

塝土堆积体坡面细沟形态及其沿程分布特征

张翔¹, 高照良², 卢茜¹

(1.萍乡学院 海绵城市研究院, 江西 萍乡 337000; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:采用人工野外放水冲刷试验,以塝土地质为下垫面的工程堆积体坡面为研究对象,研究了不同坡长、坡度的塝土堆积体坡面细沟形态特征及其沿程分布。结果表明:沟宽随时间延续呈现先递增后趋于稳定的趋势,沟宽与坡长存在二次函数关系,沟深随时间延续不断递增,表现为线性函数关系,沟深与细沟断面面积均对坡长变化存在响应,但并不存在显著函数关系,细沟宽深比随径流的持续呈现先骤减后趋于稳定的趋势,细沟断面面积随时间延续呈现逐渐递增的走势,可以用线性函数来描述断面面积与时间二者的关系,沟宽的沿程分布规律不一,呈现迥异,整体上来看,沟深的分布特性表现为先骤减后保持稳定的规律,就堆积体渣面汇集径流冲刷坡面的情况而言,对堆积体上半坡面布设合理的防治措施是重中之重。

关键词:塝土; 工程堆积体; 放水冲刷; 细沟形态

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)05-0053-07

Rill Morphological Characteristics and Distribution Characteristics on Lou Soil Mound

ZHANG Xiang¹, GAO Zhaoliang², LU Xi¹

(1. Research Institute of Sponge City, Pingxiang University, Pingxiang,

Jiangxi 337000, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A field water-scouring experiment was conducted with different slope lengths and slope gradients in order to explore rill morphological characteristics and distribution characteristics on lou soil mound. The results show that the width of rill increases first and then tends to be stable with time. There is a quadratic function relationship between rill width and slope length. The depth of the rill continues to increase with time, and the relationship between the rill depth and time can be well described by a linear function. Both the rill depth and sectional area of the rill response to the change of slope length, no significant functional relationship between them is found. The rill width-depth ratio decreases rapidly first and then tends to be stable with time. The sectional area of the rill increases with time. The relationship between the sectional area of the rill and the time can be described by a linear function. The distribution of the rill width on the slope is not uniform, showing diversity. On the whole, the distribution characteristics of rill depth follow a rule of decreasing rapidly first and then maintaining stability. In view of the fact that the accumulation platform surface collects the runoff and flushes the slope surface, reasonable control measures should be laid on the top half slope of the mound.

Keywords: lou soil; engineering mound; runoff scouring; rill morphology

就全国的土壤侵蚀强度分布来看,生产建设项目过程中产生的弃土弃渣堆置而成的工程堆积体已然为人新增泥沙流失的供给地^[1-2],具备独特下垫面的工程堆积体一旦遇上强降雨导致的坡面汇流极易发生细沟侵蚀,细沟侵蚀对坡面土壤侵蚀过程起着重要贡献^[3],

然而反映细沟侵蚀程度最直接的参数指标便是坡面细沟侵蚀过程中的细沟形态特征,因此对此类工程堆积体坡面细沟形态及其分布特性的探讨尤为必要。

国内外学者对此也开展了相应的研究,王龙生等^[4]研究结果表明,在细沟发育初期,细沟的间距一定

收稿日期:2018-10-27

修回日期:2018-11-30

资助项目:江西省教育厅科技技术研究项目资助(GJJ181111,GJJ171144);“十二五”国家科技支撑计划“农田水土保持关键技术研究示范”(2011BAD31B01)

第一作者:张翔(1991—),男,江西吉安人,硕士研究生,主要研究方向为土壤侵蚀研究。E-mail:812936025@qq.com

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

程度上制约着细沟的分布,间距范围在 12.5~17.5 cm; Bruno 等^[5]采用沟长与横断面来描述细沟形态,发现细沟体积与沟长存在幂函数关系;Di Stefano 等^[6]进行野外数据测量得出沟长、沟宽、沟深和细沟体积之间的经验关系;沈海鸥等^[7]研究表明,细沟割裂度是描述细沟形态的最优指标;张攀等^[8]研究表明,坡面地貌信息熵能够反映侵蚀过程中侵蚀程度的变化,对细沟发育程度的描述较为灵敏;雷廷武和 Nearing^[9]就试验过程中沟宽的周期性形态变化运用数学模型进行了描述。

目前研究主要探讨坡度、坡长等因子对坡面细沟侵蚀量的影响,就坡面细沟形态特征的探讨较少,然而探讨细沟的产生机理就必须先对细沟形态进行分析^[10],且径流冲刷过后的细沟形态也间接反映着坡面径流和侵蚀情况^[11],本文通过探讨径流冲刷过程中细沟形态指标的产生、发育过程以及这些指标在坡面的沿程分布特征,以此揭示**塋**土堆积体坡面细沟侵蚀情况,以期为黄土区**塋**土堆积体坡面土壤侵蚀预防贡献依据^[12]。

1 材料与方法

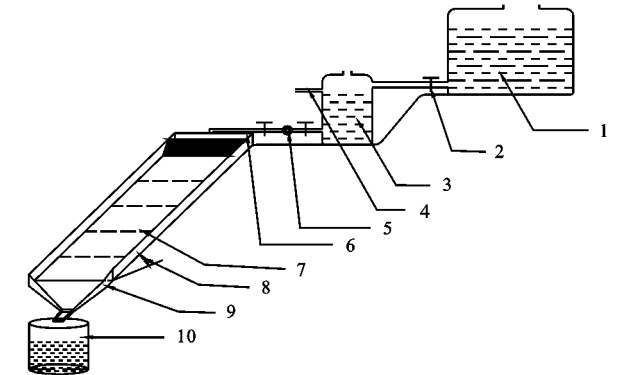
试验地选在陕西杨凌水土保持试验站,地处国家杨凌高新技术开发区^[12],该站位于杨凌区五泉镇,始建于 2001 年,至 2003 年正式投入运营,距今已十来年^[13]。该区域归属于大陆性季风气候,年均温度保持在 13℃左右,年均降水量在 610.2 mm 左右,该区的地带性土壤属于**塋**土,坡面重力侵蚀严重,雨季短而集中,侵蚀较为严重,工程项目在自然陡坡面采取大型机械挖掘,确定出试验所需坡度,把径流小区设立在开挖坡面上,然后往径流小区内填入 50 cm 深的弃土弃渣,人工加机械翻炒弃土弃渣来剔除其中的杂草和残留植物根系,保证在裸坡条件下进行试验。对泥沙试样进行粒径分析试验,结果表明,泥沙粒径均在 1 mm 以下(表 1)。

表 1 土壤颗粒粒径分类

| 粒径/mm | 粒径比重/% | 粒径/mm | 粒径比重/% |
|-------------|--------|-----------|--------|
| <0.002 | 24.04 | 0.01~0.02 | 20.29 |
| 0.002~0.005 | 6.64 | 0.02~0.05 | 35.20 |
| 0.005~0.01 | 9.22 | 0.05~0.1 | 4.51 |

试验装置如图 1 所示:试验准备期,先用 40 cm 宽 10 m 长的多条铁皮把坡面分割成宽度为 1 m 的坡面,铁皮深入土层 30 cm,尽可能避免侧向入渗导致的边界效益,两条铁皮的交接处至少错位 30 cm 长,避免水流外渗,试验选取了 3 个坡度、5 个坡长进行布设,共计 15 场试验。依据陕西杨凌水土保持试验站的气象资料并考虑本区暴雨情况下的最大降雨强度选取设计雨强(1.5 mm/min),敲定不同坡长的

坡面径流量依次为 6,12,18,24,30 L/min。试验过程中为确保坡面下垫面一致,人工进行坡面平整工作^[14],在保证土壤容重和含水率的条件下,对斜坡弃土下挖 30 cm 进行翻炒、整平并压实,且对斜坡弃土进行均匀的预洒水,直到坡面土壤饱和为止,对洒水坡面进行塑料薄膜覆盖直至径流冲刷开始。径流开始冲刷坡面后,坡面产流瞬间开始计时并记下产流时间,前 3 min 内每隔 1 min 进行一次流速、水深的测量,同时收集一次泥沙试样;3 min 以后改变为每隔 3 min 进行上一操作,30 min 后停止放水。细沟形态指标(沟宽、沟深)人工采用钢尺现场测量,坡面径流流速采用高锰酸钾染色示踪法。4 m 坡长下流速测量间距为 0.6 m,细沟形态指标测量间隔均为 0.5 m;坡长为 8,12,16 m 坡长下的流速测量间距均为 1.5 m,细沟形态指标测量间隔对应为 1,1.5,2 m;20 m 坡长下的流速测量间距为 2 m,细沟形态指标测量间隔为 2 m^[12]。试验过程温度计始终至于溢流槽内测定水温,收集好的泥沙试样先称重后进行烤箱烘干处理,坡面采集土壤利用激光粒度分析仪分析其机械组成^[15]。



注:1.储水桶;2.水阀;3.恒压桶;4.溢流管;5.流量计;6.溢流槽;7.观测断面;8.坡度;9.试验小区;10.集流桶。

图 1 径流小区及放水装置

2 结果与分析

2.1 坡面细沟形态特征

2.1.1 沟宽的变化特征 作为揭示细沟形态特征的指标因素之一,分析沟宽的时空发育状况对明确坡面细沟形态的演变起着一定的基础性意义。本文就不同坡长坡面选取了所有测量断面,统计 8 个测量结果在同一径流时刻的正态均值,点绘沟宽均值时空变化过程如图 2 所示,以此描绘出不同坡度、坡长条件下细沟沟宽随时间的变化状态。

试验条件下的堆积体坡面细沟沟宽基本上均随径流的持续呈现先陡增而后趋于稳定的走势,从 3 个坡度情况下的细沟变化趋势不难发现,细沟沟宽基本均在前 9 min 内完成快速的陡增,原因是随着坡面不断侵蚀坡面细沟在此阶段迅速成型;对比 3 个坡度图

形,剔除可能由于测量过程中出现不确定因素导致的个别误差,沟宽有着随着坡长的增大而增大的趋势;在不同坡长角度下,平均沟宽随着坡长的增大分别是 8.51,10.46,11.26,13.75,13.60 cm,将沟宽与坡长进一步回归分析得到拟合方程($W=-0.01L^2+0.61L+6.21$, $R^2=0.69$),沟宽与坡长存在显著的二次函数关系,且开口向下,最大值对应的坡长为 30.5 m,由于试验所选取坡长均小于 30 m,所以沟宽随着坡长的递增是增大的;在试验坡度范围内,就所有所得沟宽在坡度方向进行平均得出,沟宽随着坡度的递增依次是 12.07,11.36,11.11,表明沟宽随着坡度的增大是呈现稍微递减的趋势。

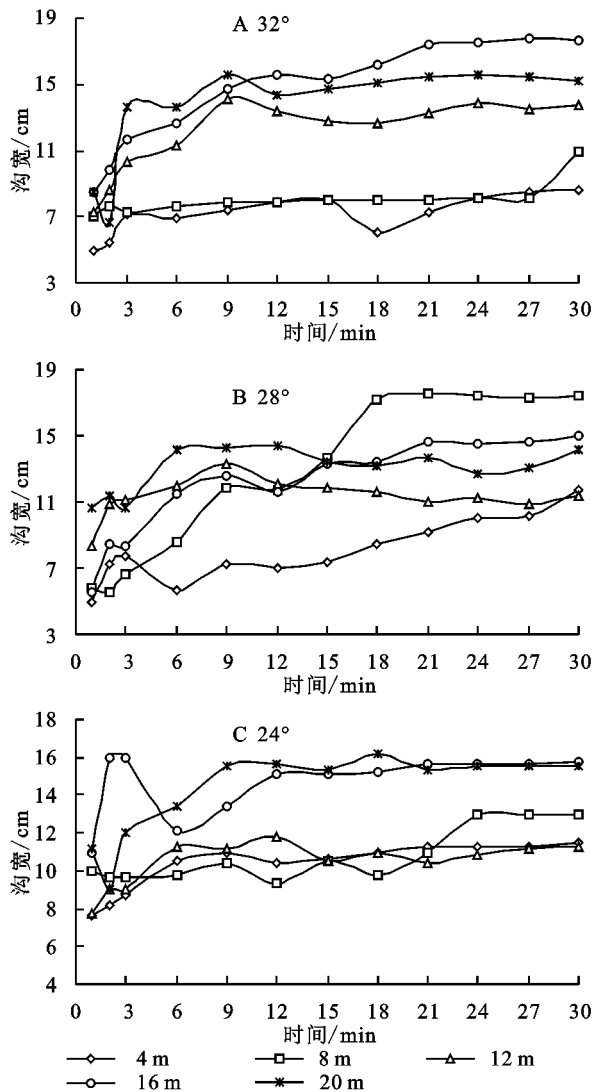


图 2 沟宽随放水时间变化

2.1.2 沟深的变化特征 沟深亦是揭示细沟形态特征的基本因子之一,分析沟深在时间轴上的变化过程对推演坡面的细沟形态具有重要意义。本文就不同坡长坡面选取了所有测量断面,统计 8 个测量结果在同一径流时刻的正态均值,点绘沟深均值时空变化过程见图 3,以此描绘出不同坡度、坡长条件下细沟

沟宽随时间的变化状态。

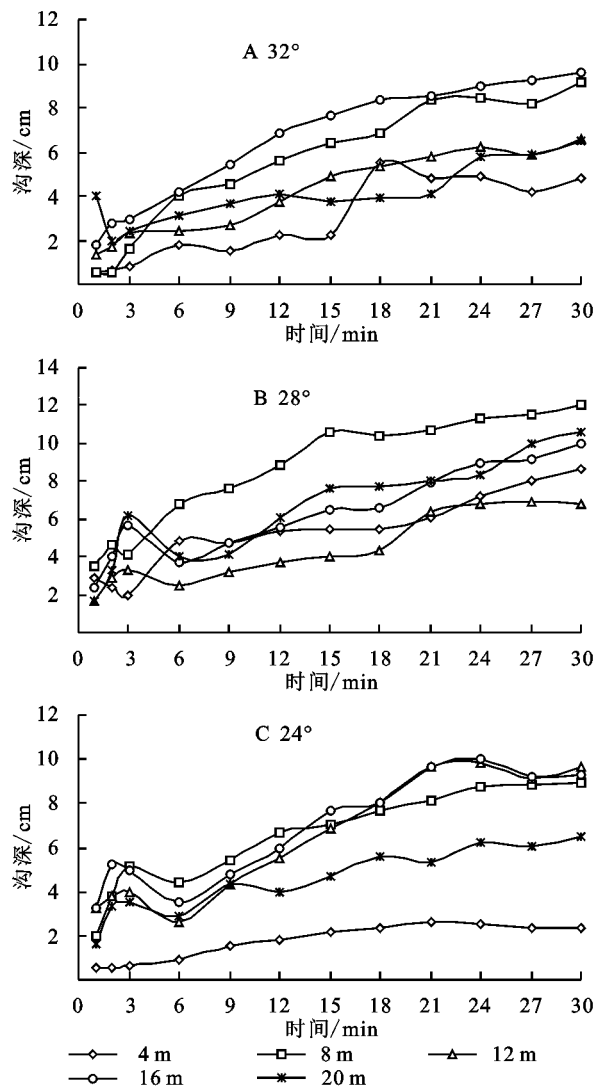


图 3 沟深随放水时间变化

依据图 3 所示,沟深的发育过程整体随着冲刷时间的持续呈现不断增大的趋势,这与牛耀彬等^[16]研究结论一致。就坡度角度方向进行统计得出,随着坡度的增加,沟深的平均值依次是 5.15,6.17,4.53 cm,沟深随着坡面坡度的递增呈现先增后减的变化趋势;对沟深数据进行统计分析可得,在 32°坡度条件下,沟深的平均值随坡长的增大依次是 2.81,5.33,4.06,6.36,4.09,在 28°坡度条件下,沟深的平均值随坡长的增大依次是 5.24,8.51,4.37,6.24,6.48,在 24°坡度条件下,沟深的平均值随坡长的增大依次是 1.67,6.41,6.38,6.79,4.5;在 3 个坡度情况下,沟深随着坡长的增大呈现先增后减、再增再减的变化趋势,表明坡长对平均沟深发育程度是存在显著影响的,进一步将沟深与坡长进行回归分析发现,二者并不存在显著的函数关系。

拟合沟深与时间二者之间的关系,发现细沟沟深的发育过程用线性关系可以很好的表达,见表 2。

分析表 2 可知,在坡度角度下,沟深的平均增长

率分别是 0.18,0.23,0.21,表明沟深随着时间变化的增长率随着坡度的增大呈现先增后减的趋势;在坡长角度下,沟深的平均增长率依次是 0.15,0.27,0.21,0.24,0.17,由此不难看出,沟深在时间轴上的增长率亦随着坡长的增大呈现先增后减、再增再减的变化趋势。综上所述,对比发现,坡长不仅影响平均沟深的发育程度,也影响沟深的发育速率。

表 2 沟深与放水时间拟合函数关系

| 坡度 | 坡长/m | 拟合方程 | 系数 R^2 |
|-----|------|----------------|----------|
| 32° | 4 | $y=0.17x+0.44$ | 0.82** |
| | 8 | $y=0.30x+1.16$ | 0.92** |
| | 12 | $y=0.18x+1.47$ | 0.95** |
| | 16 | $y=0.27x+2.59$ | 0.93** |
| | 20 | $y=0.12x+2.44$ | 0.77* |
| 28° | 4 | $y=0.20x+2.43$ | 0.92** |
| | 8 | $y=0.29x+4.42$ | 0.90** |
| | 12 | $y=0.18x+1.91$ | 0.90** |
| | 16 | $y=0.22x+3.11$ | 0.90** |
| | 20 | $y=0.25x+2.95$ | 0.86** |
| 24° | 4 | $y=0.07x+0.63$ | 0.84** |
| | 8 | $y=0.21x+3.46$ | 0.90** |
| | 12 | $y=0.26x+2.72$ | 0.90** |
| | 16 | $y=0.22x+3.65$ | 0.85** |
| | 20 | $y=0.14x+2.55$ | 0.89** |

2.1.3 宽深比的变化特征 细沟宽深比表征的是细沟宽度与其对应深度的比率,该参数属于一无量纲参数^[17];细沟沟槽形状的演变用细沟宽深比可进行间接的体现。本文就不同坡长坡面选取了所有测量断面,统计 8 个测量结果在同一径流时刻的正态均值,点绘宽深比时空变化过程见图 4,由此表示不同坡度、坡长条件下细沟宽深比随时间延续的变化状况。

依据图 4 所示,在试验坡度、坡长条件下,细沟宽深比均随着坡面径流的持续表现先急速下降后逐渐稳定的走势。在试验前期,宽深比的急速下降表明坡面开始细沟侵蚀时主要是向横断面发展的,沟宽较沟深侵蚀显著,当沟宽扩展到一定程度,即坡面水流全部汇集于已初步成型的细沟内时,此时细沟内聚集的水流下切能力集中,细沟内土壤下切侵蚀开始逐渐严重,随后细沟形态开始以纵断面发展为主,即细沟沟深较沟宽侵蚀更显著,这也可能是试验前期宽深比骤降的原因。在放水试验的中后期,沟宽、沟深侵蚀程度相近,宽深比开始保持稳定;出现如此情况的缘由是细沟发育已趋于成熟,沟内流已难在纵横断面发生剧烈的侵蚀,沟深、沟宽的发育均已缓慢下来,如此才使细沟宽深比持续保持稳定。在 24°坡度下,4 m 坡长条件下的细沟宽深比相对其他坡长情况整体偏大,这可能是由于此状态下的坡度较缓,以致坡面的重力侵蚀不大,加上坡长较短,坡顶加速下来的水流流速并不大,即其下切侵蚀不剧烈,通过图 4C 的沟深的变化过程也可发现,4 m 坡长坡面细沟沟深的发育相对其他坡长情况较慢,由此也可说明为什么

4 m 坡长下的宽深比偏大。

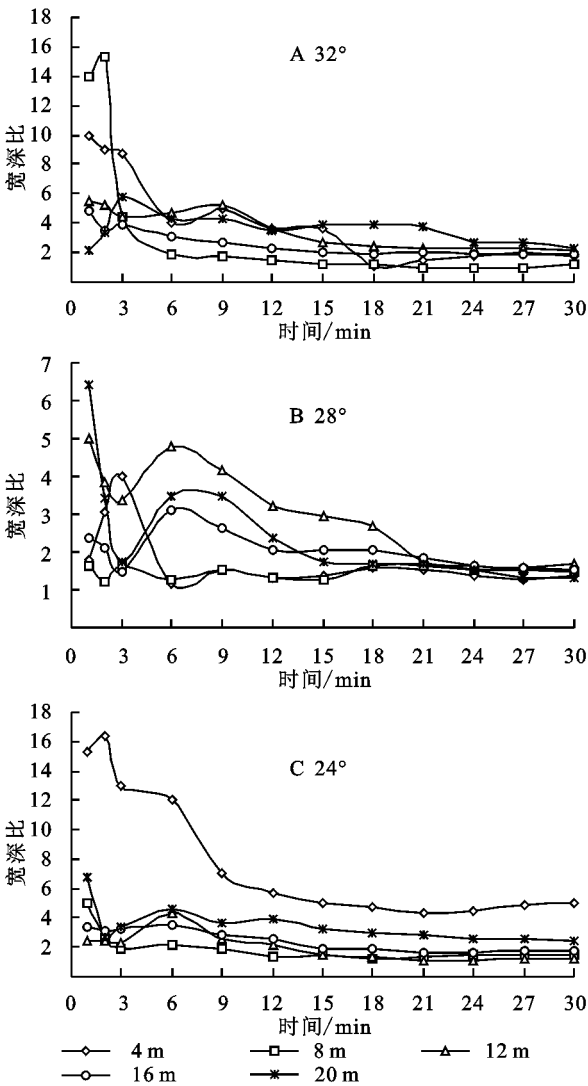


图 4 宽深比随放水时间变化

2.1.4 细沟断面面积的变化特征 通过对沟深、沟宽进行统计,依据矩形沟槽进行换算断面面积,得出细沟断面面积与径流时间之间内在影响关系,单位长度的细沟侵蚀面积对等于细沟断面面积,揭示细沟断面面积的时空变化规律,可以间接明确单位长度的细沟侵蚀量在时空方向上的演变规律^[17]。点绘细沟断面面积随时间持续的曲线走势如图 5 所示,由此表征不同坡度、坡长范围内断面面积随径流持续的变化状况。

在试验条件下,细沟断面面积伴着径流冲刷的延续整体表现出不断递增的趋势;对细沟断面面积在坡度方向进行均值统计发现,随着坡度的增大,断面面积的均值依次是 55.35,76.13,65.16 cm²,表明细沟断面面积随着坡度的递增表现为先增后减的走势;就坡长角度方向分析发现,在 32°坡度下,伴随坡长的增大细沟断面面积依次是 21.2,44.9,52.0,100.8,57.9 cm²,在 28°坡度下,伴随坡长的增大断面面积依次是 45.1,120.3,49.7,80.2,85.4 cm²,在 24°坡度下,

伴随坡长的增大断面面积依次是 18.1, 71.0, 68.0, 102.6, 66.1 cm², 3 个坡度情况下的细沟断面面积随坡长递增的变化趋势并非一致; 在不分坡度情况下, 伴随坡长的递增细沟断面面积依次是 28.1, 78.7, 56.6, 94.5, 69.8, 由此可知, 细沟断面面积随坡长的变化情况与沟深随坡长变化情况一致, 由于试验条件下沟宽随着坡长是递增的, 但由拟合方程可知沟宽的增幅并不大, 因此细沟断面面积随坡长的变化情况主要取决于沟深对坡长的响应。

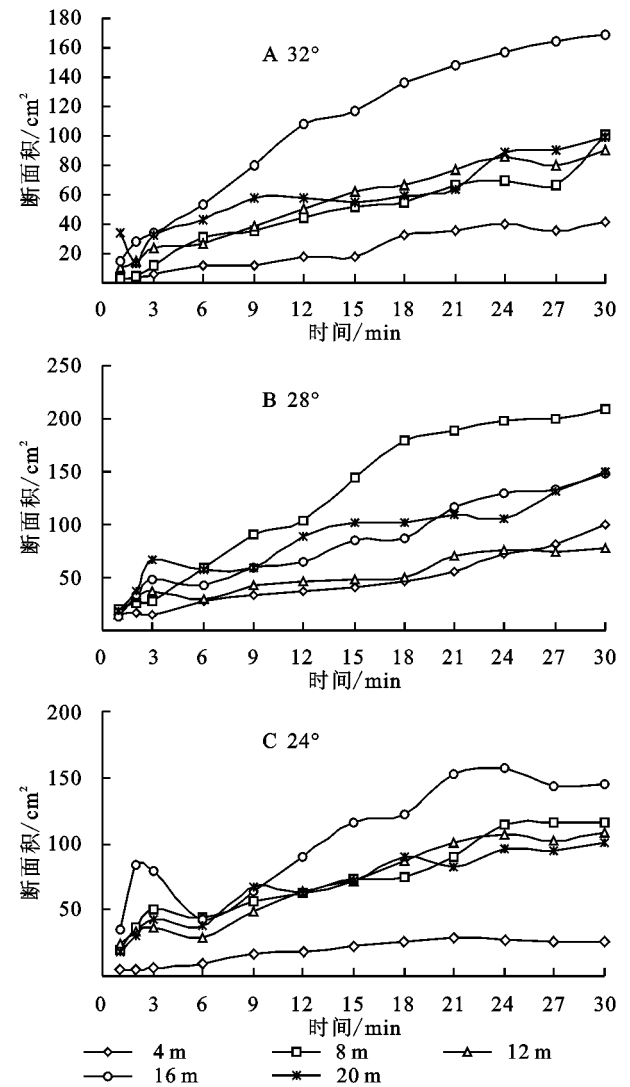


图5 细沟断面面积随时间变化

对细沟断面面积与时间的关系进行回归分析得出表 3。由表 3 可知, 断面面积与时间呈现极显著的线性函数关系。在坡度方向分析细沟断面面积在时间轴方向的增长率变化情况发现, 断面面积在时间轴上的增长率在坡度方向依次为 2.73, 3.97, 3.00, 表明断面面积的增长率随坡度的增大是先增后减的走势; 分析黄土堆积体坡面细沟断面面积在时间轴上的增幅随坡长因素变化的演变规律, 随着坡长的增大, 32° 坡度下的细沟断面面积的增幅依次是 1.42, 2.84,

2.80, 5.52, 2.41, 28° 坡度下的细沟断面面积的增幅分别为 2.67, 7.24, 1.97, 4.30, 3.65, 24° 坡度下的细沟断面面积的增幅分别为 0.91, 3.11, 3.15, 3.80, 2.66, 在不区分 3 个坡度情况下, 就断面面积的增幅随坡长增大依次是 1.67, 4.40, 2.64, 4.54, 2.91, 由此可发现, 坡长对断面面积的增大速率是产生影响的, 但二者并不存在特定的变化趋势。

表3 断面面积与放水时间拟合函数关系

| 坡度/(°) | 坡长/m | 拟合方程 | 系数 R ² |
|--------|------|-----------------|-------------------|
| 32° | 4 | $y=1.42x+1.27$ | 0.94** |
| | 8 | $y=2.84x+5.14$ | 0.94** |
| | 12 | $y=2.80x+12.85$ | 0.96** |
| | 16 | $y=5.52x+23.44$ | 0.96** |
| | 20 | $y=2.41x+24.23$ | 0.89* |
| 28° | 4 | $y=2.67x+7.71$ | 0.95** |
| | 8 | $y=7.24x+18.86$ | 0.95** |
| | 12 | $y=1.97x+22.01$ | 0.91** |
| | 16 | $y=4.30x+20.00$ | 0.97** |
| | 20 | $y=3.65x+34.28$ | 0.91** |
| 24° | 4 | $y=0.91x+5.36$ | 0.86** |
| | 8 | $y=3.11x+27.47$ | 0.95** |
| | 12 | $y=3.15x+23.90$ | 0.95** |
| | 16 | $y=3.80x+49.47$ | 0.80** |
| | 20 | $y=2.66x+28.89$ | 0.91** |

2.2 指标因素的沿程分布特征

2.2.1 沟宽指标的分布特性 每个坡面的径流冲刷试验均在时间轴方向测量了 12 个时间点的细沟形态, 统计沟宽在坡面沿程向下各个测量断面上的均值, 点绘细沟沟宽在 3 个坡度、5 个坡长条件下随着坡面沿程向下的变化过程如图 6 所示, 表征不同坡度、坡长条件下坡面沟宽指标的沿程分布特性。

图 6A 在 24° 坡度条件下, 沟宽的分布特性呈波动递增的走势, 28°, 32° 坡度条件下, 沟宽顺着坡面沿程向下表现为稍微的震荡递减走势; 图 6B 在 3 个坡度情况下, 沟宽顺着坡面沿程向下均表现为震荡递减走势; 图 6C 在 3 个坡度条件下, 沟宽基本上表现为上下震荡的状态, 似乎以均值为对称轴进行正态分布; 图 6D 在 24° 坡度条件下, 沟宽的分布特性表现为逐步递减走势, 在 28° 坡度条件下, 沟宽的沿程分布特性表征为上下震荡的状态, 在 32° 坡度下, 沟宽的沿程分布特性则表征为略微的递增走势; 图 6E 在 3 个坡度情况下, 沟宽的分布特性表现为先减后增的 V 字形走势; 综上所述, 在试验条件下, 沟宽的分布特性表现不一, 表现为多样性, 这可能是试验坡面的不同测量断面处的土壤容重、含水率、粒径级配、抗侵蚀能力等并非完全一致有关。

2.2.2 沟深指标的分布特性 通过统计沟深在坡面沿程向下各个测量断面上的均值, 描绘细沟沟深在本试验条件下顺着坡面向下的变化过程如图 7 所示, 表征不同坡度、坡长条件下坡面沟深的曲线走势。

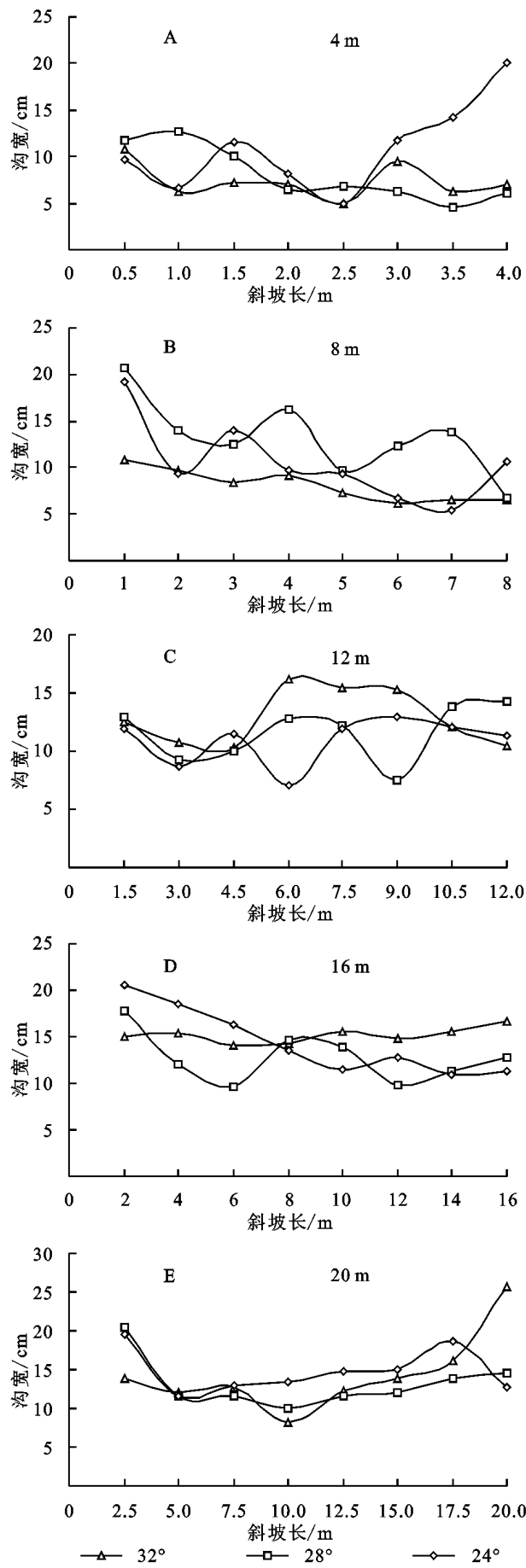


图 6 沟宽指标的沿程分布特性

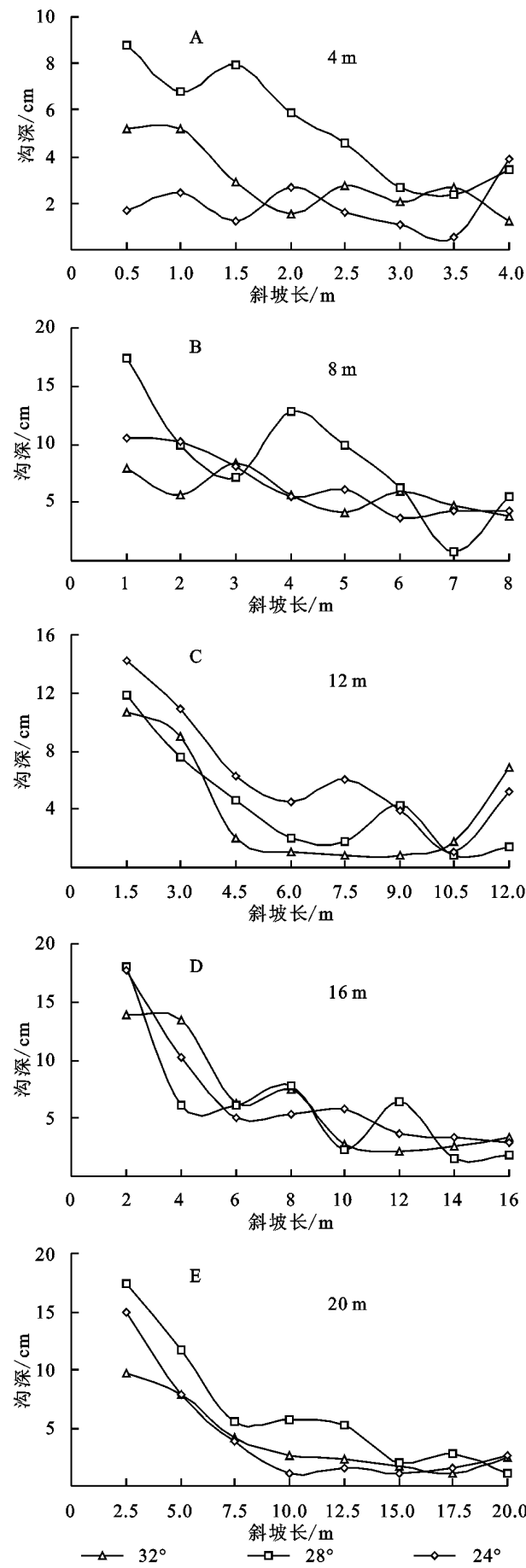


图 7 沟深指标的沿程分布特性

图 7A 中所示,在 24° 、 28° 坡度下,沟深的分布特性表现为先震荡减小,最后一点陡增的走势; 32° 坡度下,沟深的分布特性表现为波动递减走势;如图 7B 中所示,在 24° 、 32° 坡度下,沟深的分布特性表现逐渐递减走势; 28° 坡度下,沟深的分布特性表现先震荡递减,最后一点陡增的走势;如图 7C 中所示,在试验条件下,沟深的分布特性表现为先震荡骤减,最后一点陡增的走势;如图 7D 中所示,在不同坡度情况下,沟深的分布特性表现为振动骤减并保持稳定的走势;如图 7E 中所示,在试验坡度下,沟深的分布特性表现为先骤减后保持稳定的走势;综上所述,在小坡长(4, 8, 12 m)条件下,沟深的分布特性表现出震荡性,并都在最后测量断面出现陡增现象;在大坡长(16, 20 m)条件下,沟深的分布特性似乎表现出稳定并趋于明了,均表现为先骤减后保持稳定的分布特性,由此分布规律可知,在开发建设项目过程中,就堆积体渣面汇集径流冲刷坡面的情况的而已,对堆积体上半坡面布设合理的防治措施是重中之重。

3 结论

(1) 沟宽随径流的延续表现为先陡增而后趋于稳定的走势,沟宽与坡长存在显著二次函数关系,在试验条件下,沟宽随坡长的增大而增大,坡度对沟宽产生负效应;沟深随时间的延续不断递增,可以用线性函数来表征沟深与时间二者的关系,坡长对平均沟深发育程度是存在显著影响的,但二者并不存在显著的函数关系。

(2) 细沟宽深比顺着坡面径流的持续表现先急速下降后保持稳定的走势,在侵蚀前期,坡面侵蚀以横断面方向侵蚀为主,跌坎贯通后,细沟集流导致水流下切侵蚀剧烈,沟槽形态开始以纵断面方向侵蚀为主,细沟发育成型后,指标参数开始趋于稳定。

(3) 细沟断面面积随径流冲刷时间的延续表现为逐渐递增的走势,可以用线性函数来表征断面面积与时间二者的关系,细沟断面面积随坡长的变化情况主要取决于沟深对坡长的响应。

(4) 不同坡长、坡度条件下,沟宽的沿程分布特性表现不一,表现为多样性;整体上看,沟深的分布情况表现为先骤减后保持稳定的特征,因此在开发建设项目过程中,就堆积体渣面汇集径流冲刷坡面的情况而言,对堆积体上半坡面布设合理的防治措施是重中之重。

参考文献:

- [1] 张翔,高照良,杜捷,等.工程堆积体坡面产流产沙特性的现场试验[J].水土保持学报,2016,30(4):19-24.
- [2] 张翔,高照良,袁雪红,等.工程堆积体坡面细沟流体力学参数特性研究[J].泥沙研究,2016(4):34-40.
- [3] 郑粉莉.细沟侵蚀量测算方法的探讨[J].水土保持通报,1989,9(4):41-45.
- [4] 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.
- [5] Bruno C, Stefano C D, Ferro V. Field investigation on rilling in the experimental Sparacia area, South Italy[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2010, 33(2): 263-279.
- [6] Stefano C D, Ferro V, Pampalone V, et al. Field investigation of rill and ephemeral gully erosion in the Sparacia experimental area, South Italy[J]. Catena, 2013, 101(2):226-234.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 雷廷武, Nearing M A. 侵蚀细沟水力学特性及细沟侵蚀与形态特征的试验研究[J].水利学报,2000,31(11):49-54.
- [10] 严冬春,王一峰,文安邦,等.紫色土坡耕地细沟发育的形态演变[J].山地学报,2011,29(4):469-473.
- [11] Govindaraju R S, Kavvas M L. A spectral approach for analyzing the rill structure over hillslopes. Part 1. Development of stochastic theory [J]. Journal of Hydrology, 1994,158(3/4):333-347.
- [12] 张翔.模拟径流条件下坡长对工程堆积体坡面土壤侵蚀的影响[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [13] 吴淑芳,吴普特,原立峰.坡面径流调控薄层水流水力学特性试验[J].农业工程学报,2010,26(3):14-19.
- [14] 张翔,高照良.不同坡长条件下、土堆积体坡面产流产沙过程[J].水土保持研究,2018,25(6):83-88,97.
- [15] 张乐涛,高照良,田红卫.工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程[J].农业工程学报,2013,29(24):94-102.
- [16] 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.
- [17] 于思洋,黄河清,范北林,等.利用河流平衡理论检验推移质输沙函数的应用性[J].泥沙研究,2012(2):19-25.