



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2305513

引用格式:蒋臻蔚,王李红,郑瑞杰,等.陕北油田黄土工区道路冲蚀灾害模型试验研究[J].科学技术与工程,2024,24(16):6642-6648.

Jiang Zhenwei, Wang Lihong, Zheng Ruijie, et al. Model test study on road erosion disaster in loess engineering area of northern Shaanxi oil-field[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(16): 6642-6648.

陕北油田黄土工区道路冲蚀灾害模型试验研究

蒋臻蔚,王李红,郑瑞杰,牛琰

(长安大学地质工程与测绘学院,西安 710054)

摘 要 为探究陕北油田黄土工区道路冲蚀灾害特征及路面细沟冲蚀影响因素,采用物理模型试验,对道路细沟冲蚀发育过程,不同工况下细沟长度、平均宽度以及平均深度的发展特征和产沙速率变化规律进行了研究。结果表明:细沟的发育过程可分为面蚀阶段、跌坑形成阶段、细沟发育阶段、切沟侵蚀-崩塌阶段4个阶段。细沟长度、平均宽度和平均深度与放水时间成幂函数关系,随着放水时间的增大而增大。其中细沟长度随着试验时长的增加先急剧增加,然后逐渐减少;细沟平均宽度随试验时长的增加总体呈现先快速增加后增加速度减慢;平均深度变化速度均在某一时刻达到拐点,流量越大达到拐点的越早。冲蚀灾害受流量和坡度影响显著,总体上随着坡度和流量的增大而增大;产沙速率总体上与流量呈线性关系,在其他条件一致的情况下,产沙速率随着流量的增大而增大;与南部的粉黄土和黏黄土相比,陕北油田工区的砂黄土产沙速率明显偏大,冲蚀灾害更为严重。

关键词 细沟冲蚀;砂黄土;模型试验;细沟形态;产沙速率

中图分类号 P694;

文献标志码 A

Model Test Study on Road Erosion Disaster in Loess Engineering Area of Northern Shaanxi Oilfield

JIANG Zhen-wei, WANG Li-hong, ZHENG Rui-jie, NIU Yan

(School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

[Abstract] In order to explore the characteristics of road erosion disasters and the influencing factors of road surface erosion in the loess area of northern Shaanxi Oilfield, physical model tests were used to study the erosion development process of road fine trenches, the development characteristics of fine trench length, average width and average depth under different working conditions, and the variation law of sand production rate. The results show that the development process of fine groove can be divided into four stages: surface erosion stage-pit formation stage-fine furrow development stage-trench erosion and collapse stage. The length, average width and average depth of the fine trench are a function of the power of the water release time, and increase with the increase of the water release time. Among them, the length of the fine groove first increases sharply with the increase of the test duration, and then gradually decreases. With the increase of the average width of the fine groove with the increase of the trial duration, the overall increase first increases rapidly, and then the increase rate slows down. The average depth change rate all reaches the inflection point at a certain moment, and the larger the flow, the earlier the inflection point is reached. Erosion disasters are significantly affected by flow and slope, and generally increase with the increase of slope and flow. The sand production rate is generally linear with the flow rate, and under other conditions, the sand production rate increases with the increase of the flow rate. Compared with the silty loess and clay loess in the south, the sand loess production rate in the oilfield area of northern Shaanxi is significantly larger, and the erosion disaster is more serious.

[Keywords] fine trench erosion; sand loess; model experimentation; fine groove morphology; sand production rate

陕北是中国重要的油气资源基地,大量的油气井、站分布在黄土梁峁上,由于道路硬化成本高,部分油田工区道路仍为当地砂黄土铺就的土路。斜坡上的道路修建往往会改变面流的途径,车辙更是常成为汇流的通道。陕北黄土高原区域总体降雨

量不大,但常出现极端降雨情况^[1],即短时强降雨。在短时强降雨作用下,油田工区的这类路面经常在短时间内出现诸多长宽深度不一的细沟,严重影响车辆通行、影响油田生产,因此研究该黄土地区道路冲蚀灾害及其防治是有必要的。

收稿日期:2023-07-21 修订日期:2024-03-23

基金项目:国家自然科学基金(42077260)

第一作者:蒋臻蔚(1975—),女,汉族,江苏常州人,博士,副教授。研究方向:地质灾害、安全理论与技术。E-mail:dcdgx29@chd.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

坡面侵蚀是一个十分复杂的过程,众多学者通过人工降雨试验,将坡面侵蚀产沙划分为溅蚀、细沟间侵蚀、细沟侵蚀和雨后径流侵蚀阶段,而细沟侵蚀和细沟间侵蚀是坡面侵蚀过程的主体^[2-3]。细沟侵蚀是坡面土壤侵蚀的主要方式之一,指降雨形成的径流不断汇聚形成细沟侵蚀坡面的过程。随着降雨时间的推移,径流不断侵蚀路面,细沟冲刷坡面经历6个阶段,即溅蚀、片蚀、跌坑、断续细沟、连续细沟、细沟崩塌^[4]。其中,黄土坡面侵蚀尤为典型:黄土结构中粉粒砂粒居多,且垂直节理发育,结构松散,雨后更易被侵蚀^[5]。诸多学者也对其影响因素和研究指标的选取进行了研究。影响坡面产流产沙最关键的因素是降雨量、径流量和坡度^[6-11],影响细沟发育过程发生发展的动力根源是水流切应力^[12-14]。研究表明,进行模型试验研究细沟形态变化应采取细沟宽度、深度以及宽深比指标^[15],细沟发育历程受到坡长的影响,应采取合适的坡长,以全面展示细沟完整的发育过程。若能探究清楚细沟形态与侵蚀产沙之间的关系,建立细沟侵蚀产沙预测模型,揭示坡面产沙规律,则能够为坡面侵蚀预测提供依据^[16],为水土流失防控措施实施提供参考^[17]。

目前对于细沟冲刷已有大量研究,但是涉及砂黄土的研究较少,尤其是对油田工区道路的水力冲刷情况及产沙的速率研究以往没有报道。鉴于此,进行模拟冲刷试验,探究黄土路面在暴雨冲刷下,细沟的发育过程及特征,以及影响冲刷灾害程度的影响因素,从而为油田工区道路冲刷灾害的防治提供一定的理论依据和指导。

1 研究区概况

本项工作主要是围绕白于山油田工区来开展的。白于山位于陕西省北部,涉及榆林市的定边、靖边、横山三县和延安市的吴起、志丹、安塞、子长四县,近东西走向绵延约200 km,是陕北油气田的主战场。白于山山体由砂岩、页岩构成,上覆厚层黄土,根据组成黄土的颗粒粒度分析,山上覆盖的黄土为典型的砂黄土^[18]。

白于山地区属于温带大陆性季风气候,冬春多为大风大旱。降雨特点鲜明,年内分布不均,年际之间变化大,且降水量受不同时期影响显著。气温具有典型的大陆性气候特征,降水受大陆性温带季风影响明显。年平均降水量470.9 mm,但时空分布极不均衡,7~9月降水量占年降水量的60.9%,且多以短时强降雨和暴雨形式出现。当地油井大多修建在山腰或山顶的位置,考虑到车流量小,道路

多为简单推平压实后的黄土道路。车辆行驶后常常留下深浅不一的车辙,为雨水的汇集和流动提供了很好的条件,经常一场大雨过后,路面会出现不少的冲刷破坏。笔者野外调查期间就多次发现如图1所示的细沟。若遭遇特大暴雨,细沟侵蚀作用会急剧加强,在多种因素耦合作用下,甚至会发展成切沟,造成严重的损失(图2)。



图1 降雨后形成的细沟

Fig. 1 Fine furrows formed after rainfall



图2 延伸到井场的切沟

Fig. 2 A cut trench extending to the well site

2 材料及试验

2.1 试验材料

试验用黄土采自陕西省延安市吴起县五谷城镇油田井场附近道路边坡上(108°26'E, 37°2'N)。土样天然含水率为8.16%,天然密度为1.46 kg/cm³,干密度为1.35 kg/cm³,孔隙比为0.993。颗粒组成为黏粒含量12.12%,粉粒含量61.98%,砂粒含量25.88%,颗粒级配曲线及粒组含量分布情况如图3所示。道路上土样试验结果显示其级配与取样点的一致,干密度为1.39 kg/cm³,只是比边坡上的黄土有一定程度的提高,表明由于路面并没有经过系统的压实,其密实度的提高程度有限。

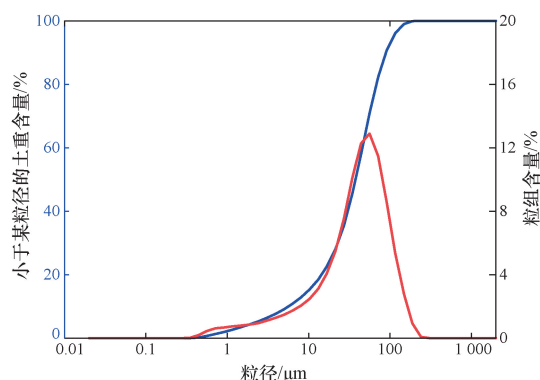


图3 土样颗粒级配曲线及粒组含量分布图

Fig. 3 Soil sample particle gradation curve and particle group content distribution chart

2.2 试验装置与设计

本次细沟冲蚀模型试验开展于长安大学地质灾害模拟大厅。试验使用的模型槽规格为4 m(长)×0.3 m(宽)×0.45 m(高),侧壁为便于观察试验过程采用强化玻璃制作,底部采用钢板进行支撑,并为了防止模型箱变形,整体框架采用钢架支撑。模型槽通过滑轮组连接至近3 m高的钢架上,拉动钢链可以调节模型槽坡度,可调节坡度为0°~25°。供水根据进水流量的大小,采用水管供水。试验装置如图4所示。

综合考虑油田工区道路情况及参考文献[19-23]的试验,本次试验设计坡度为3级,分别为6°、12°、18°,流量设计为3、6、9 L/min。采用流量、坡度组合的方式进行试验,共9组。



图4 模型箱

Fig. 4 Model box

2.3 试验方法

试验前将供试土壤过4 mm筛,去除杂质,然后将试验土壤填入土槽中,以实际场地黄土的天然密

度(1.46 kg/cm³)为控制指标进行填筑,填土总厚度为30 cm。夯实顶层土样时,使试验坡面呈现两侧略高,中部略低的“U”形,模拟道路车辙引导水流,试验前12 h先用撒水器在试验土表面均匀撒水,撒水量控制在土壤表面达到充分饱和但又没有发生产流的程度,并用塑料布遮盖放置。

模型槽每隔0.5 m设置一个观察面,记为1~8号,如图5所示。试验过程中每隔5 min测量细沟长度、宽度、深度、流量和产沙速率。在试验模型箱上方和正前方放置两个摄像设备,全程记录细沟发育情况。



图5 试验观测断面

Fig. 5 Test observation section

3 结果与讨论

3.1 细沟发展特征

从试验结果来看,由砂黄土填筑的路基极易受到流水冲蚀。通过观察不同工况下放水流冲刷实验的摄像记录,分析实验数据发现,试验中细沟发育过程具有高度相似性。细沟的发育过程可分为4个阶段(图6):面蚀阶段→跌坑形成阶段→细沟发育阶段→切沟侵蚀、崩塌阶段。

试验开始时,水流快速润湿坡面表层浮土,形成稳定的薄层水流,如图6(a)所示。坡面中发生片蚀的部分位置开始形成串珠状碟形小坑,由于溯源侵蚀和下蚀作用前后跌坑相接,碟形小坑逐渐被破坏,甚至消失,跌坑在坡面上断续贯通,细沟开始形成,如图6(b)所示。随着试验进行诸多跌坑相互连接形成细沟,进入细沟发育阶段,如图6(c)所示。在试验后期,坡面上的细沟逐渐向切沟转化,沟口土体在重力侵蚀的作用下最终坍塌落入沟底,如图6(d)所示。

3.1.1 细沟长度发展

细沟形成初期,水流冲蚀作用下细沟发育活跃,坡面形成大小不一的陡坎,在溯源侵蚀主导下,多个陡坎相互连接,导致所有细沟的总长度迅速增加。随后,细沟侵蚀逐渐达到相对稳定阶段,溯源侵蚀作用下降,随着水流冲刷沟内开始发生下蚀和侧蚀作用,沟底部和两侧土壤逐渐被水流冲刷变得极易侵蚀,细沟沟底宽度增加,细沟长度增量变缓。

不同坡度下细沟侵蚀长度变化具有相似性。以12°为例(以下几类发展特征均以12°为例),变化特征如图7所示。分析图像,细沟达到完全贯通的时间随着冲刷流量的增大而降低。细沟长度随着试

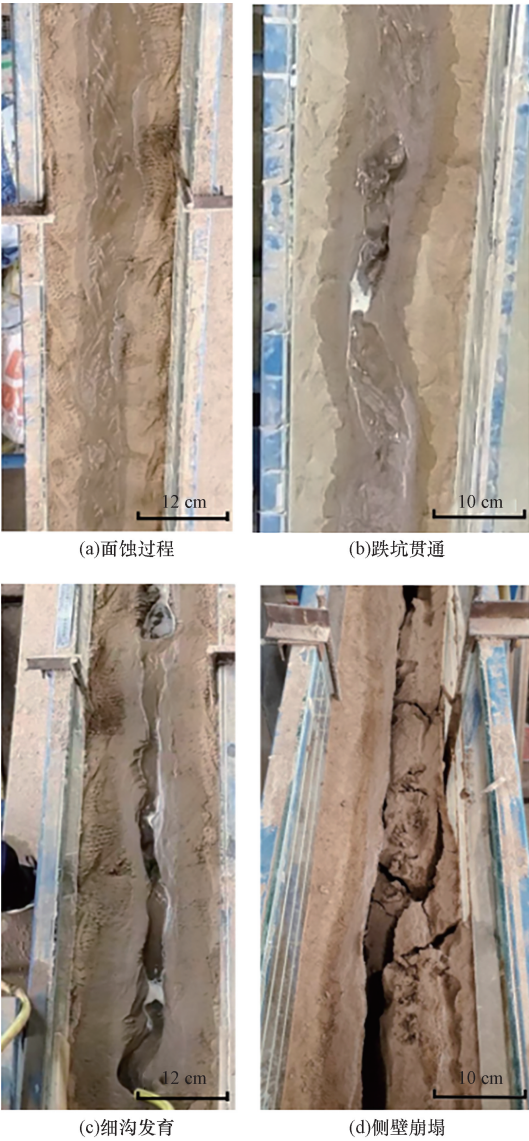


图6 冲蚀过程
Fig. 6 Erosion process

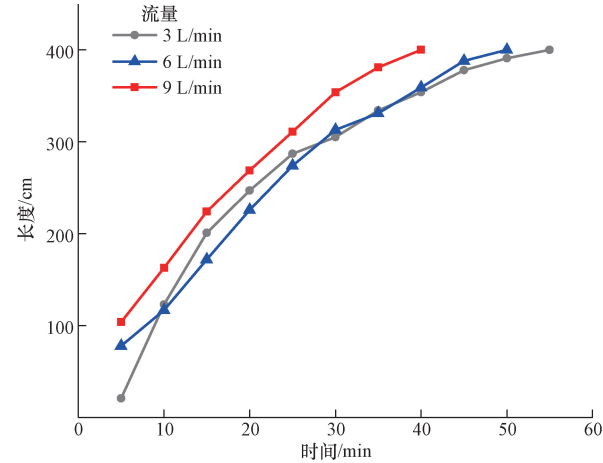


图7 坡度12°时细沟长度随试验时长的变化过程
Fig. 7 Variation of fine groove length with test duration when slope is 12°

验时长的增加先急剧增加,然后逐渐减少。采用幂函数对试验数据进行拟合,得到决定系数 R^2 ,如表1所示,细沟长度的发育和放水时间用幂函数表示。

表1 细沟长度与放水时间拟合函数
Table 1 Fitting function of fine trench length to water release time

坡度/(°)	流量/(g·min ⁻¹)	决定系数 R^2	回归方程
6	3	0.886	$y = 7.508x^{1.059}$
	6	0.945	$y = 7.194x^{1.081}$
	9	0.926	$y = 6.382x^{1.186}$
12	3	0.883	$y = 5.275x^{1.201}$
	6	0.990	$y = 22.927x^{0.748}$
	9	0.997	$y = 36.049x^{0.664}$
18	3	0.983	$y = 33.657x^{0.608}$
	6	0.958	$y = 36.393x^{0.602}$
	9	0.977	$y = 50.028x^{0.585}$

3.1.2 细沟宽度发展

不同工况下细沟侵蚀宽度随时间的变化规律保持一致(图8)。细沟平均宽度随试验时长的增加总体呈现先快速增加后增加速度减慢,试验开始阶段随着陡坎形成连通,细沟开始出现并快速发展,细沟宽度迅速增加,随着细沟发展,细沟深度增加,水流汇聚在细沟内开始出现溯源侵蚀和下蚀,水流对细沟宽度影响减弱,细沟宽度进入缓慢发育阶段。对收集的试验数据进行拟合,采用幂函数,得到 R^2 ,如表2所示,细沟宽度发育与放水时间的关系可用幂函数表示。

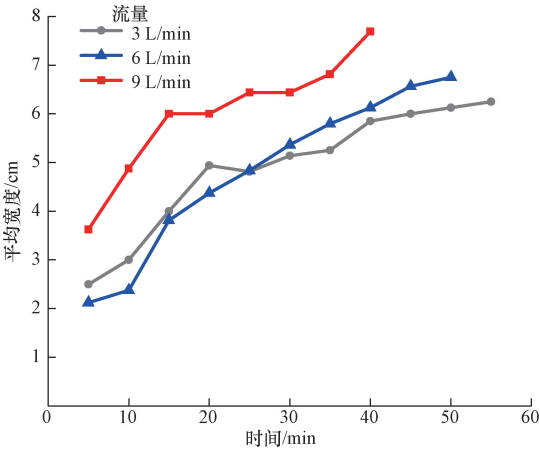


图8 坡度12°时细沟平均宽度随试验时长的变化过程
Fig. 8 Variation of the average width of the fine groove with the duration of the test when the slope is 12°

3.1.3 细沟深度发展

细沟平均深度变化随着试验时长增加呈现一定的规律性(图9)。坡度12°时,3种流量下细沟平均深度变化规律相似,平均深度变化速度均在某时刻达到拐点,流量越大达到拐点的时间越早,拐点说明细沟发育由下切侵蚀为主转变为下切侵蚀

和侧向侵蚀共同作用,部分水流作用于沟侧壁,导致下切侵蚀作用降低,细沟平均深度发育速度下降。

9 L/min 工况下细沟平均深度出现较大的波动,这是因为大坡度和大流量导致溯源侵蚀、下切侵蚀和侧向侵蚀同时作用于细沟,细沟的发育出现较大的不确定性。拟合试验数据,采用幂函数,得到 R^2 ,如表 3 所示,用幂函数表示细沟发育宽度发育和放水时间之间的关系。

表 2 细沟宽度与放水时间拟合函数
Table 2 Fitting function of fine trench width to water release time

坡度/(°)	流量/(g·min ⁻¹)	决定系数 R^2	回归方程
6	3	0.968	$y = 0.543x^{0.623}$
	6	0.951	$y = 1.039x^{0.506}$
	9	0.992	$y = 1.351x^{0.454}$
12	3	0.962	$y = 1.352x^{0.391}$
	6	0.962	$y = 0.982x^{0.493}$
	9	0.950	$y = 2.271x^{0.323}$
18	3	0.975	$y = 0.462x^{0.629}$
	6	0.946	$y = 0.969x^{0.504}$
	9	0.672	$y = 3.976x^{0.155}$

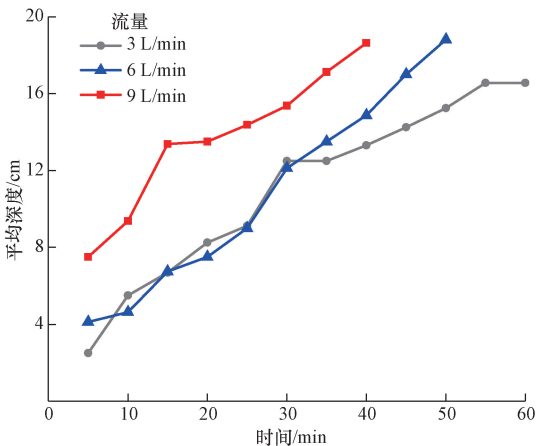


图 9 坡度 12°细沟平均深度随试验时长的变化过程

Fig. 9 Variation of the average depth of the fine groove with the glope of 12°with the duration of the test

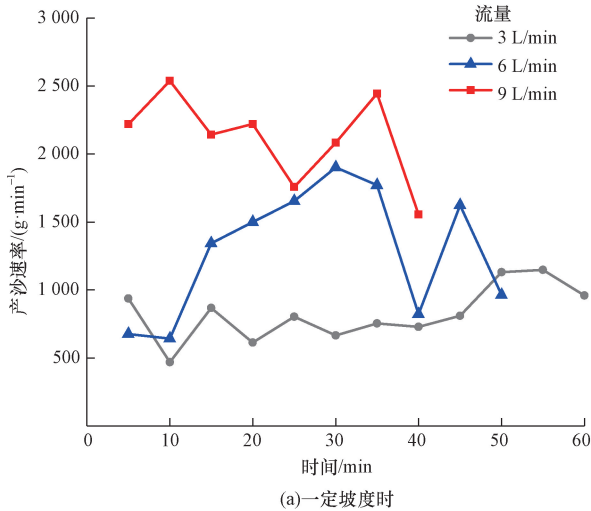
表 3 细沟深度与放水时间拟合函数
Table 3 Fitting function of fine trench depth to water release time

坡度/(°)	流量/(g·min ⁻¹)	决定系数 R^2	回归方程
6	3	0.966	$y = 1.125x^{0.683}$
	6	0.945	$y = 1.174x^{0.684}$
	9	0.965	$y = 2.374x^{0.440}$
12	3	0.979	$y = 0.885x^{0.736}$
	6	0.944	$y = 1.051x^{0.709}$
	9	0.968	$y = 3.751x^{0.427}$
18	3	0.986	$y = 1.127x^{0.678}$
	6	0.986	$y = 0.637x^{0.924}$
	9	0.913	$y = 2.562x^{0.646}$

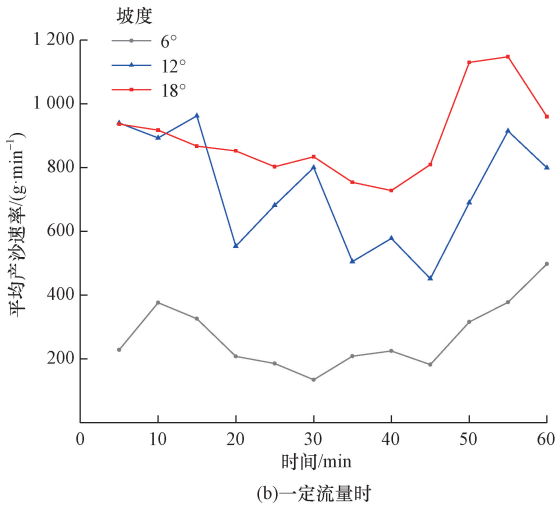
3.2 细沟侵蚀影响因素

每隔 5 min 测一次产沙量,每次测量时间为5 s,计算此段时间内的平均产沙速率得到图 10。总体上相同坡度工况下流量对平均产沙速率的影响有显著的规律。以坡度 18°工况为例[图 10(a)],平均产沙速率随着流量的增大而逐渐增大。由于坡体表面的浮土随着水流的冲刷被带离坡面,导致试验开始时平均产沙速率较大,使实验结果出现波动。流量为 9 L/min 时,由于坡度和流量都较大,同时受到溯源侵蚀、下切侵蚀、侧向侵蚀的共同作用,崩塌现象出现较早,细沟发育较快,平均产沙速率居高不下。

在流量一定时,平均产沙速率随坡度的变化不太明显。以流量 3 L/min 为例[图 10(b)],平均产沙速率在不同坡度工况下略有区别,坡度较大时其平均产沙速率也略微增大。在小坡度时,平均产沙速率始终较小,这是由于在小坡度小流量工况下,细



(a)一定坡度时



(b)一定流量时

图 10 产沙速率随试验时长的变化过程

Fig. 10 Change process of sand production rate with test duration

沟受到的侵蚀作用较为缓慢,崩塌现象出现较为迟缓,因而平均产沙速率变化平稳。

通过参考文献[24-25]的研究,粉黄土在流量为4 L/min,坡度为30°的工况下,平均产沙速率均小于50 g/min;黏黄土在流量为4 L/min,坡度为20°的工况下,产沙量小于0.1 g/mL,计算得到产沙速率小于400 g/min。而陕北砂黄土在流量为3 L/min,坡度为18°的工况下产沙速率均大于400 g/min,明显大于粉黄土和黏黄土的产沙速率。

4 结论

基于现场调查的陕北油田黄土工区道路冲蚀情况,通过物理模型试验对砂黄土道路不同流量和坡度条件下细沟长度、宽度、深度和产沙速率进行研究,得出如下主要结论。

(1)细沟长度、平均宽度和平均深度均与放水时间成幂函数关系,并且受流量和坡度影响显著,总体上随着坡度和流量的增大而增大。细沟宽深比变化总体上经历两个阶段,在试验前30 min发生变化,在30 min后基本趋于稳定。

(2)分析平均产沙速率与坡度和流量的关系得出:坡度一定时,平均产沙速率总体上随着流量的增大而逐渐增大;流量一定时,平均产沙速率受坡度的影响较小;相较于坡度,流量影响幅度更大。

(3)与黄土高原中南部的黏黄土和粉黄土相比,相同工况下砂黄土的产沙速率更大,更易产生冲蚀灾害,因此对砂黄土坡面进行冲蚀防治更有意义。

参 考 文 献

- [1] 吴博华, 权全, 徐家隆, 等. 陕北黄土高原极端降水对温度变化的响应研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(6): 22-27, 33.
Wu Bohua, Quan Quan, Xu Jialong, et al. Response of extreme precipitation to temperature change in the Loess Plateau of northern Shaanxi[J]. Yellow River, 2022, 44(6): 22-27, 33.
- [2] Merritt E. The identification of four stages during micro-rill development[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1984, 9(5): 493-496.
- [3] 郑粉莉. 黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究[J]. 土壤学报, 1998(1): 95-103.
Zheng Fenli. Study on inter-furrow erosion and fine furrow erosion in slope cultivated land in loess area[J]. Acta Pedologica Sinica, 1998(1): 95-103.
- [4] 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(1): 48-56.
Wu Shufang, Liu Zhenghong, Huo Yunyun, et al. Development of rill erosion on loess slope and its simulation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015(1): 48-56.
- [5] 冯乐涛, 吴玮江, 刘兴荣, 等. 黄土高原降水入渗方式与引发滑坡研究——以甘肃黄土地区为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(14): 5937-5945.
Feng Letao, Wu Weijiang, Liu Xingrong, et al. Study on precipitation infiltration mode and landslide induction in the Loess Plateau: a case study of the loess area of Gansu Province[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(14): 5937-5945.
- [6] 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(11): 49-54.
Lei Tingwu, Nearing M A. Flume experiments for determining rill hydraulic characteristic erosion and rill patterns[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(11): 49-54.
- [7] 刘俊体, 孙莉英, 张学培, 等. 黄土坡面细沟发育过程及侵蚀产沙特征研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3): 18-23.
Liu Junti, Sun Liying, Zhang Xuepei, et al. A study of rill evolution process and sediment yield characteristics on loess slope[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(3): 18-23.
- [8] Lou Y C, Gao Z L, Sun G F, et al. Runoff scouring experimental study of rill erosion of spoil tips[J]. Catena, 2022, 214: 106249.
- [9] 曹美晨, 辛艳, 任正龔, 等. 半干旱黄土丘陵沟壑区不同土地利用坡面的降雨侵蚀特征[J]. 泥沙研究, 2022, 47(6): 43-50.
Cao Meichen, Xin Yan, Ren Zhengyan, et al. Rainfall erosion characteristics of different land use slopes in semi-arid loess hilly gully areas[J]. Journal of Sediment Research, 2022, 47(6): 43-50.
- [10] 李瑞, 岳坤前. 贵州喀斯特地区坡面土壤侵蚀机理研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(7): 150-153.
Li Rui, Yue Kunqian, . Study on soil erosion mechanism of slope in Karst area of Guizhou[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(7): 150-153.
- [11] 李熙, 王重卿, 车艳红, 等. 不同降雨条件下土质开挖坡面的细沟间侵蚀特征[J]. 亚热带资源与环境学报, 2023, 18(2): 78-85.
Li Xi, Wang Chongqing, Che Yanhong, et al. Erosion characteristics of fine trenches of soil excavation slopes under different rainfall conditions[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2023, 18(2): 78-85.
- [12] Bewket W, Sterk G. Assessment of soil erosion in cultivated fields using a survey methodology for rills in the Chemoga watershed, Ethiopia[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, 97(1/3): 81-93.
- [13] 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.
Yan Dongchun, Wang Yifeng, Wen Anbang, et al. Configuration evolution of rill development on purple slopeland[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(4): 469-473.
- [14] 谭贞学, 王占礼, 王莎, 等. 黄土坡面细沟侵蚀过程[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(6): 1-5.
Tan Zhenxue, Wang Zhanli, Wang Sha, et al. Rill erosion processes on loess hillslope[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(6): 1-5.
- [15] 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.
Niu Yaobin, Gao Zhaoliang, Li Yonghong, et al. Rill morphology development of engineering accumulation and its relationship with runoff and sediment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(19): 154-161.

- [16] 倪世民, 冯舒悦, 王军光, 等. 不同质地重塑土坡面细沟侵蚀形态与水力特性及产沙的关系[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 149-156.
Ni Shimin, Feng Shuyue, Wang Junguang, et al. Relationship between rill erosion morphology and hydraulic characteristics and sediment yield on artificial soils slope with different textures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(15): 149-156.
- [17] 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.
Qi Xingyuan, Gao Zhaoliang, Zhang Xiang, et al. Rill dynamic development process of loess engineering accumulation with variable slope length[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(3): 42-48.
- [18] 韩振兴. 陕北砂黄土物理及动力特性试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2023
Hang Zhenxing. Experimental study on physical and dynamic characteristics of sand loess in northern Shaanxi[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [19] 李占斌, 秦百顺, 亢伟, 等. 陡坡面发育的细沟水动力学特性室内试验研究[J]. 农业工程学报, 2008(6): 64-68.
Li Zhanbin, Qin Baishun, Kang Wei, et al. Indoor experimental studies on hydrodynamic characteristics of runoff in rill erosion procession steep slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008(6): 64-68.
- [20] 王爱娟, 符素华, 冯克义, 等. 放水冲刷条件下紫色土细沟侵蚀特征[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(5): 23-28.
Wang Aijuan, Fu Suhua, Feng Keyi, et al. Rill erosion characteristics of purple soil by flume flushing method[J]. Science of Soil and Water Conservation. 2016, 14(5): 23-28.
- [21] 赵士杰, 蔡雄飞, 王济, 等. 喀斯特地区坡耕地细沟侵蚀产流产沙过程及特征[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(27): 11012-11017.
Zhao Shijie, Cai Xiongfei, Wang Ji, et al. The process and characteristics of aborted sand produced by erosion of fine furrows in slope cultivated land in Karst area[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(27): 11012-11017.
- [22] 赵双庆. 董志塬黄土坡面侵蚀机制的试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
Zhao Shuangqing. Experimental study on erosion mechanism of loess slope in the Dongzhi tableland[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [23] 刘洪华, 武闻禹, 王志朋, 等. 基于大型物理模型试验的强降雨诱发全风化花岗岩滑坡失稳分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(27): 11530-11539.
Liu Honghua, Wu Wenyu, Wang Zhipeng, et al. Instability analysis of heavily weathered granite landslide induced by heavy rainfall based on large-scale physical model experiments[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(27): 11530-11539.
- [24] 杨涛, 李明俐, 孙东, 等. 黄土高陡塬坡降雨侵蚀机制及生态防治技术[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(32): 14518-14526.
Yang Tao, Li Mingli, Sun Dong, et al. Rainfall erosion mechanism and ecological control technology of high and steep slopes of loess[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(32): 14518-14526.
- [25] 雷廷武, 张晴雯, 赵军, 等. 细沟侵蚀动力过程输沙能力试验研究[J]. 土壤学报, 2002(4): 476-483.
Lei Tingwu, Zhang Qingwen, Zhao Jun, et al. Laboratory study on sediment transport capacity in the dynamic process of rill erosion[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002(4): 476-483.