

银西高铁董志塬地区边坡侵蚀特性分析

夏万云

Analysis on characteristic of slope erosion in Dongzhiyuan plateau of Yinchuan–Xi'an high-speed railway

XIA Wanyun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.01-12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

石灰改良高液限土强度特性的函数模型研究

Research on function model of lime-improved high liquid limit soil strength characteristics

胡宏坤, 邵珠山 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 109–117

降雨矿震叠加作用下抚顺西露天矿边坡稳定性分析

Analysis on the slope stability of Fushun West Open-pit Mine under superimposed action of rainfall, mine and earthquake

刘向峰, 郭子钰, 王来贵, 高晗 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 40–46

黄土高填方场地裂缝的发育特征及分布规律

Development and distribution characteristics of ground fissures in high loess filled ground

于永堂, 郑建国, 张继文, 刘智 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 85–92

甘肃舟曲哑豁口滑坡复活机理及成因探讨

Mechanism and causal analysis on the Yahuokou landslide reactivation and causes (Zhouqu County, Gansu, China)

窦晓东, 张泽林 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 9–18

中等倾角岩层顺向坡滑坡发育特征及形成机制分析

Development characteristics and formation mechanism of the medium-dip bedding slopes: A case study of the landslide on the left bank of Tuodan reservoir dam

王玉川, 郭其峰, 周延国 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 17–23

广东佛山市高明区李家村岩溶塌陷群成因机理分析

Analysis on the formation mechanism and development process of karst collapses in Lijia Village, Gaoming District of Foshan City

韩庆定, 罗锡宜 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 56–64



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.01-12

夏万云. 银西高铁董志塬地区边坡侵蚀特性分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(1): 99-106.

XIA Wanyun. Analysis on characteristic of slope erosion in Dongzhiyuan plateau of Yinchuan–Xi'an high-speed railway[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 99-106.

银西高铁董志塬地区边坡侵蚀特性分析

夏万云

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要:黄土坡面侵蚀特性研究对于铁路边坡及路基防护具有重要的意义。通过银西高铁董志塬段某路基护坡坡面冲刷试验, 获得了不同冲刷历时、冲刷流量、坡度等条件下的坡面冲刷结果, 并对坡面流水动力学特性、坡面产沙规律、坡面产沙机理进行了分析, 得出以下结论: (1) 坡顶和坡底比坡面中部更易受侵蚀; 30°~60°斜坡在较小的冲刷强度下也能产生较明显的侵蚀沟, 宜采取 45°左右的多级矮坡来减弱侵蚀强度。(2) 坡面流水动力学特性分析表明, 试验工况水流主要处于过渡流区; 平均流速与冲刷流量、坡度呈幂函数关系; 达西阻力系数与冲刷流量、坡度呈负相关, 且与雷诺数相关性较低。(3) 平均含沙量随冲刷流量与坡度的增大而增大, 随历时近似线性增加, 约 20 min 以后, 含沙量基本稳定, 此过程为坡面沟道发展阶段。(4) 坡面侵蚀产沙量与侵蚀切应力、有效水流功率都呈正相关, 与前者近似呈线性增大关系, 而与后者近似呈幂函数关系。

关键词:冲刷试验; 侵蚀特性; 水动力学特性; 产沙机理; 拟合; 幂函数

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)01-0099-08

Analysis on characteristic of slope erosion in Dongzhiyuan plateau of Yinchuan–Xi'an high-speed railway

XIA Wanyun

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China)

Abstract: The study of erosion characteristics of loess slope is of great significance, through the scour experiment on a slope in Dongzhiyuan of Yinxi high-speed railway, the erosion state of slope under different scour duration, scour flow and gradient were obtained. The dynamic characteristics of overland flow and the sediment mechanism were further analyzed and fitted, and the following conclusions were drawn: (1) The top and bottom of the slope are more easily eroded than the middle of the slope; The slopes of 30°–60° can produce obvious erosion gullies even with small scouring intensity, and it is advisable to adopt a short the multi-stage short slopes of about 45° to reduce weaken the erosion intensity. (2) The analysis of the hydrodynamic behavior of the overland flow shows that the flow is mainly in the transitional flow zone. The average flow under the test condition velocity, is a power function with the scour flow and gradient; the Darcy resistance coefficient is negatively correlated with scour flow and gradient, and correlation with values of Re is low. (3) The average sediment concentration is positively correlated with the scour flow and gradient, and increases linearly with the scour duration. After about 20min, the sediment concentration is basically stable, and this process is the stage of development of slope channel. (4) The sediment yield is positively correlated with erosion shear stress and effective water flow power. and it approximately

收稿日期: 2021-05-17; 修订日期: 2021-08-12

投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

基金项目: 中国铁建“黄土溯源侵蚀机制及其对铁路工程影响研究”项目基金(股份公司科研开发项目 14-C15)

作者简介: 夏万云(1981-), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事铁路勘察设计方面的工作。E-mail: 113497464@qq.com

linearly increases with the former while it is power function with latter.

Keywords: scour experiment; erosion characteristics; hydrodynamic behavior; sediment mechanism; fitting analysis; power function

0 引言

银西高铁董志塬段沟谷深切、地形破碎、多呈“V”字型,在降雨作用下侵蚀作用强烈,线路周边调绘发现滑坡 1 500 余处,溜坍体 900 余处。因此地表重力式不良地质灾害成为影响银西高铁线路走向的决定因素。分析黄土边坡侵蚀特性,研究其对黄土地区铁路工程的影响和破坏,对保障铁路工程建设安全,维护铁路运营安全有着举足轻重的作用。

溯源侵蚀^[1-7]是黄土地区沟谷发育演化的主要形式。陈绍宇等^[8-9]将沟头溯源侵蚀划分为水力冲刷型、裂缝诱发型、陷穴诱发型和人为诱发型等 4 种类型;史倩华等^[10]采用模拟降雨和放水冲刷的方法,研究集水区不同坡度和不同流量对黄土地区沟头溯源侵蚀过程和孔隙水压力特征值的影响规律;张科利^[11]通过黄土坡面径流冲刷试验对细沟水力学特性进行了研究;沙际德等^[12]通过室内模拟试验等手段,从水力学及能耗等方面深入了解细沟的水力学特征;张光辉^[13]通过变坡水槽实验探寻不同坡度条件下的薄层水流动力学特性;覃超等^[14]在三维倾斜测量的基础上,通过人工模拟不同流量和坡度径流冲刷,根据其不同条件下的产沙特征,得出溯源侵蚀下沟头变化与产沙规律。

现场试验对于深化黄土边坡侵蚀特性的认识具有重要意义,但以往研究多基于室内试验,模型及试验条件过于理想化,与实际情况相差较大。鉴于此,文章在前人研究的基础上,进行现场冲刷试验,旨在了解一定条件下的坡面冲刷情况,并对坡面流水动力学特性及产沙机理进行分析^[15-17],从而对铁路路基和边坡的防护提供指导^[18-19]。

1 试验基本目的

董志塬地区发生溯源侵蚀^[20]的沟头上方汇水面积巨大,由此产生了很大的径流量,给坡面及沟头造成很大的破坏。调查中汇水面积非常难测量,基于当地气候及降雨因素分析,利用体积法拟定坡面冲刷流量,通过若干扁平软管从坡顶对原状黄土坡面直接给水进行冲刷试验,研究董志塬地区土体在特定水动力条件下,坡面水动力参数与边坡地形地貌的关系、坡面侵蚀产沙机理,并确定侵蚀启动的水动力和斜坡结构条件。

现场试验选在董志塬庆阳市西峰区隧道口护坡上(图 1)。该段表层黄土结构疏松,孔隙发育,均为自重湿陷性黄土场地,湿陷等级多为 III ~ IV 级。勘探揭示,试验区表层为深厚第四系上、中更新统黄土覆盖,下伏新近系上新统泥岩,基底为白垩系砂岩夹泥岩,铁路工程设置主要位于黄土层中。银西高铁对董志塬段黄土进行了大量取样试验工作,试验组数 6 800 组,统计表明^[21]:上更新统黄土天然含水率在 16.17% ~ 19.32%,塑性指数在 10.27 ~ 11.73,内摩擦角为 21.26° ~ 22.45°,黏聚力为 28.33 ~ 30.04 kPa。



图 1 坡面冲刷试验位置

Fig. 1 Site of the scour experiment of loess slope

2 现场试验设计

2.1 基本测试项目

试验现场基本测试项目:径冲刷流量、冲刷流速、泥沙冲刷量、冲沟几何形态等。

径冲刷流量通过在试验槽末端安置集流桶,用体积法测定。冲刷流速测定是在坡面槽的标记点处设置测流断面,采用高锰酸钾作为示踪剂,通过 DIC 摄影机连续拍照来近似计算坡面流速,重复测速 3 ~ 5 次,获取其平均值,得出断面间平均流速。泥沙冲刷量在坡底收集冲刷的泥沙,并记录水流量,两者相比即可得到单位流量水体的含泥沙率。另外,冲沟几何形态用卷尺测量。

2.2 试验设计

依据现场实际坡面及试验器材,绘制试验基本模

型如图 2 所示,坡长 2.5 m、宽 12.5 m,图 2 中涉及到的器材主要有蓄水箱、水泵、消防水带、4 寸软水管、可控流量阀门、压力表、20 cm 宽的扁形状出水口、导流板(分割坡面为小的区域并用于径流模拟)、DIC 摄影机。

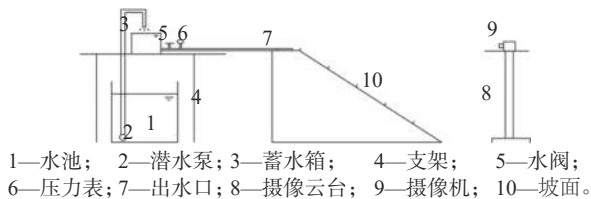


图 2 冲刷试验示意图

Fig. 2 Diagram of the scour experiment

依据董志塬地区自然斜坡坡度统计结果,取 4 个代表性坡面角度: 30° 、 45° 、 60° 、 90° ;同时,通过对原位试验场地汇水区面积的计算,以及庆阳市西峰区气象站点降雨数据的统计与分析,用体积法标定冲刷初始流量: 1 L/min、2 L/min、4 L/min、6 L/min。

2.3 试验步骤

(1)构建蓄水池,铺设管路,先将蓄水池中的水用潜水泵引导至一定高度的蓄水箱中,并保持蓄水箱满水状态,蓄水箱下端连接 4 寸软水管并安装用来调节流量水阀和压力表,软水管末端连接扁平形状的出水口。

(2)沿坡向将坡面用导流板隔成 9 个 20 cm 宽的窄段坡面,以便于分别进行不同工况的试验。

(3)将 9 个窄段坡面修葺为 4 组不同坡度的窄段坡面,平整坡面,并对坡面进行灌溉给水使其完全饱和。

(4)在 2.5 m 长的窄段坡面侧壁上,每隔 0.5 m 标记刻度,以便于分别测量坡面不同位置处的流速。

(5)坡面上滴高锰酸钾染色剂,并用摄像机实时监控拍摄稳定后的坡面水流。

(6)每隔一段时间在坡面的标记处,收集搬运得到的泥沙,描述坡面冲刷形貌并测量坡面上冲沟的长宽深。

(7)烘干各个位置各个时间的泥沙得到产沙量,视频处理得到每个位置的水流流速。

(8)通过改变流量、坡体坡度,再重复(3)~(8)的步骤,进行新的一组试验。

(9)试验完毕整理数据,计算不同坡度、流速下的侵蚀率、含沙量、流速之间的关系,利用已有的侵蚀模型,如 WEPP 模型^[22],构建与本地区相适应的侵蚀模型参数。

3 坡面冲刷结果

3.1 不同时长下坡面冲刷情况

以冲刷流量 4 L/min,坡度 45° 为例,记录不同时长下坡面冲刷情况见图 3。

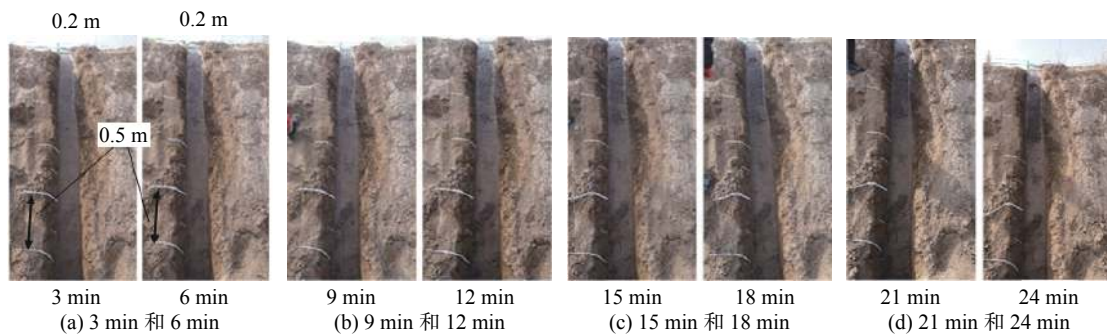


图 3 不同时长下坡面冲刷情况(冲刷流量 4 L/min,坡度 45°)

Fig. 3 Slope scouring results in different time periods

由图 3 可见,冲刷历时 3 min 坡面并未发生明显的下切侵蚀,坡面的主要侵蚀方式为层流侵蚀;6 min 时坡面小部分黄土颗粒被水流冲走,坡面上形成许多小的跌坑;随着坡面冲刷历时的增加,小跌坑逐渐连在一起形成细沟,细沟出现后侵蚀明显加快。坡顶和坡底的侵蚀较为显著,坡面中部形成保水泥膜阻挡了水流的深入与冲刷。侵蚀加剧直至实验结束,冲刷实验结束时(24 min)侵蚀量最大。

3.2 不同流量条件下的边坡冲刷情况

以冲刷历时 20 min,坡度 60° 为例,观察发现,随着流量的增大,冲沟最大沟深由 10 cm 增加到 30 cm,冲沟逐渐加深,坡面的冲刷破坏越来越严重,不同流量下坡面冲刷情况见图 4。

3.3 不同坡度下的边坡冲刷情况

以历时 20 min,流量 2 L/min 为例, 30° 的坡面不易形成冲沟,坡面几乎没有侵蚀,坡面末端收集的水含沙

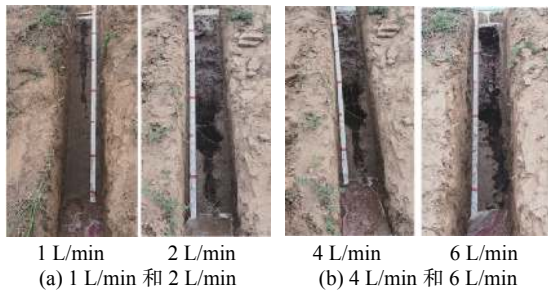


图 4 不同流量下的坡面冲刷情况 (冲刷历时 20 min, 坡度 60°)

Fig. 4 Slope scouring results under different feed flow

很少; 60°的坡面很快形成冲沟, 冲沟迅速加深并很快就破坏; 可见, 坡度越大受到的冲刷越严重, 不同坡度条件下坡面冲刷情况见图 5。

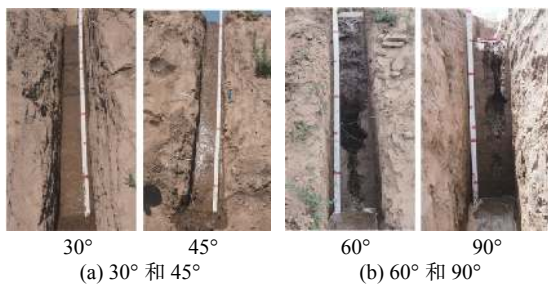


图 5 不同坡度下的坡面冲刷情况 (冲刷历时 20 min, 冲刷流量 2 mL/min)

Fig. 5 Slope scouring results at different gradient

4 结果分析

4.1 坡面流水动力学特性分析

4.1.1 平均流速

图 6 反应了在不同坡度试验条件下平均流速与冲

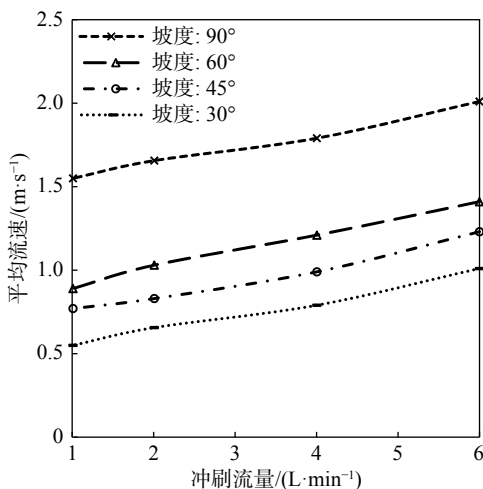


图 6 平均流速与冲刷流量、坡度的关系

Fig. 6 Relationship between average flow velocity and feed flow at different gradient

刷流量的关系, 可见, 平均流速与冲刷流量呈正相关, 这与张科利^[11]、张光辉^[13]的实验结果一致。而相同径流条件下, 地表坡度与平均流速关系不明显, 这与 NEARING 等^[3]、GOVERS^[4]和沙际德等^[12]研究结果相似。不少学者^[3-4, 11-12]在研究水动力学基本关系过程中, 发现细沟水流平均流速与坡度和单宽流量之间存在如式(1)所示的幂函数关系。

$$u = KQ^\alpha J^\beta \quad (1)$$

式中: u ——平均流速/($m \cdot s^{-1}$);

Q ——流量/($L \cdot min^{-1}$);

J ——水力坡度;

K ——综合阻力系数;

α ——流量项指数值;

β ——水力坡度项指数值。

经过拟合, 本试验中平均流速与单宽流量、水力坡度的关系可用式(2)表示。

$$u = 0.158Q^{0.123}J^{0.041} \quad (2)$$

可见, β 值为 0.041, 表明坡度的变化对平均流速影响较小, 该数值与张科利^[11]试验结果(平均流速与水力速度呈幂函数变化趋势)有所不同, 分析造成这种现象的原因是径流侵蚀过程中沟道床面形态和各水力因素之间相互影响、相互作用的结果。当流量不变, 水力坡度不同时产生的细沟径流导致沟床形态变化而产生的糙率不同。当水力坡度增大的时候, 水流均速随之增大, 水流具有的能量增大, 相应地水流对床面的冲刷更加剧烈, 致使流道摆动, 沟壁坍塌, 水流含沙量增大, 最终导致床面综合粗糙率增大, 而糙率的增加则意味着径流所受阻力变大, 径流克服阻力做功及能量耗散加大, 从而平均流速的增加退居次要地位。总的来说, 相比张科利^[11]试验, 本试验设计更接近实际情况。

4.1.2 雷诺数 Re

各试验工况平均雷诺数见表 1, 由表可知, 雷诺数变化范围为 466 ~ 2 012, 水流主要处于过渡流区。在相同坡度条件下, 雷诺数与冲刷流量呈正相关关系; 在相同流量条件下, 雷诺数与坡度变化并无明显关系。该结

表 1 坡面冲沟水流雷诺数

Table 1 Values of Re of gully flow on slope

试验坡度/(°)	冲刷流量/($L \cdot min^{-1}$)			
	1	2	4	6
90	466	687	1 100	1 891
60	556	794	1 432	2 012
45	613	855	865	1 922
30	785	876	633	1 444

果表明细沟雷诺数 Re 的变化受冲刷流量的影响要比坡度大,其原因可能是水流下渗、坡面流冲刷等因素造成的。从能量转换的角度分析,水力坡度较大时,水流对细沟坡面冲刷作用较强,径流势能转化为动能的过程中,容易形成较多较深的跌坎,因而雷诺数与坡度关系相对变得复杂。

4.1.3 达西阻力系数 λ

图 7 所示为不同冲刷流量作用下,达西阻力系数与坡度的关系。可见,阻力系数随坡度的增大而减小,且减小趋势相对变缓;同时,阻力系数与冲刷流量呈反比关系。出现上述现象的原因是,流量较小时,坡面较为粗糙,地表径流紊动性较强,细小颗粒间的吸附摩擦力较强,相对的阻力系数值较大;伴随地表径流量的变大,增大了水流切应力值,致使颗粒间的吸附摩擦力减弱,削弱了地表径流紊动性,阻力值对应变小。

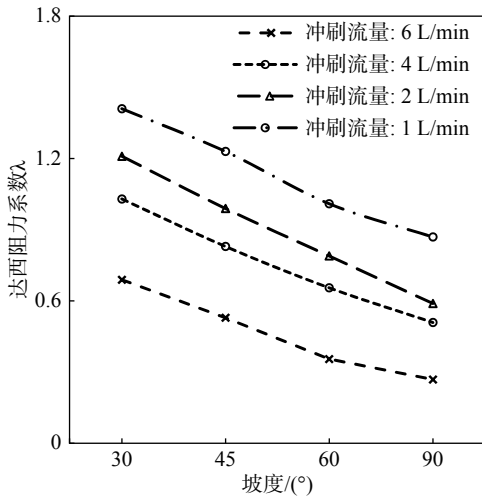


图 7 达西阻力系数与冲刷流量、坡度的关系

Fig. 7 Relationship between average flow velocity and gradient at different values of Re

黄土坡面细小颗粒的摩擦与吸附直接影响了地表径流过程,现将达西阻力系数 λ 与雷诺数 Re 的关系示于图 8,分析可见,阻力系数与雷诺数并无直接明显关系,其阻力系数主要与黄土坡面的颗粒含量和颗粒粒径大小有密切相关,说明冲刷阻力主要受床面跌坎与坡面结皮影响。由于试验是在大于 30° 坡面上进行的,水力梯度大,水流扰动性强,因此,坡面阻力系数既受坡面条件作用,同时也与坡面侵蚀三维形态变化有密切关系。当同等流量条件下,黄土的黏粒含量决定着阻力系数值,当黏粒含量越高,其颗粒黏聚力越大,越容易在黄土表层形成保护层即所谓的结皮,其水流流速越大,阻力系数越小;当黏粒含量越小,其颗粒黏聚力越小,在水流

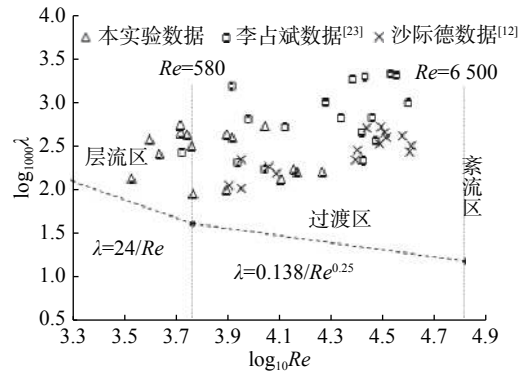


图 8 达西阻力系数与雷诺数的双对数关系

Fig. 8 The log-log relationship between Darcy resistance coefficient and value of Re

的冲刷作用下越容易形成跌坑,从而减小水流能量,增大其阻力系数,进一步加剧了跌坑发展,加大坡面产沙量,更易发生坡面及坑壁坍塌等现象。

4.2 坡面侵蚀产沙量

总体而言,坡面剥蚀产沙量是评判径流侵蚀机理的重要指数,对于研究董志塬地区黄土溯源侵蚀机理具有举足轻重的作用。

4.2.1 坡面侵蚀产沙量与冲刷流量、坡度的关系

根据水力冲刷历时 30 min,测定冲蚀下来的泥沙量,绘制不同坡度下产沙率与冲刷流量之间的关系如图 9 所示。可知,平均含沙量随冲刷流量增大而增大,增大趋势趋缓;含沙量而随坡度的增大一直呈增加趋势。通过三维激光扫描及现场摄影技术可以看出,冲刷过程中由滴坑发展成为细沟及后续的阶梯状沟谷,且其位置随着冲刷历时的变化而变化;随着坡面冲刷及泥沙搬运、沉积反复交替作用,坡面侵蚀沟谷的变化亦反作

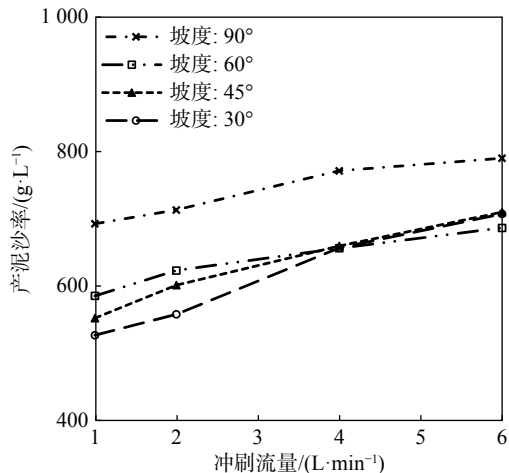


图 9 不同坡度下产泥沙率与冲刷流量的关系

Fig. 9 Relationship between sediment yield rate and feed flow at different gradient

用改变着水流流速与侵蚀产沙量。

4.2.2 坡面侵蚀产沙随冲刷历时的变化

不同时段细沟侵蚀剧烈程度量化表现为该时段区域范围内的产沙量多少。本次选取不同试验组次下的含沙量为研究对象,整理结果如图 10 所示。

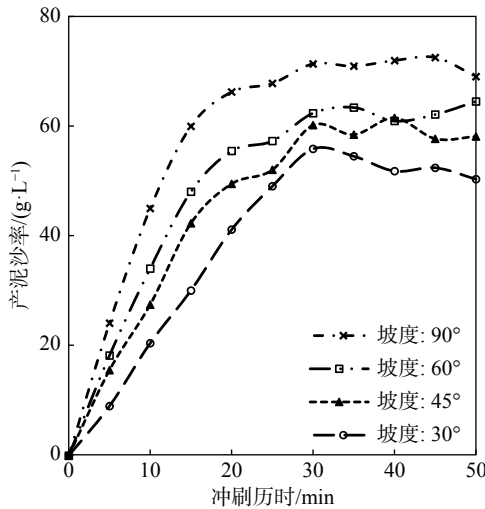


图 10 不同坡度下产泥沙率与冲刷历时的关系

Fig. 10 Relationship between sediment yield rate and scour time at different gradient

可见,冲刷初始阶段,含沙量随历时近似线性增加,且坡度越大,增加速率越快。其中,在坡度较小情况下,含沙量变化更为稳定,可能原因是坡度越缓,坡面方向分力越小,流速越慢,冲刷能力越小。约 20 min 以后,含沙量基本稳定,呈微小波动,可能原因是随着冲刷历时增加,坡面逐渐出现不同跌坑,并持续发展,由于冲刷与淤积的反复作用,部分跌坑贯通连续形成细沟,因此从侵蚀产沙量的时间曲线上表现为细小波动的现象,此过程即为沟道发展阶段。

4.3 坡面冲刷侵蚀产沙机理分析

4.3.1 产泥沙率与坡面冲刷切应力关系

假定坡面流态为均匀流,利用 FOSTER^[2]提出的剪切力计算公式,可得各工况下的坡面冲刷剪切力见表 2。可见,剪切应力与坡度及冲刷流量密切相关,其大小随

表 2 各工况下坡面冲刷剪切力

Table 2 Slope scour shear forces under various conditions

坡度/(°)	冲刷流量/(L·min ⁻¹)			
	1	2	4	6
30	0.348	0.424	0.536	0.613
45	0.812	1.201	1.45	1.561
60	1.345	1.880	2.485	2.554
90	1.651	2.001	3.031	3.974

冲刷流量及坡度的增大而增大,相较而言,坡度对其变化趋势的影响更为明显。

由此可得不同工况下坡面冲刷产沙量和切应力的关系如图 11 所示。由图可知,坡面冲刷产沙量与侵蚀切应力二者关系较为密切,产沙量的多少随切应力的增加而增加,近似呈线性相关关系,经过拟合,含沙量与径流切应力的关系为如式(3)所示。

$$G = 48.98\tau + 4.899 \quad (3)$$

式中: G ——含沙量/(g·L⁻¹);

τ ——径流切应力^[2]/Pa。

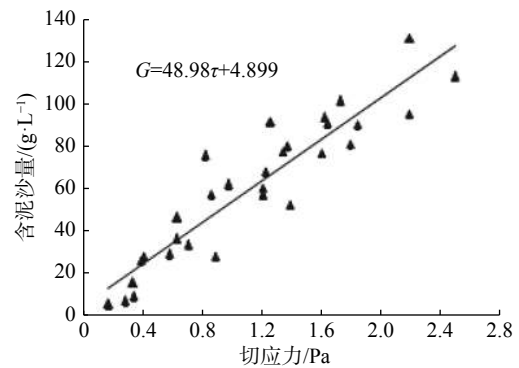


图 11 坡面侵蚀切应力与含沙量关系

Fig. 11 Relationship between scour shear stress and sediment yield rate on slope

黄土边坡径流强烈的主要判定标准为产沙量的多少,而产沙量与侵蚀切应力二者关系较为密切,其相关系数为 0.875。

4.3.2 产泥沙率与有效水流功率关系

借鉴 BAGNOLD^[1]在渠道水力学方面给出的水流功率概念,则在不同工况下坡面侵蚀产沙量与有效水流功率的关系如图 12 所示。通过水流功率能更有效的表

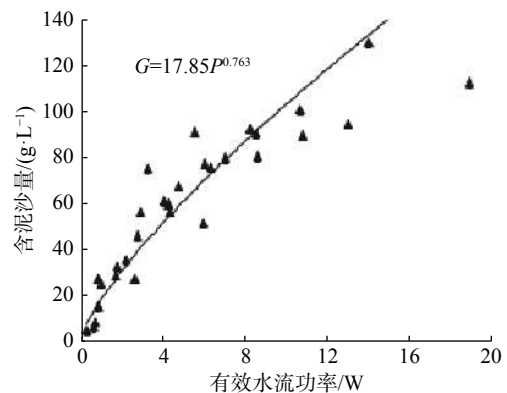


图 12 坡面有效水流功率与含沙量关系

Fig. 12 Relationship between effective scour power and sediment yield rate on slope

示冲刷过程中克服黄土表层阻力消耗的能量,通过多次试验,对比分析含沙量与有效水流功率,绘制相关关系图并进行拟合,可见两者呈幂函数关系,具体关系如下:

$$G = 17.85P^{0.763} \quad (4)$$

式中: G ——含义同式(3);

P ——有效水流功率^[1]/($N \cdot ms^{-1}$)。

其与有效水流功率相关系数大于与有效切应力,综合表明,有效水流功率能更有效的描述黄土坡面侵蚀产沙量,二者关系更为显著。

5 结论

文中选取银西高铁董志塬段某路基护坡,通过原状黄土坡面冲刷试验,获得了不同冲刷历时、冲刷流量、坡度等条件下的坡面冲刷情况,进一步分析了坡面流水动力学特性、不同控制条件下的坡面产沙情况及产沙机理,主要得出以下结论:

(1)坡度越大受到的冲刷越严重;相比坡面中部,坡顶和坡底的侵蚀较为显著;冲刷流量越大,坡面冲刷破坏越严重;30°~60°斜坡在较小的冲刷强度(1~4 L/min)下也能产生较明显的侵蚀沟,斜坡角度大于45°后,侵蚀会剧烈发展,因而宜采取45°左右的多级矮陡坡来减弱侵蚀强度。

(2)坡面流水动力学特性分析表明:平均流速与冲刷流量、坡度的关系可用幂函数来描述,平均流速与冲刷流量呈正相关,与坡度的关系不太显著;分析雷诺数变化范围可得试验工况水流主要处于过渡流区,在相同坡度条件下,雷诺数与冲刷流量呈正相关关系;在相同流量条件下,雷诺数与坡度变化并无直接明显关系;达西阻力系数随坡度的增大而减小,且减小趋势相对变缓;同时,阻力系数与冲刷流量呈反比关系;阻力系数与雷诺数并无直接明显关系,其阻力系数主要与黄土坡面的颗粒含量和颗粒粒径大小有密切相关,说明冲刷阻力主要受床面跌坑与坡面结皮影响。

(3)平均含沙量与冲刷流量及坡度有密切相关性,其含量随冲刷流量增大而增大,增大趋势趋缓;含沙量而随坡度的增大呈一直增加趋势,其中,在坡度较小情况下,含沙量变化更为稳定;含沙量随历时近似线性增加,约20 min以后,含沙量基本稳定,仅呈微小波动,此过程为沟道发展阶段。

(4)剪切应力与坡度及冲刷流量密切相关,呈正相关关系,其大小随冲刷流量及坡度的增大而增大,相较而言,坡度对其变化趋势的影响更为明显。坡面侵蚀产沙量与侵蚀切应力相关性较大,两者近似呈线性增大关

系;坡面侵蚀产沙量与有效水流功率呈显著正相关关系,且可近似用幂函数拟合。

参考文献 (References) :

- [1] BAGNOLD R A. An approach to the sediment transport problem from general physics [J]. USGS Professional Paper, 1966: 422 - 437.
- [2] FOSTER G R. Modeling the erosion process [M]. St Joseph: ASAE Monogr, 1982: 296 - 380.
- [3] NEARING M A, FOSTER G R, LANE L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology [J]. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(5): 1587 - 1593.
- [4] GOVERS G. Relationship between discharge, velocity and flow area for rills eroding loose, non-layered materials [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1992, 17(5): 515 - 528.
- [5] ZHANG B J, XIONG D H, SU Z G, et al. Effects of initial step height on the headcut erosion of bank gullies: a case study using a 3D photo-reconstruction method in the dry-hot valley region of southwest China [J]. *Physical Geography*, 2016, 37(6): 409 - 429.
- [6] ZHANG B J, XIONG D H, ZHANG G H, et al. Impacts of headcut height on flow energy, sediment yield and surface landform during bank gully erosion processes in the Yuanmou Dry-hot Valley region, southwest China [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(10): 2271 - 2282.
- [7] GUO M M, WANG W L, SHI Q H, et al. An experimental study on the effects of grass root density on gully headcut erosion in the gully region of China's Loess Plateau [J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(17): 2107 - 2125.
- [8] 陈绍宇, 许建民, 王文龙, 等. 黄土高原沟壑区董志塬沟头溯源侵蚀特征及其防治途径 [J]. *水土保持通报*, 2009, 29(4): 37 - 41. [CHEN Shaoyu, XU Jianmin, WANG Wenlong, et al. Erosion features of head-cut and its control measures on Dongzhiyuan of the loess plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(4): 37 - 41. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 陈绍宇, 许建民, 王文龙. 高原沟壑区董志塬沟头溯源侵蚀典型调查研究 [J]. *中国农学通报*, 2009, 25(9): 258 - 263. [CHEN Shaoyu, XU Jianmin, WANG Wenlong. The research on erosional types and process of head-cut on Dongzhiyuan of loess plateau [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(9): 258 - 263. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 史倩华, 王文龙, 郭明明, 等. 董志塬沟头溯源侵蚀过程及崩塌中孔隙水压力变化 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(18): 110 - 117. [SHI Qianhua, WANG Wenlong, GUO Mingming, et al. Headcut erosion processes and pore water

- pressure variation on Dongzhi tableland of China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(18): 110 – 117. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 张科利. 黄土坡面发育的细沟水动力学特征的研究 [J]. *泥沙研究*, 1999(1): 56 – 61. [ZHANG Keli. Hydrodynamic characteristics of rill flow on loess slopes [J]. *Journal of Sediment Research*, 1999(1): 56 – 61. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 沙际德, 白清俊. 粘性土坡面细沟流的水力特性试验研究 [J]. *泥沙研究*, 2001(6): 39 – 44. [SHA Jide, BAI Qingjun. Experimental study on hydraulic characteristics of rill flows over clay soil slope [J]. *Journal of Sediment Research*, 2001(6): 39 – 44. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的实验研究 [J]. *水科学进展*, 2002, 13(2): 159 – 165. [ZHANG Guanghui. Study on hydraulic properties of shallow flow [J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(2): 159 – 165. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 覃超, 何超, 郑粉莉, 等. 黄土坡面细沟沟头溯源侵蚀的量化研究 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(6): 160 – 167. [QIN Chao, HE Chao, ZHENG Fenli, et al. Quantitative research of rill head advancing process on loessial hillslope [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(6): 160 – 167. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 陈国祥, 姚文艺. 坡面流水力学 [J]. *河海科技进展*, 1992, 12(2): 7 – 13. [CHEN Guoxiang, YAO Wenyi. Slope flow mechanics [J]. *Advances in Science and Technology of Hohai University*, 1992, 12(2): 7 – 13. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 刘青泉, 李家春, 陈力, 等. 坡面流及土壤侵蚀动力学 (I): 坡面流 [J]. *力学进展*, 2004, 34(3): 360 – 372. [LIU Qingquan, LI Jiachun, CHEN Li, et al. Dynamics of overland flow and soil erosion (I): Overland flow [J]. *Advances in Mechanics*, 2004, 34(3): 360 – 372. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 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*, 2012, 23(2): 229 – 235. [ZHANG Kuandi, WANG Guangqian, LYU Hongxing, et al. Experimental study of shallow flow hydraulics on a hillslope under artificial rainfall conditions [J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(2): 229 – 235. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 闫玉平, 肖世国. 考虑滑带强度参数分区取值的堆积层滑坡稳定性分析方法 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(2): 44 – 49. [YAN Yuping, XIAO Shiguo. Stability analysis method for bedrock-talus landslides considering strength parameter partition of slip shear band [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(2): 44 – 49. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 闫玉平, 肖世国. 双排抗滑桩加固滑坡的前桩后侧推力算法 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(4): 55 – 63. [YAN Yuping, XIAO Shiguo. Calculation method for thrust on the fore piles of double-row stabilizing piles used to reinforce landslides [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 55 – 63. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 张哲. 董志塬黄土冲沟溯源侵蚀对银西高铁的影响 [J]. *铁道建筑*, 2015, 55(11): 76 – 79. [ZHANG Zhe. Influence of gully erosion on Yinxi high-speed railway in Dongzhi plateau [J]. *Railway Engineering*, 2015, 55(11): 76 – 79. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 孟祥连, 夏万云, 周福军, 等. 银西高铁董志塬地区黄土工程特性分析研究 [J]. *铁道工程学报*, 2016, 33(12): 24 – 28. [MENG Xianglian, XIA Wanyun, ZHOU Fujun, et al. Analysis and study of loess engineering characteristics of Dongzhiyuan on Xi'an-Yinchuan high-speed railway [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2016, 33(12): 24 – 28. (in Chinese with English abstract)]
- [22] FLANAGAN D C, NEARING M A. Sediment particle sorting on hillslope profiles in the wepp model [J]. *Transactions of the Asae*, 2000, 43(3): 573 – 583.
- [23] 李鹏, 李占斌, 郑良勇, 等. 黄土坡面径流侵蚀产沙动力过程模拟与研究 [J]. *水科学进展*, 2006, 17(4): 444 – 449. [LI Peng, LI Zhanbin, ZHENG Liangyong, et al. Hydrodynamics process of soil erosion and sediment yield by runoff on loess slope [J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(4): 444 – 449. (in Chinese with English abstract)]