,在 24°堆积体坡面,所有放水流量(5,9,13,17 L/min)条件下细沟沟长最终发育长度接近 10 m,放水流量为 13,17 L/min 时,细沟沟长发育稳定(接近 10 m)所需产流时间为 3 min,放水流量为 5,9 L/min 时,细沟沟长发育稳定所需产流时间为 6 min。相比之下,随着放水流量的增大,细沟沟长发育稳定所需时间缩短。从图 2B 可以看出,在 28°堆积体坡面,放水流量为 5,9,17 L/min 时,细沟沟长发育稳定所需产流时间为 6 min,放水流量为 13 L/min 时,细沟沟长发育稳定所需产流时间为 9 min,所有放水流量(5,9,13,17 L/min)条件下细沟沟长最终发育长度接近 10 m。从图 2C 可以看出,在 32°堆积体坡面,放水流量为 5 L/min 时,细沟沟长发

测量,试验用精度为 1 mm 的钢尺测量。在坡面布设 3 个流速和过水宽测量断面,间距为 3 m,坡面水流流速采用高锰酸钾染色示踪法,测距为 1.5 m,流速乘以修正系数 0.75 作为水流断面平均流速。在稳流槽中放置温度计读取每场试验前后水流的温度,用来计算水流雷诺数,试验供水引自王东沟民用水井。

2 结果及分析

2.1 工程堆积体坡面细沟形态指标特征

堆积体坡面细沟形成不仅为泥沙的输移提供了通道,而且细沟本身也是侵蚀泥沙的重要“物质源”,坡面细沟侵蚀沿流程方向(距坡顶不同距离处)发育不尽相同,研究坡面细沟形态指标(沟长、沟宽及沟深)沿流程方向的变化特征,对于揭示细沟侵蚀形态空间变化具有重要意义。因此,不同坡度和流量条件下工程堆积体坡面细沟形态沿流程方向变化特征分析如下。

2.1.1 沟长随产流时间变化特征 将所有试验坡度(24°,28°,32°)和放水流量(5,9,13,17 L/min)条件下不同时刻实测细沟长度绘制成图(图 2),因为试验小区坡长(10 m)限制,所有试验处理下细沟沟长发育的最终长度基本接近坡长。

育稳定所需产流时间为 24 min,放水流量为 9 L/min 时,细沟沟长发育稳定所需产流时间为 18 min,放水流量为 13 L/min 时,细沟沟长发育稳定所需产流时间为 12 min,放水流量为 17 L/min 时,细沟沟长发育稳定所需产流时间为 3 min,所有放水流量(5,9,13,17 L/min)条件下细沟沟长最终发育长度接近 10 m。

当放水流量为 5 L/min 时,随着坡度由 24°增大到 32°,细沟沟长发育稳定时间有 6 min 延长到 24 min,当放水流量为 9 L/min 时,随着坡度由 24°增大到 32°,细沟沟长发育稳定时间有 6 min 延长到 18 min,当放水流量为 13 L/min 时,随着坡度由 24°增大到 32°,细沟沟长发育稳定时间有 3 min 延长到 12 min,当放水流量为 17 L/min 时,随着坡度由 24°增

大到 32° , 细沟沟长发育稳定时间有 3 min 延长到 6 min, 因此, 在相同放水流量条件下, 随着坡度的增大, 细沟沟长发育稳定所需时间变长, 究其原因, 可能是用于分离土壤颗粒和搬运土壤颗粒的水流比例发生变化, 随着坡度增大, 坡面水流流速也相应增大, 从而使更多一部分水流用于搬运土壤颗粒, 相比之下分离土壤颗粒的水流减弱, 最终导致土壤颗粒的分离速率减小, 相应细沟沟长最终发育稳定所需时间变长。

总之, 在 24° 和 32° 堆积体坡面, 放水流量最大

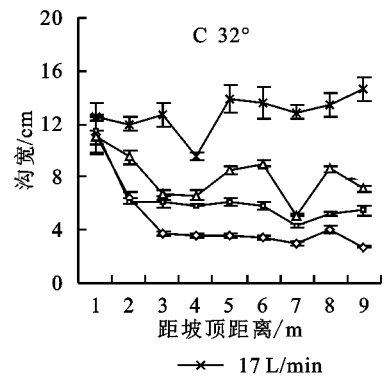
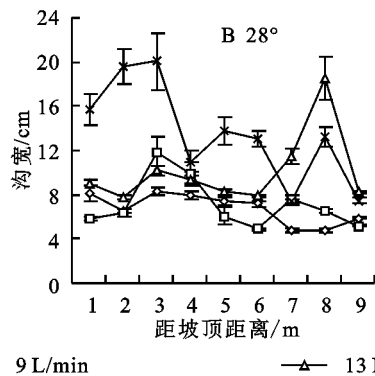
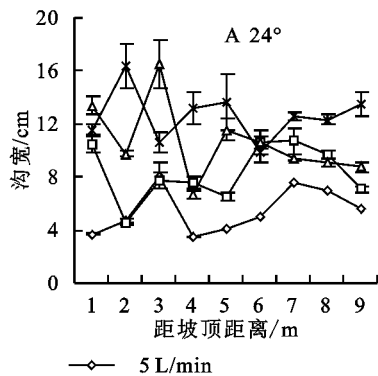


图3 工程堆积体坡面沟宽空间变化特征

从图 3A 可以看出, 在 24° 堆积体坡面, 所有放水流量 (5, 9, 13, 17 L/min) 条件下沟宽发育在坡面不同位置不同, 其中剧烈波动主要集中在坡面 1~6 m, 在 6 m 后, 所有流量条件下不同位置沟宽基本持平。这表明, 24° 堆积体坡面, 所有放水流量条件下, 沟宽在坡面不同位置呈现差异化发育。究其原因, 可能是径流路径在坡面细沟尚未形成阶段及其细沟形成初始阶段尚不稳定, 加上下垫面的非均质性, 从而导致对坡面上部出现差异化侵蚀, 随着细沟发育逐渐稳定, 坡下部沟宽大小基本一致。

从图 3B 可以看出, 在 28° 堆积体坡面, 放水流量为 5, 9, 13 L/min 时, 沟宽大小在坡面 3~9 m 发育基本一致, 其中放水流量为 13 L/min 时, 在坡面 6~8 m 沟宽较大。放水流量为 17 L/min 时, 不同位置沟宽大小剧烈波动, 在坡面 1~3 m 较大、4~7 m 较小、8~9 m 增大。这表明 28° 堆积体坡面, 放水流量为 5, 9, 13 L/min 时, 沟宽大小在坡面 3~9 m 发育相对一致。当放水流量为 17 L/min 时, 沟宽在坡面不同位置呈现差异化发育。究其原因, 可能是随着坡度增大, 侵蚀动能增强, 在 28° 堆积体坡面, 细沟侵蚀在坡面不同位置相对一致。

从图 3C 可以看出, 在 32° 堆积体坡面, 放水流量为 5, 9, 13 L/min 时, 不同位置沟宽大小不同, 在坡面 1~3 m, 沟宽较大, 3~9 m 沟宽较小且在坡面分布基本一致。放水流量为 17 L/min 时, 不同位置沟宽变化剧烈, 在坡面 4 m 较小, 4~9 m 增大。这表明放水流量为 5,

(17 L/min) 时, 细沟沟长发育最快, 在 32° 堆积体坡面, 放水流量最小 (5 L/min) 时, 细沟沟长发育最慢。在相同放水流量条件下, 随着坡度的增大, 细沟沟长发育稳定所需时间变长, 细沟沟长发育变缓。

2.1.2 沟宽空间变化特征 将所有处理条件下连续测量所得沟宽在 9 个观测断面 (共 11 个观测断面, 为了消除边界扰动效应, 数据分析选取除去两端的 9 个断面) 进行求均值, 并绘制得到每个坡度所有放水流量条件下沟宽随坡顶距离的变化图, 见图 3。

9, 13 L/min 时, 在坡面 3~9 m 沟宽均匀发育。

总之, 在 24° 堆积体坡面, 所有放水流量条件下, 沟宽在坡面不同位置呈现差异化发育, 1~6 m 剧烈发育, 6~9 m 发育相对平缓; 在 28° 和 32° 堆积体坡面, 放水流量为 5, 9, 13 L/min 时, 沟宽在坡面 3~9 m 发育相对平缓, 究其原因, 可能是随着坡度的增大细沟更容易形成稳定的径流路径。

2.1.3 沟深空间变化特征 将所有处理条件下连续测量所得沟深在 9 个观测断面 (共 11 个观测断面, 为了消除边界扰动效应, 数据分析选取除去两端的 9 个断面) 进行求均值, 并绘制得到每个坡度所有放水流量条件下沟深随坡顶距离的变化图, 见图 4。

从图 4A 可以看出, 在 24° 堆积体坡面, 所有放水流量 (5, 9, 13, 17 L/min) 条件下沟深发育在坡面不同位置不同, 但总体在坡面随着距坡顶距离增大呈现减小趋势, 其中 1~5 m 变化波动幅度最大, 当放水流量为 5 L/min 时, 5 m 后沟深变小。从图 4B 可以看出, 在 28° 堆积体坡面, 放水流量为 5, 9, 13 L/min 时, 沟深在坡面不同位置大小呈现明显减小趋势, 总体而言沟深 1~5 m 减小幅度最大, 沟深在特别是当放水流量为 17 L/min 时, 沟深大小沿坡面流程减小趋势更加明显。图 4C 可以看出, 在 32° 堆积体坡面, 放水流量为 13, 17 L/min 时, 沟深大小随距坡顶距离增大呈现明显减小趋势, 1~6 m 变化波动幅度最大, 但在 8 m 处出现增大, 放水流量为 5, 9 L/min 时, 沟深在 1~2 m 迅速减小, 随后基本保持恒定。

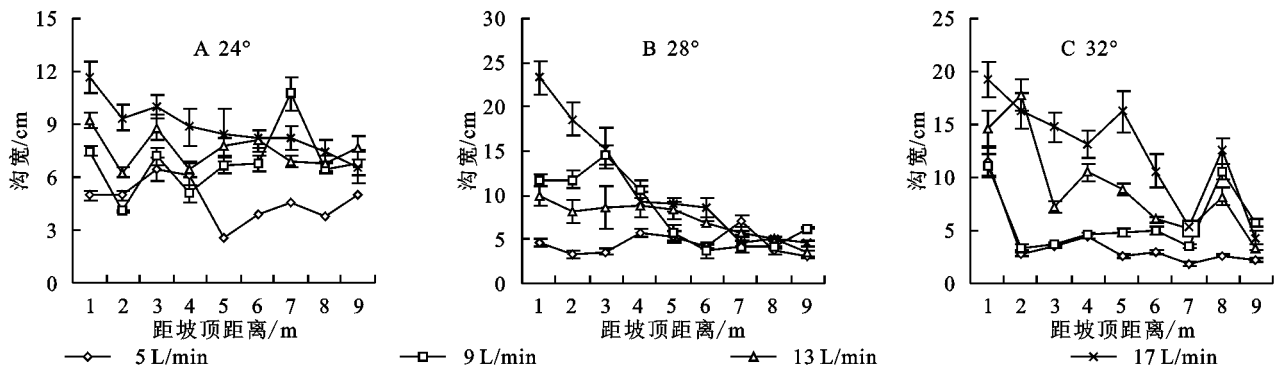


图 4 工程堆积体坡面沟深空间变化特征

总之,在试验坡度范围内,所有放水流量(5,9,13,17 L/min)条件下,沟深发育随距坡顶距离增大呈现减小趋势,沟深波动变化主要集中在1~5 m。

2.1.4 平均沟宽和沟深特征 分析表 1 可以得到,在同一坡度条件下,沟宽平均值随着放水流量的增大而增大,相比 5 L/min,当放水流量增大到 13,17 L/min 时对应沟宽显著($p<0.05$)增大;在同一流量条件下,除放水流量为 5 L/min 之外,沟宽平均值随坡度变化无显著差异($p>0.05$)。在 5,17 L/min 时,平均沟宽随坡度的增大先增后减,在 9,13 L/min 时,平均沟宽随坡度的增大而减小,可以看出,流量和坡度对沟宽的影响存在交互作用,在 5,17 L/min 时,沟宽的发育尺寸与坡度之间存在临界坡度,即 28°时沟宽发育尺寸最大,但在 9,13 L/min 时,沟宽的发育尺寸随坡度增大而减小,这表明,在小流量(5 L/min)和大流量(17 L/min)条件下,沟宽发育随坡度的增大存在临界值,但在中间流量(9,13 L/min)条件下,沟宽的发育随坡度增大而减弱。这表明在中间放水流量(9,13 L/min)条件下,侵蚀沟最宽的坡面不是 32°坡面也不是 24°坡面,而是中间 28°坡面。

在同一坡度条件下,沟深平均值随着放水流量的增大而增大,相比 5 L/min,当放水流量增大到 17 L/min 时对应沟深显著($p<0.05$)增大;在同一流量条件下,所有沟深平均值随坡度变化无显著差异($p>0.05$)。

在 5 L/min 时,平均沟深随坡度的增大而减小,在 9 L/min 时,平均沟深随坡度的增大先增后减,在 13 L/min 时,平均沟深随坡度的增大先减后增,在 17 L/min 时,平均沟深随坡度的增大而增大,这表明,在小流量(5 L/min)条件下,沟深在 24°堆积体坡面发育剧烈,而在大流量(17 L/min)条件下,沟深在 32°堆积体坡面发育剧烈,在 9,13 L/min 时,沟深剧烈发育坡度不确定。结果表明在放水流量为 5,17 L/min 条件下,侵蚀沟最深的坡面分别是在 24°和 32°堆积体坡面。

总之,随着坡度的增大,平均沟宽和沟深有增有减,但随着流量的增大,平均沟宽和沟深均增大,这表明,流量对细沟形态指标的影响大于坡度。

表 1 堆积体坡面细沟平均沟宽和沟深

坡度/(°)	放水流量/ (L·min ⁻¹)	平均 沟宽/cm	平均 沟深/cm
24	5	5.46±0.57ABc	4.69±0.40Ac
	9	8.32±0.72Ab	6.80±0.61Ab
	13	10.64±0.97Aa	7.54±0.35Aab
	17	12.61±0.63Aa	8.76±0.49Aa
28	5	6.76±0.46Ac	4.50±0.44Ab
	9	7.15±0.78Abc	8.10±1.36Aab
	13	10.06±1.13Ab	7.24±0.71Aab
	17	13.47±1.52Aa	10.94±2.22Aa
32	5	4.62±0.89Bc	3.85±0.99Ac
	9	6.27±0.68Abc	5.81±0.99Abc
	13	8.02±0.60Ab	9.08±1.53Aab
	17	12.80±0.48Aa	12.50±1.67Aa

注:不同大写字母表示同一放水流量下,不同坡度间沟宽/深差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示同一坡度下,不同放水流量间沟宽/深差异显著($p<0.05$)。

2.2 坡度和流量对细沟形态指标的影响

细沟形态指标沟宽和沟深在距坡顶不同位置而不同,在试验条件下,坡度和流量是控制变量,为了探究坡度对细沟形态指标沟宽和沟深的影响,所有试验场次细沟形态指标沟宽和沟深在不同坡度求取均值,并以细沟发育距坡顶距离为横坐标进行绘制见图 5。

为了探究流量对细沟形态指标沟宽和沟深的影响,所有试验场次细沟形态指标沟宽和沟深在不同放水流量求取均值,并以细沟发育距坡顶距离为横坐标进行绘制柱状图见图 6。

由图 5,6 可以看出,综合来看,无论是在不同坡度还是不同放水流量条件下,沟宽随距坡顶距离的增大呈现轻微波动变化,各处理下沟宽在坡面不同位置大小没有明显差异,沟深却随坡顶距离的增加呈现明显减小趋势,各处理下沟深在坡面不同位置大小有明

显差异。这表明细沟沟宽在坡面发育基本一致,沟深由坡顶到坡脚却逐渐变小,即沟宽的发育与位置关系

不显著,而沟深与位置关系显著,可以把细沟在坡面发育的总体形态为概化为“楔形”。

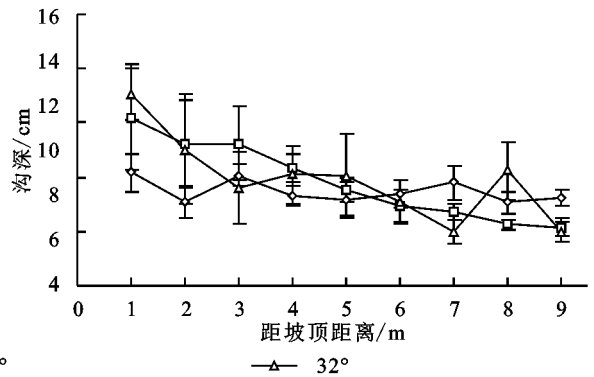
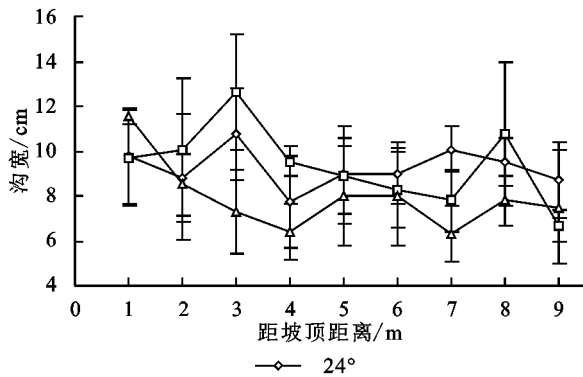


图5 坡度对沟宽和沟深的影响

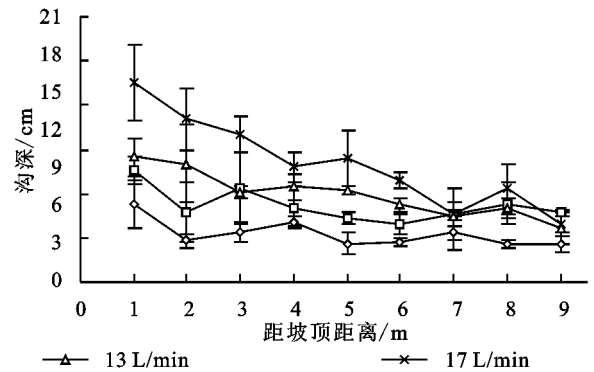
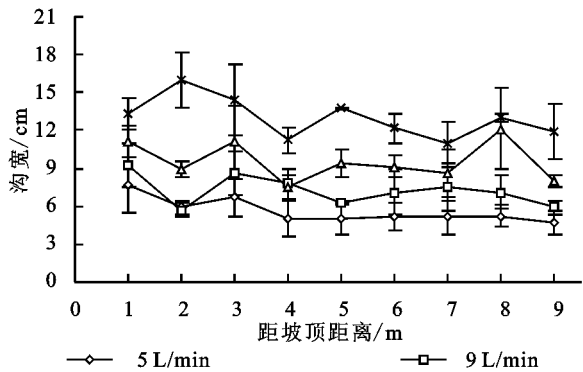


图6 流量对沟宽和沟深的影响

3 讨论

堆积体坡面细沟侵蚀频发,及时有效地拦蓄坡面的径流是防治细沟侵蚀的重要举措,防护措施的合理有效布设是减少侵蚀的关键。本研究尝试运用刻画细沟形态的基本指标沟长、沟宽和沟深,研究细沟形态指标的空间发育过程,以期明确堆积体坡面细沟发育的空间变化特征,为工程堆积体坡面防护措施的配置提供一定的理论支撑。堆积体坡面细沟侵蚀与坡耕地细沟侵蚀有相同之处,在坡耕地上研究表明,降雨和上坡来水均在坡耕地上造成了严重的细沟侵蚀,间歇性降雨条件下,坡面侵蚀总量的变化与细沟发育所处阶段紧密相关^[17]。与地块上承接的降水相比,上坡来水对细沟侵蚀的影响更大^[18]。此外,单一的或一定数量细沟侵蚀特征代表性有限,因此迫切需要对沟网动力学进行系统研究^[19]。相关研究表明,坡面侵蚀过程呈明显的阶段性^[20-21],而且工程堆积体坡面沟宽和沟深在前9 min内快速发育,沟宽发育占总宽度的57%~90%,沟深发育占总深度的38%~73%,即在产流初期沟宽对堆积体坡面侵蚀形态的贡献要大于沟深^[22-23],本研究结果表明,细沟在坡面发育的总体形态为概化“楔形”,即在坡面上部沟深发育

贡献大于坡面下部,沟宽发育在坡面相对一致。综合来看,堆积体坡面细沟发育的时空变化特征为“细沟发育前期沟宽迅速扩张,坡面上部沟深集中下切”,该研究结果补充和完善了工程堆积体坡面细沟侵蚀形态的时空变化规律,可以为堆积体坡面防护提供理论指导。此外,本研究表明流量对细沟形态指标的影响大于坡度,而关于堆积体坡面细沟形态空间变化的水动力学机理有待深入研究。

4 结论

在堆积体坡面,放水流量最大时,沟长发育最快,在相同放水流量条件下,随着坡度增大沟长发育变缓。在24°堆积体坡面,所有放水流量条件下,沟宽在坡面呈现差异化发育,剧烈发育集中在1~6 m,相对均匀发育在6~9 m。在试验条件下,坡面沟深发育整体呈现减小趋势,波动变化集中在1~5 m。在同一坡度条件下,平均沟宽和沟深均随放水流量增大而增大,在同一流量条件下,除放水流量为5 L/min时,平均沟宽和沟深随坡度无显著差异,表明放水流量对细沟形态指标的影响大于坡度。沟宽在坡面不同位置发育基本一致,沟深从坡上到坡下却逐渐变小,堆积体坡面细沟侵蚀形态可概化为“楔形”。

参考文献:

- [1] 张乐涛,高照良,田红卫.工程堆积体陡坡坡面径流水动力学特性[J].水土保持学报,2013,27(4):34-38.
 - [2] Peng X D, Shi D M, Guo H Z, et al. Effect of urbanisation on the water retention function in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. Catena, 2015,133:241-249.
 - [3] Niu Y B, Gao Z L, Li Y H, et al. Effect of rock fragment content on erosion processes of disturbed soil accumulation under field scouring conditions [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019,19(4):1708-1723.
 - [4] 牛耀彬,吴旭,高照良,等.降雨和上方来水条件下工程堆积体坡面土壤侵蚀特征[J].农业工程学报,2020,36(8):69-77.
 - [5] 齐星圆,高照良,张翔,等.黄土堆积体变坡长坡面细沟动态发育过程[J].水土保持研究,2019,26(3):42-48.
 - [6] 鲁克新,李占斌,张霞,等.室内模拟降雨条件下径流侵蚀产沙试验研究[J].水土保持学报,2011,25(2):6-9.
 - [7] Wang Z, Yang X, Liu J, et al. Sediment transport capacity and its response to hydraulic parameters in experimental rill flow on steep slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015,70(1):36-44.
 - [8] 张攀,唐洪武,姚文艺,等.细沟形态演变对坡面水沙过程的影响[J].水科学进展,2016,27(4):535-541.
 - [9] 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.
 - [10] 张宽地,王光谦,吕宏兴,等.模拟降雨条件下坡面流水动力学特性研究[J].水科学进展,2013,23(2):229-235.
 - [11] 李永红,牛耀彬,王正中,等.工程堆积体坡面径流水动力学参数及其相互关系[J].农业工程学报,2015,31(22):83-88.
 - [12] 和继军,吕焯,宫辉力,等.细沟侵蚀特征及其产流产沙过程试验研究[J].水利学报,2013,44(4):398-405.
 - [13] 张攀,姚文艺,唐洪武,等.模拟降雨条件下坡面细沟形态演变与量化方法[J].水科学进展,2015,26(1):51-58.
 - [14] 刘希林,张大林.基于三维激光扫描的崩岗侵蚀的时空分析[J].农业工程学报,2015,31(4):204-211.
 - [15] 张利超,杨伟,李朝霞,等.激光微地貌扫描仪测定侵蚀过程中地表糙度[J].农业工程学报,2014,30(22):155-162.
 - [16] 李俊利,李斌兵,柳方明,等.利用照片重建技术生成坡面侵蚀沟三维模型[J].农业工程学报,2015,31(1):125-132.
 - [17] 李霞,金鑫,谢斯琴,等.间歇降雨对红壤坡面土壤侵蚀特征的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):96-102.
 - [18] 王志强,杨萌,张岩,等.暴雨条件下黄土高原长陡坡耕地细沟侵蚀特征[J].农业工程学报,2020,36(12):129-135.
 - [19] Ou X J, Hu Y X, Li X W, et al. Advancements and challenges in rill formation, morphology, measurement and modeling[J]. Catena, 2021,196:104932.
 - [20] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.黄土坡面细沟侵蚀形态试验[J].生态学报,2014,34(19):5514-5521.
 - [21] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面细沟形态变化及其与流速之间的关系[J].农业工程学报,2014,30(11):110-117.
 - [22] 牛耀彬,高照良,李永红,等.工程堆积体坡面细沟形态发育及其与产流产沙量的关系[J].农业工程学报,2016,32(19):154-161.
 - [23] Niu Y B, Gao Z L, Li Y H, et al. Characteristics of rill erosion in spoil heaps under simulated inflow: a field runoff plots experiment [J]. Soil and Tillage Research, 2020,202:104655.
- ~~~~~
- (上接第31页)
- [26] 魏亚飞,王辉,谭帅,等.套种对南方红壤坡耕地经济果园土壤团聚体分布及稳定性的影响[J].应用生态学报,2020,31(5):1617-1624.
 - [27] 姜敏,刘毅,刘闯,等.丹江口库区不同土地利用方式土壤团聚体稳定性及分形特征[J].水土保持学报,2016,30(6):265-270.
 - [28] Pirmoradian N, Sepaskhah A R, Hajabbasi M A. Application of fractal theory to quantify soil aggregate stability as influenced by tillage treatments[J]. Biosystems Engineering, 2004,90(2):227-234.
 - [29] 吴宏伟.大气—植被—土体相互作用:理论与机理[J].岩土工程学报,2017,39(1):1-47.
 - [30] 朱亚琼,郑伟,王祥,等.混播方式对豆禾混播草地植物根系构型特征的影响[J].草业学报,2018,27(1):73-85.
 - [31] 蔺芳,刘晓静,张家洋.人工草地种植模式对沙化土壤团聚体及有机质含量的影响[J].中国沙漠,2018,38(6):1219-1229.
 - [32] 万海霞,马璠,许浩,等.宁夏南部黄土丘陵区典型草本群落根系垂直分布特征与土壤团聚体的关系[J].水土保持研究,2019,26(6):80-86,91.
 - [33] Hual W, Petal D. Effect of applicatitrogen, zinc and selenium on fixation of nitrogen and transfer of nitrogen fixed in white clover[J]. Acta Ecological Sinica, 2001,21(4):588-592.