

EN-1对砒砂岩固化土坡面径流水动力学特征的影响*

苏涛¹ 张兴昌²

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

【摘要】 为探讨砒砂岩地区工程边坡径流的侵蚀规律, 通过室内模拟冲刷试验, 对添加 EN-1 固化剂后不同固化剂掺量、养护龄期和压实度的边坡径流水动力学特征进行了研究。结果表明: 在试验设计的固化剂掺量、养护龄期和压实度处理条件下, 砒砂岩固化土坡面径流流速随固化剂掺量、养护龄期和压实度的增大而增大, 且径流流速随冲刷的进行呈现出波动减小的趋势。径流雷诺数 Re 随固化剂掺量、养护龄期和压实度的增大而减小, 且 Re 有随冲刷的进行而逐渐增大的波动变化趋势, 而弗劳德数 Fr 的变化趋势正好与 Re 相反。除压实度在较小处理冲刷后期时径流流态为紊流和缓流外, 其他处理都是层流和急流。径流 Darcy-Weisbach 阻力系数 f 随固化剂掺量、养护龄期和压实度增大而减小, 且 f 与输沙率有一定的正相关关系。

关键词: 砒砂岩 EN-1 固化剂 坡面侵蚀 水动力学 冲刷试验

中图分类号: S157.1; S273.29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)11-0068-08

Effects of EN-1 Soil Stabilizer on Slope Runoff Hydraulic Characteristics of Pisha Sandstone Stabilized Soil

Su Tao¹ Zhang Xingchang²

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract

In order to study erosion rule of engineering slope runoff and provide scientific and theoretical basis for control of water and soil loss of slope in Pisha sandstone region, the hydrodynamic characteristics of slope runoff under the different EN-1 soil stabilizer contents, curing ages and compaction degrees treated with soil stabilizer were studied by using indoor runoff scouring experiment. The results showed that flow velocity of slope runoff of Pisha sandstone stabilized soil increased with the increase of soil stabilizer contents, curing ages and compaction degrees under the soil stabilizer contents, curing ages and compaction degrees in this experiment and it had a fluctuant and decreased tendency with scouring time. The Reynolds number (Re) of slope runoff decreased with the increase of soil stabilizer contents, curing ages and compaction degrees and it had a fluctuant and increased tendency with scouring time. The Froude number (Fr) of slope flow runoff had the opposite trends. The flow regimes were turbulent flow and subcritical flow when scouring proceeded to the later period at smaller compaction degrees. The flow regimes were all laminar flow and supercritical flow at the other treatments. The Darcy-Weisbach drag coefficient (f) of slope runoff decreased with the increase of soil stabilizer contents, curing ages and compaction degrees, and had a positive correlation with sediment transport rate.

Key words Pisha sandstone, EN-1 soil stabilizer, Slope erosion, Hydrodynamics, Scouring experiment

收稿日期: 2011-03-19 修回日期: 2011-04-29

* 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2007CB106803)

作者简介: 苏涛, 讲师, 博士生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持措施研究, E-mail: vincenttao2@163.com

通讯作者: 张兴昌, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持措施研究, E-mail: zhangxc@ms.iswc.ac.cn

引言

砒砂岩主要是指古生代二叠纪、中生代三叠纪、侏罗纪和白垩纪的厚层砂岩、砂页岩和泥质砂岩组成的互层岩体。包括灰黄、灰白、紫红色等石英砂岩,灰、灰黄、灰紫色的沙质页岩,紫红色的泥岩、泥沙岩等,主要分布在黄河流域的晋陕蒙接壤地区。砒砂岩并不是一个科学术语,而是当地人的俗称,由于该岩层极易发生土壤侵蚀,群众深受其水土流失危害,视其危害毒如砒霜,故称其为“砒砂岩”^[1-3]。砒砂岩集中分布的地区称为砒砂岩地区,其土壤侵蚀模数高达 3~4 万 t/(km²·a),而且其主要产沙物质——砒砂岩是黄河粗沙(直径大于 0.05 mm)的重要来源之一,其基岩产沙量占总输沙量的 68.5%^[4],成为黄土高原侵蚀最剧烈、治理难度最大的地区,被中外专家称为“世界水土流失之最”和“环境癌症”^[5]。

为减轻和治理砒砂岩地区工程边坡的水土流失问题,在工程边坡中添加土壤固化剂成为解决途径之一。土壤固化剂常温下就可与土壤发生一系列的物理化学反应,从而改善土壤的强度、耐久性等工程性质。有研究表明掺入 EN-1 固化剂后,可提高土壤水稳性团聚体含量,从而提高土壤的抗蚀性^[6],EN-1 固化剂还可显著增大土壤干密度,提高土壤抗剪强度和抗渗性,改善黄土的工程性能^[7]。目前,土壤固化剂正逐渐被应用于道路交通、环保工程、水土保持以及水利工程中的护坡、防渗、集流面等领域^[8-10],但添加固化剂后工程边坡侵蚀发生过程中的水动力学特性研究却很少。虽已有很多学者对黄土高原地区坡面流的水动力学特性进行了大量的研究^[11-15],但未见到有关添加固化剂后砒砂岩地区固化土工程边坡径流水动力学特性的研究成果。研究砒砂岩地区添加固化剂后工程边坡径流水动力学特征,对于分析该地区工程边坡侵蚀动力机制、泥沙输移特征、建立土壤侵蚀模型等诸多领域,具有重要的理论意义。本文通过在砒砂岩集中分布的地区采集灰黄色砒砂岩风化土样,采用室内放水冲刷试验,研究添加 EN-1 固化剂后不同固化剂掺量、养护龄期和压实度时坡面径流水动力学特征的变化规律,进一步揭示砒砂岩固化土坡面径流侵蚀产流产沙机理和侵蚀动力学机制。

1 试验设计与方法

1.1 采样点概况

采样地点选在内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗准格尔召镇(又名西召镇)西召沟内,具体地理坐

标为 E 110°07'40.6",N 39°36'32.3",海拔 1 350 m。该点地处鄂尔多斯高原中东部,属大陆性干旱半干旱气候,年平均气温 7.3℃,大于等于 10℃ 积温 3 400℃,太阳总辐射量 599 kJ/(cm²·a),年蒸发量 2 100~3 700 mm,降水量年际变化大,多年平均 251.1~522.2 mm,且多以暴雨形式出现,主要集中在 7~8 月份,根据西召沟流域测点 1995~1999 年连续观测,平均汛期降水量为 263.0 mm,平均风速 12.3 m/s,春季干旱,冬季寒冷,无霜期仅 140 d。采样点为典型的砒砂岩地貌,多为切割很深的砒砂岩沟谷,间有盖沙黄土和黄土出现。砒砂岩层由灰白、黄绿、紫红、红棕、黄褐色等不同颜色的砂粒构成,层状结构,组织松散,厚度在 100~300 m 之间,粗沙(粒径大于等于 0.05 mm)含量约 80%;有黄土覆盖层的砒砂岩区黄土厚度多不足 50 cm,平均厚度 10 cm 左右^[16-17]。

1.2 试验过程

1.2.1 试验装置

室内模拟放水冲刷试验于 2010 年 7~10 月份在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀人工模拟降雨大厅内进行。试验装置系统由位于坡面上部的供水设备和位于坡面下部的试验土槽组成。试验土槽为可调坡钢质冲刷槽,土槽大小为 2 m(长)×0.5 m(宽)×0.5 m(高),底部钻有规则的小孔,坡度调节范围为 30°~70°。土槽下端设有出水口,盛接径流量和土壤侵蚀量。坡度由吊链调节,用吊链将土槽吊起,调节土槽至试验所需坡度并进行固定。供水设备主要由安置在距试验土槽顶端 5 m 高处恒定水位的贮水箱、控制阀门、输水软管、流量计和静水溢流箱组成,静水溢流箱与冲刷槽顶部相连,出水口与试验土槽顶端在同一水平面上,试验装置如图 1 所示。

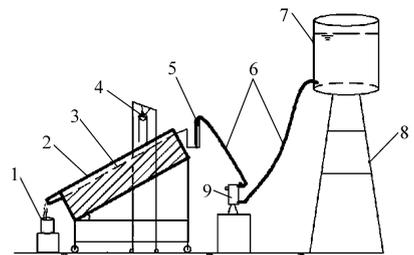


图 1 冲刷试验装置示意图

Fig. 1 Diagram of scouring experimental device

1. 接样桶 2. 土槽 3. 径流面 4. 滑轮和吊索 5. 静水溢流箱
6. 输水软管 7. 恒压贮水箱 8. 支架 9. 流量计

1.2.2 供试试剂

供试试剂为美国路邦 EN-1 离子型土壤固化剂,由美国 C. S. S 技术公司生产,是一种高浓缩的

溶于水的酱黑色酸性有机溶液。浓缩状态下无挥发性,有强烈刺激性酸味、不燃烧、有腐蚀性,一经稀释,则是无毒、无公害、无污染、不破坏生态环境的高分子复合材料。硫酸质量分数大于1%,表面活性剂质量分数6%,沸点282℃,密度1.709 g/cm³,25℃时密度为1.70 g/cm³,pH值1.05,挥发率小于1%。

1.2.3 试验设计

冲刷试验设计3个因素,分别为固化剂掺量0、0.02%、0.05%、0.10%、0.20%和0.50%(与干土质量百分比),养护龄期1 d、7 d、15 d和30 d,压实度80%、85%、90%和95%(土壤密度与土壤最大干密度百分比)。采用单因素试验设计,当固化剂掺量因子为变量时,养护龄期为1 d,压实度为95%;当养护龄期为变量时,固化剂掺量为0.10%,压实度为95%;当压实度为变量时,固化剂掺量为0.10%,养护龄期为1 d。设计冲刷试验冲刷流量为2 L/min,坡度为30°,每次试验重复2次。试验土壤为在采样点采集的灰黄色砂砾岩风化土壤,其机械组成为:颗粒粒径0~0.002 mm的质量分数为7.027%;颗粒粒径0.002~0.020 mm的质量分数为13.674%;颗粒粒径0.020~2.000 mm的质量分数为79.299%,土壤类别为砂质壤土。

试验土壤风干过1 cm筛后,首先通过击实试验确定土壤的最大干密度和最优含水率,按土壤最优含水率配置土样,由冲刷槽容积和压实度计算出装填土量,按固化剂设计掺量和填土量称取相应固化剂,将其溶入土样需加水中,洒水静置24 h,拌和均匀。填土厚度为40 cm,将土料分层(每隔5 cm)填入冲刷槽内,边装边均匀夯实,每次在填装下一层之前将表土打毛,以消除两层土壤之间的垂直层理。冲刷槽装好后覆盖塑料薄膜进行养护,待养护至试验设计龄期时进行冲刷试验。试验开始前先将试验土槽用吊链吊起,调节至所需坡度固定,贮水箱高于土槽顶端5 m处,将输水软管放入坡面上部的溢流槽,通过阀门和流量计按设计流量向溢流箱放水,通过溢流箱的缓冲,保证坡面的水流均匀、平稳地以薄层水流的形式进入坡面试验土槽,均匀向下流动,模拟自然坡面汇水过程。为减少静水溢流箱与冲刷槽接合处因边壁作用导致的土壤下陷,在静水溢流箱下面铺上透水纱布,防止出水口土壤表面由于水流的冲刷而过度侵蚀,造成试验误差增大。试验开始后,在冲刷槽出口处收集径流泥沙样,以计算坡面径流泥沙过程,记录产流时间,产流后每隔1 min取1次径流泥沙样。坡面流速测定采用高锰酸钾染色剂示踪法,产流2 min后每隔3 min测一次流速,取3个

测量值的平均值再乘以不同的修正系数,就得到层流、过渡流和紊流的坡面平均流速,修正系数采用Abrahams^[18]的研究结果(层流修正系数为0.67,过渡流修正系数为0.70,紊流修正系数为0.80)。测流速的同时用钢尺分别测量距冲刷槽顶端20、80和150 cm处的过水断面宽度,然后求其平均值就是该冲刷小区的平均过水宽度,试验时间为30 min^[19]。每次试验结束后,称量泥水样,将径流泥沙沉淀、干燥后称量泥沙量以计算产流和产沙量。试验开始和结束分别用温度计测量溢流槽中水的温度,然后取平均值以计算水动力粘滞系数。

1.3 分析方法

径流雷诺数 Re 是判断水流运动型态的重要指标^[20-21],其表达式为

$$Re = uR/\nu$$

其中 $R = hb/(b+2h)$ $h = Q/(ubT)$

$$\nu = 0.000\ 001\ 777\ 9/(1 + 0.033\ 68t + 0.000\ 221t^2)$$

式中 u ——断面平均流速, m/s

R ——水力半径, m t ——水温, °C

b ——过水断面宽度, m

h ——断面平均水深, m

T ——径流取样间隔时间, s

Q —— T 时间内径流量, m³

ν ——水动力粘滞系数, m²/s

径流弗劳德数 Fr 是判断水流流态的重要指标,其表达式为

$$Fr = u/\sqrt{gh}$$

式中 g ——重力加速度,取9.8 m/s²

径流 Darcy - Weisbach 阻力系数

$$f = 8gRJ/u^2$$

式中 J ——水力坡度,可用坡度的正弦值代替

2 结果与分析

迄今为止,研究坡面和细沟发生、发育时仍借鉴河流水动力学理论,用坡面径流流速、雷诺数 Re 、弗劳德数 Fr 和 Darcy - Weisbach 阻力系数 f 等特征值表示坡面径流的水动力学参数。

2.1 径流流速分析

径流流速是坡面径流最重要的水力学要素之一,是径流对坡面土壤产生侵蚀的直接动力^[22]。试验重点探讨固化土的固化剂掺量、养护龄期和压实度对流速的影响。

2.1.1 固化剂掺量对径流流速的影响

将不同固化剂掺量下径流流速随冲刷历时的动态变化点绘于直角坐标系中,如图2所示。由图2可知,添加固化剂可明显增大砒砂岩固化土坡面径

流平均流速。当不添加固化剂时,素土对照坡面径流平均流速为 12.63 m/min,当固化剂掺量分别增大到 0.02%、0.05%、0.10%、0.20% 和 0.50% 时,径流平均流速分别增大到 12.94、13.17、13.64、14.84 和 15.93 m/min,分别增大了 2.45%、4.28%、8.00%、17.50% 和 26.13%。添加固化剂后,土壤颗粒之间粘结力增大,抗剪强度和抗冲刷性增大,坡面被径流破坏程度明显小于素土对照,下垫面糙率小,径流在向下流动过程中受到的阻力减小,相应的流速有所增大。

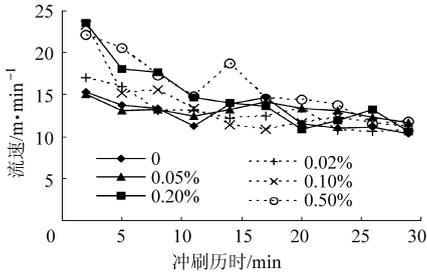


图 2 不同固化剂掺量的固化土坡面径流流速随冲刷历时的变化

Fig. 2 Variance of flow velocity of slope runoff with scouring time under different soil stabilizer contents

不同固化剂掺量下,径流流速随冲刷历时的动态变化呈现出波动减小的趋势。试验开始时,冲刷床面相对平滑,径流阻力较小,径流流速相对较大,随着试验的进行,坡面开始出现跌坎,流速减小,随着跌坎进一步发育,坡面上的小跌坎逐渐贯通形成细沟,加之细沟侵蚀过程中发生的溯源侵蚀和沟壁坍塌等重力侵蚀,使得径流阻力增大,流速降低并且出现波动性变化。

2.1.2 养护龄期对径流流速的影响

将添加固化剂后不同养护龄期的固化土坡面径流流速随冲刷历时的动态变化数据绘于图 3。由图 3 可知,随着养护龄期的延长,坡面径流流速也有逐渐增大的趋势。当加入固化剂养护 1 d 时,径流平均流速为 13.64 m/min,当养护龄期延长到 7、15 和 30 d 时,径流平均流速分别增大到 13.69、14.47 和 14.66 m/min,分别增大了 0.37%、6.09% 和 7.48%。养护时间较短时,固化剂和土壤之间还未充分反应,对土壤抵抗径流冲刷能力的提高作用还没完全发挥,在径流冲刷和重力侵蚀的作用下,坡面容易出现跌坎和细沟,径流阻力和消耗的能量较大,坡面径流流速较小;龄期足够长时,固化剂与土壤反应充分,土壤具有较强的抗剪强度和抗冲刷性,坡面比较光滑,只有坡面土粒固有的颗粒阻力阻滞水流,因此流速较大,但养护龄期对径流流速的影响没有固化剂掺量对流速的影响大。由图 3 还可看出,不

同养护龄期的固化土坡面径流流速随着冲刷历时延长也呈现出波动减小的趋势,养护龄期较短时(1 d 和 7 d),流速随冲刷历时波动变化幅度较小,而养护龄期较长时(15 d 和 30 d),在整个冲刷过程中,流速变化幅度相对较大。

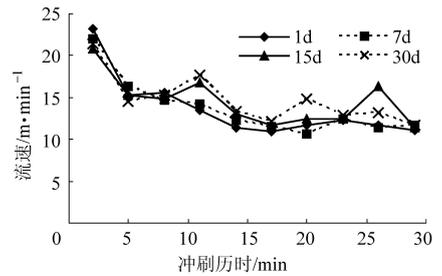


图 3 不同养护龄期的固化土坡面径流流速随冲刷历时的变化

Fig. 3 Variance of flow velocity of slope runoff with scouring time under different curing ages

2.1.3 压实度对径流流速的影响

图 4 描述的是添加固化剂后不同压实度的固化土坡面径流流速随冲刷历时的动态变化。由图 4 可知,径流流速随着压实度的增大而增大。当压实度为 80% 时,径流流速为 11.70 m/min,当压实度增大到 85%、90% 和 95% 时,径流流速分别增大到 12.02、12.07 和 13.64 m/min,分别增大了 2.74%、3.16% 和 16.58%。显然随着压实度的增大,固化土的土壤密度随之增大,土壤抗冲性增大,细沟产生较少,坡面在整个冲刷过程中相对低压实度处理较为光滑,所受阻力也就较小,使得径流流速增大。不同压实度的固化土坡面径流流速随冲刷时间延长也呈现波动减小的趋势。

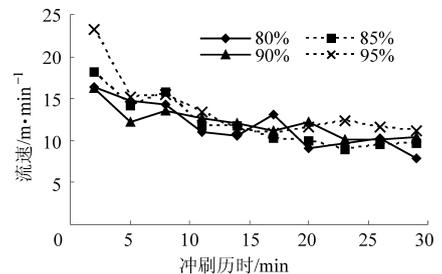


图 4 不同压实度的固化土坡面径流流速随冲刷历时的变化

Fig. 4 Variance of flow velocity of slope runoff with scouring time under different compaction degrees

2.2 径流流态分析

径流流态是表征坡面水动力学特性的基本参数,它与坡面径流计算和输沙演算直接相关^[23]。一般是根据径流雷诺数 Re 和弗劳德数 Fr 数值来判断径流的流态。在河流动力学中,雷诺数 Re 反映了径流惯性力和粘滞力的比值,其中径流惯性力起着扰动水体、使其脱离规则运动的作用,粘滞力则起消

弱、阻滞这种扰动并使水流保持原有规则运动的作用^[20]。根据明渠均匀流的基本理论,层流和紊流的界限雷诺数 Re 对于矩形断面的明渠水流大致在 500 左右,雷诺数 Re 大于 500,属于紊流;小于 500 则属于层流;在 500 左右属于过渡流。另外,在河流动力学,弗劳德数 Fr 反映了水流惯性力与重力之比,它综合地反映了流速与径流深的对比关系。在径流流量相同的情况下,弗劳德数 Fr 越大,说明径流挟沙能力越强和坡面的径流剪切力越大。另外根据明槽水流的判别标准,弗劳德数 $Fr \geq 1$,说明坡面流态是急流, $Fr < 1$ 则属于缓流^[11]。

2.2.1 固化剂掺量对径流流态的影响

不同固化剂掺量下固化土坡面径流雷诺数 Re 和弗劳德数 Fr 随冲刷历时的变化如图 5 所示。由图 5 可知,随固化剂掺量的增大,固化土坡面径流雷诺数 Re 在减小,而弗劳德数 Fr 却在增大。不同固化剂掺量处理下固化土坡面径流雷诺数 Re 随着冲刷历时的延长有波动增大的趋势,而弗劳德数 Fr 却有波动减小的趋势。进一步分析可知在本冲刷试验条件下坡面径流的流态都为层流和急流。

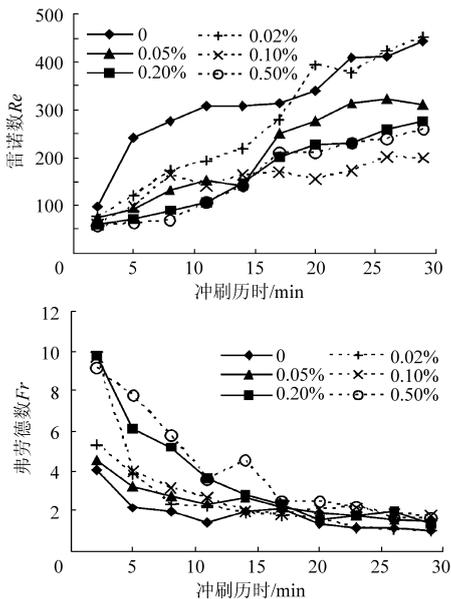


图 5 不同固化剂掺量的固化土坡面径流雷诺数 Re 和弗劳德数 Fr 随冲刷历时的变化

Fig.5 Variance of Reynolds number (Re) and Froude number (Fr) of slop runoff with scouring time under different soil stabilizer contents

2.2.2 养护龄期对径流流态的影响

添加固化剂后不同养护龄期的固化土坡面径流雷诺数 Re 和弗劳德数 Fr 随冲刷历时的变化如图 6 所示。由图 6 可知,固化土坡面径流雷诺数 Re 随着养护龄期的增大而减小,弗劳德数 Fr 有随着养护龄期的延长而增大的趋势。同固化剂掺量对径流流态

的影响一样,添加固化剂后不同养护龄期处理下固化土坡面径流雷诺数 Re 随冲刷的进行有波动增大的趋势,弗劳德数 Fr 却有波动减小的趋势。在冲刷试验设计的处理下坡面径流的流态都为层流和急流。

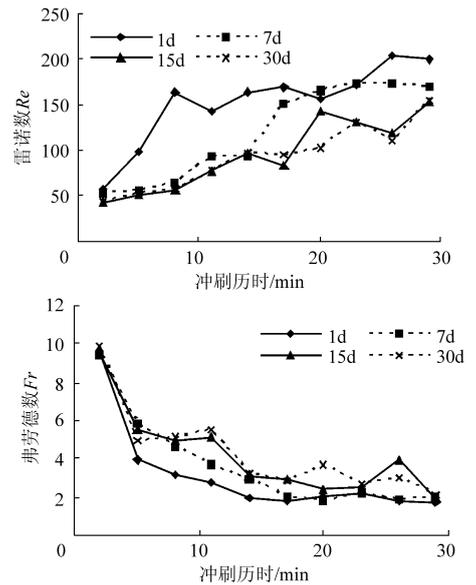


图 6 不同养护龄期的固化土坡面径流雷诺数 Re 和弗劳德数 Fr 随冲刷历时的变化

Fig.6 Variance of Reynolds number (Re) and Froude number (Fr) of slop runoff with scouring time under different curing ages

2.2.3 压实度对径流流态的影响

添加固化剂后不同压实度的固化土坡面径流雷诺数 Re 和弗劳德数 Fr 随冲刷历时的变化如图 7 所示。由图 7 可知,固化土坡面径流雷诺数 Re 、弗劳德数 Fr 随压实度的增大而增大。同样,添加固化剂后不同压实度处理下固化土坡面径流雷诺数 Re 随冲刷时间的延长有波动增大的趋势,弗劳德数 Fr 却有波动减小的趋势。在冲刷试验条件下坡面径流流态除压实度在较小处理冲刷后期时为紊流和缓流外,其他处理都是层流和急流。

2.3 径流阻力分析

径流在坡面上形成后,必然要受到阻力作用,其大小不仅直接影响径流速度,而且还与土壤的有效侵蚀力有很大关系^[23]。径流阻力主要来自 3 个方面:①沙粒本身对水流的阻碍作用。②沟槽形态对水流的阻碍作用。③水流所挟带泥沙的影响^[12]。目前,Darcy-Weisbach 阻力系数 f 是普遍用来反映河渠水流阻力特征的水力参数,也是坡面径流水动力学基本参数之一。该阻力系数能反映坡面径流在流动过程中所受到的阻力^[22]。

2.3.1 固化剂掺量对 f 的影响

不同固化剂掺量的固化土坡面径流阻力系数 f

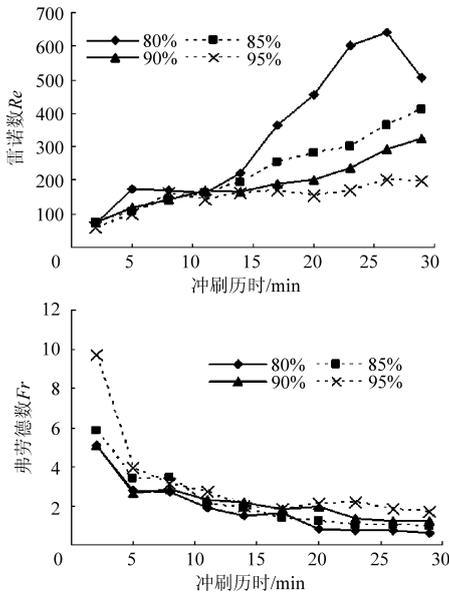


图 7 不同压实度的固化土坡面径流雷诺数 Re 和弗劳德数 Fr 随冲刷历时的变化

Fig. 7 Variance of Reynolds number (Re) and Froude number (Fr) of slop runoff with scouring time under different compaction degrees

和输沙率之间的关系如图 8 所示。由图 8 可知,随着固化剂掺量的增大,径流阻力系数 f 和输沙率都有逐渐减小的趋势。添加固化剂后,土壤颗粒之间粘结力增大,抗剪强度和抗冲刷性都会增大,坡面被径流破坏程度明显小于素土对照,下垫面糙率减小,径流在向下流动过程中受到的阻力也会减小,而且随着固化剂掺量的增大,径流所受阻力减小的趋势越大。但有研究表明,在流量、坡度等水动力条件相同的情况下,径流阻力系数越小,径流克服阻力所消耗的能量越小,则径流用于侵蚀和泥沙输移的能量越大,土壤反而越容易侵蚀,径流输沙率将会增大^[12]。显然,这和本试验所得结论相反,这可能有两个原因:本试验所选坡度是 30° , 而以往不管是冲刷试验或降雨试验所选坡度都较小;试验所选用土样是砷砂岩风化物,与前人所用土样也不同,但究竟是何原因还需要进一步研究。

2.3.2 养护龄期和压实度对 f 的影响

添加固化剂后不同养护龄期和压实度的固化土坡面径流阻力系数 f 和输沙率之间的关系如图 9 所示。由图 9 可知,随着养护龄期的延长和压实度的增大,径流阻力系数 f 和输沙率都有减小的趋势。添加固化剂后,养护龄期足够长时,固化剂才能与土壤反应充分,对土壤抵抗径流冲刷能力的提高作用才能完全发挥,此时土壤才具有较强的抗剪强度和抗冲刷性,坡面比较光滑,径流阻力也就越小。随着压实度的增大,土壤密度增大,同样也会增强土壤抗冲刷性,冲刷床面光滑,糙率小,径流所受阻力减小。

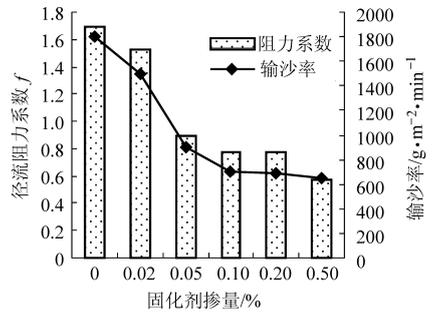


图 8 不同固化剂掺量的固化土坡面径流阻力系数与输沙率之间的关系

Fig. 8 Relationship of drag coefficient and sediment transport rate under different soil stabilizer contents

总之在不同的养护龄期或压实度处理下,固化土坡面径流阻力系数和输沙率之间都呈现出一种正相关的变化趋势,这与不同固化剂掺量处理的结果类似。

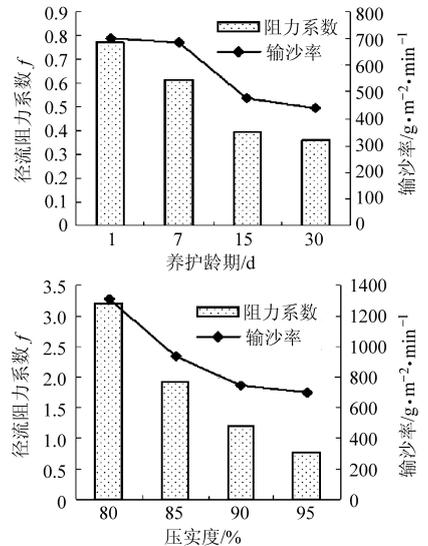


图 9 不同养护龄期和压实度的固化土坡面径流阻力系数 f 与输沙率之间的关系

Fig. 9 Relationship of drag coefficient and sediment transport rate under different curing ages and compaction degrees

3 结论

(1)通过室内模拟冲刷试验,表明添加固化剂后砷砂岩固化土坡面径流平均流速随着固化剂掺量、养护龄期和压实度的增大而增大,径流流速随冲刷历时的延长都呈现波动减小的趋势。

(2)在设计试验条件下,添加固化剂后砷砂岩固化土坡面径流雷诺数 Re 随固化剂掺量、养护龄期和压实度的增大而减小,其数值在 $42.3 \sim 639.7$ 之间变化,而径流弗劳德数 Fr 的变化趋势正好相反,随固化剂掺量、养护龄期和压实度的增大而增大,其数值在 $0.72 \sim 9.90$ 之间变化。除压实度在较小处理冲刷后期时径流流态为紊流和缓流外,其他处理

都是层流和急流。添加固化剂后,在不同的固化剂掺量、养护龄期和压实度处理下, Re 都有随冲刷的进行而逐渐增大的波动变化趋势, Fr 则随冲刷历时的增大而减小。

(3) 添加固化剂后砒砂岩固化土坡面径流 Darcy - Weisbach 阻力系数 f 随固化剂掺量、养护龄期和压实度增大而减小,且不同处理的径流阻力系数 f 与输沙率都有一定的正相关关系。

参 考 文 献

- 1 毕慈芬,邵源林,王富贵,等. 防止砒砂岩地区土壤侵蚀的水土保持综合技术探讨[J]. 泥沙研究,2003,6(3):63~65.
Bi Cifen, Tai Yuanlin, Wang Fugui, et al. Probe to integrated soil conservation techniques for soil erosion prevention in soft rock areas [J]. Journal of Sediment Research, 2003, 6(3): 63~65. (in Chinese)
- 2 叶浩,石建省,侯宏冰,等. 内蒙古南部砒砂岩岩性特征对重力侵蚀的影响[J]. 干旱区研究,2008,25(3):402~405.
Ye Hao, Shi Jiansheng, Hou Hongbing, et al. Effect of the lithologic characters of Pisha sandstone on gravity erosion in south Inner Mongolia [J]. Arid Zone Research, 2008, 25(3): 402~405. (in Chinese)
- 3 徐双民,田广源. 沙棘治理砒砂岩技术探索[J]. 国际沙棘研究与开发,2008,6(3):17~20.
Xu Shuangmin, Tian Guangyuan. Technology of governance to soft rock by seabuckthorn [J]. The Global Seabuckthorn Research and Development, 2008, 6(3): 17~20. (in Chinese)
- 4 张平仓,刘玉民,张仲子. 皇甫川流域侵蚀产沙特征及成因分析[J]. 水土保持通报,1992,12(2):15~24.
Zhang Pingcang, Liu Yumin, Zhang Zhongzi. The features of sediment production and the analysis of genesis by erosion in Huangfuchuan watershed [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1992, 12(2): 15~24. (in Chinese)
- 5 王愿昌,吴永红,寇权,等. 砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J]. 中国水土保持科学,2007,5(1):14~18.
Wang Yuanchang, Wu Yonghong, Kou Quan, et al. Definition of arsenic rock zone borderline and its classification [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(1):14~18. (in Chinese)
- 6 单志杰,张兴昌,赵伟霞,等. EN-1 固化剂对土壤抗蚀性的影响[J]. 水土保持学报,2010,24(5):6~9.
Shan Zhijie, Zhang Xingchang, Zhao Weixia, et al. Effects of EN-1 soil stabilizer on soil anti-erodibility [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5):6~9. (in Chinese)
- 7 张丽萍,张兴昌,孙强. EN-1 固化剂加固黄土的工程特性及其影响因素[J]. 中国水土保持科学,2009,7(4):60~65.
Zhang Liping, Zhang Xingchang, Sun Qiang. Engineering properties and influencing factors of solidified loess by EN-1 solidifying agent [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(4): 60~65. (in Chinese)
- 8 Katz L E, Rauch A F, Liljestrang H M, et al. Mechanisms of soil stabilization with liquid ionic stabilizer [J]. Transportation Research Record, 2001, 1757:50~57.
- 9 Bell F G. Assessment of cement-PFA used to stabilize clay-size materials [J]. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 1994, 49:25~32.
- 10 樊恒辉,高建恩,吴普特,等. 土壤固化剂集流面不同施工工艺比较[J]. 农业工程学报,2006,22(10):73~77.
Fan Henghui, Gao Jianen, Wu Pute, et al. Comparison of different construction techniques for the catchment area with soil stabilizer [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(10):73~77. (in Chinese)
- 11 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.
Wu Shufang, Wu Pute, Yuan Lifeng. Hydraulic characteristics of sheet flow with slope runoff regulation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(3):14~19. (in Chinese)
- 12 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)
- 13 李勉,姚文艺,陈江南,等. 草被覆盖下坡面一沟坡系统坡面流阻力变化特征试验研究[J]. 水利学报,2007,38(1):112~119.
Li Mian, Yao Wenyi, Chen Jiangnan, et al. Experimental study on runoff resistance of hilly slope gullied surface with grass coverage [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(1):112~119. (in Chinese)
- 14 王文龙,雷阿林,李占斌,等. 黄土丘陵区坡面薄层水流侵蚀动力机制实验研究[J]. 水利学报,2003,34(9):66~70.
Wang Wenlong, Lei Alin, Li Zhanbin, et al. Experimental study on soil erosion dynamic mechanism of slope flow in loess hilly region [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(9):66~70. (in Chinese)
- 15 郑良勇,李占斌,李鹏. 黄土区陡坡径流水动力学特性试验研究[J]. 水利学报,2004,35(5):46~51.
Zheng Liangyong, Li Zhanbin, Li Peng. Experimental study on hydraulic characteristics of runoff on steep slope in loess area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(5):46~51. (in Chinese)

- 16 李怀恩,同新奇,张康,等. 沙棘“柔性坝”对土壤水分调控作用的试验研究[J]. 农业工程学报,2006,22(11):69~73.
Li Huaen, Tong Xinqi, Zhang Kang, et al. Experimental research on the soil moisture regulation of seabuckthorn plant flexible dams [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22 (11):69~73. (in Chinese)
- 17 胡建忠,杜文嫣,殷丽强,等. 砒砂岩区沙棘人工林的萌蘖能力[J]. 中国水土保持科学,2009,7(4):26~30.
Hu Jianzhong, Du Wenyan, Yin Liqiang, et al. Sprouting capacity of artificial hippophae rhamnoides forest in soft sandstone areas [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(4):26~30. (in Chinese)
- 18 Abrahams A D, Parsons A J, Luk S H. Resistance to overland flow on desert hill slopes [J]. Journal of Hydrology, 1986, 88(3~4):343~363.
- 19 吴普特. 动力水蚀实验研究[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1997:90~91.
- 20 吕文舫. 水力学[M]. 上海:同济大学出版社,1995:23~64.
- 21 张新和. 黄土坡面片蚀—细沟侵蚀—切沟侵蚀演变与侵蚀产沙过程研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2007.
- 22 张光辉,卫海燕,刘宝元. 坡面流水动力学特性研究[J]. 水土保持学报,2001,15(1):58~61.
Zhang Guanghui, Wei Haiyan, Liu Baoyuan. Study on hydro-dynamic properties of overland flow [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(1):58~61. (in Chinese)
- 23 丁文峰,李占斌,丁登山. 坡面细沟侵蚀过程的水动力学特征试验研究[J]. 水土保持学报,2002,16(3):72~75.
Ding Wenfeng, Li Zhanbin, Ding Dengshan. Study on hydrodynamic characters of runoff in rill erosion process on slope [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2002, 16(3):72~75. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 92 页)

- 2 何有根. 基于图像识别的千粒重仪研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2007.  
He Yougen. Research on the instrument of the mass of 1000 based on image recognition[D]. Yangling: Northwest A & F University,2007. (in Chinese)
- 3 杭州万深检测科技有限公司. SC-A 型高精度超快千粒重仪、自动数粒仪产品说明书[M]. 杭州:万深检测科技有限公司,2011.
- 4 藤森洋三. 供料过程自动化图册[M]. 1 版. 贺相,译. 北京:机械工业出版社,1985:7~8.
- 5 张小津,刘顺康. DS 型多用数粒仪的研制[J]. 电子工程师,1995(2):27~30.
- 6 张霖,赵祚喜,可欣荣,等. 压电式种子计数系统[J]. 农业机械学报,2011,42(8):41~44.  
Zhang Lin, Zhao Zuoxi, Ke Xinrong, et al. Seed counting sysyem design using piezoelectric sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(8):41~44. (in Chinese)
- 7 宋苜苏. 转盘斜刮式自动光电数粒仪:中国,201110170633.3[P]. 2011-06-23.
- 8 宋苜苏,蓝景平,华娇,等. 雌雄蚕卵光电自动分选仪器的基本结构设计与工作原理分析[J]. 蚕业科学,2011,37(3):473~480.  
Song Rengsu, Lan Jingping, Hua Jiao, et al. Basic structure dsign and working pinciple analysis of the photoelectric instrument to automatically sort male and female silkworm eggs[J]. Science of Sericulture,2011,37(3):473~480. (in Chinese)