

复合侵蚀作用下砭砂岩坡面产流产沙过程试验

卫午毓^{1,2}, 肖培青², 张攀², 杨春霞², 姚志宏¹

(1.华北水利水电大学测绘与地理信息学院, 郑州 450045;

2.黄河水利科学研究院, 水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室, 郑州 450003)

摘要: 通过模拟室内风力、水力、冻融条件, 进行单一水蚀、冻融+水蚀、冻融+风蚀+水蚀3种营力组合试验, 揭示了复合侵蚀条件下的砭砂岩产流产沙变化规律。结果表明: (1) 相同降雨条件下, 冻融+水蚀、冻融+风蚀+水蚀试验的径流量均为水蚀试验的1.2倍, 产沙量分别为水蚀试验的2.4、2.8倍。冻融能够增大砭砂岩产流产沙量, 风蚀对增加侵蚀产沙量的作用较小。(2) 砭砂岩产流产沙过程的峰值及变幅随营力种类的增多而增大, 单一水蚀的产流产沙过程相较于复合营力作用下的水沙过程具有显著的坦化特征。(3) 复合侵蚀作用使初始入渗率增加, 随着降雨的进行对入渗的影响逐渐减小。营力作用的增加使初始含水率更大, 后期更小。(4) 砭砂岩的累计产流量与累计产沙量呈幂函数关系。冻融作用对水沙关系的影响较大, 风力作用的影响较小。此试验表明, 复合侵蚀营力作用的增多会加剧砭砂岩坡面的侵蚀过程, 从而使侵蚀产沙量增大。

关键词: 砭砂岩; 模拟试验; 复合侵蚀; 产流产沙

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)02-0018-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.02.003

Experiment on Runoff and Sediment Production Process of Pisha Sandstone Slope Under Composite Erosion

WEI Wuyu^{1,2}, XIAO Peiqing², ZHANG Pan², YANG Chunxia², YAO Zhihong¹

(1.College of Surveying and Geo-Informatics, North China University of Water Resources and

Electric Power, Zhengzhou 450045; 2.Key Laboratory of Soil and Water Loss Process and Control on the

Loess Plateau of Ministry of Water Resources, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003)

Abstract: Through the simulation of indoor wind, hydraulic and freeze-thaw conditions, the combined experiments of single hydraulic erosion, freeze-thaw hydraulic erosion, and freeze-thaw wind hydraulic erosion were carried out. The law of runoff and sediment production of Pisha sandstone under the condition of composite erosion was revealed. The results showed that: (1) Under the same rainfall conditions, the runoff of freeze-thaw hydraulic erosion and freeze-thaw wind hydraulic erosion test is 1.2 times of that of hydraulic erosion test, and the sediment yield is 2.4 and 2.8 times of that of hydraulic erosion test respectively. Freezing and thawing could increase the runoff and sediment yield of Pisha sandstone, while wind erosion had little effect on the increase of erosion and sediment yield. (2) The peak value and variation amplitude of runoff and sediment yield process of Pisha sandstone increased with the increase of the types of operating forces, and the runoff and sediment yield process of single hydraulic erosion had a significant flat feature compared with the water and sediment yield process under the effect of compound operating forces. (3) The composite erosion increased the initial infiltration rate and decreased with the rainfall. The initial water content was larger and the later was smaller with the increase of the operation force. (4) The relationship between the cumulative yield and the cumulative yield was power function. The effect of freeze-thaw erosion on the relationship between water and sediment was greater than that of wind. This experiment shows that the increase of the combined erosion force will aggravate the erosion process of the Pisha sandstone slope and increase the sediment yield.

Keywords: Pisha sandstone; simulation test; composite erosion; runoff sediment

收稿日期: 2019-11-28

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504501); 国家自然科学基金项目(41877079); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2019-14)

第一作者: 卫午毓(1993—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀模拟与监测研究。E-mail: sxxfwwy@foxmail.com

通信作者: 肖培青(1972—), 女, 博士, 教授级高工, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: peiqingxiao@163.com

砒砂岩集中分布于晋陕内蒙古接壤地区的鄂尔多斯高原,分布区总面积约为 1.67 万 km^2 ^[1],区域土壤侵蚀模数高达 3~4 万 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ^[2],为黄河流域粗泥沙的集中来源区^[3],是造成黄河下游河床抬高的主要来源之一,严重威胁着黄河中下游的防洪安全。砒砂岩成岩程度和结构强度低,抗侵蚀性弱,加之分布区域位于多种自然要素相互交错的过渡区,水蚀、风蚀、冻融侵蚀交替发生,在多种营力的共同作用下,土壤侵蚀十分严重^[4],属于黄河流域典型生态脆弱区。水蚀、风蚀、冻融复合侵蚀是自然界水、风、温度综合作用的结果,三者在时空分布、能量供给、物质来源等方面相互耦合、互相促进,且呈季节性变化,形成了与单一的风蚀或水蚀不同的泥沙侵蚀、搬运和沉积过程。砒砂岩区存在的风冻交错、风水交错和风水冻交错的高侵蚀风险动力模式使土壤侵蚀更加剧烈^[5]。因此,研究该区水力、风力、冻融等多种营力及营力组合对砒砂岩侵蚀产沙的影响,对于该区生态保护与水土流失治理以及黄河下游河道防洪安全具有十分重要的意义。

以往对这一地区的土壤侵蚀研究^[6-10]多以单相侵蚀或风水两相侵蚀为主,对复合侵蚀发生、发展的动力学机理还缺乏认识,在复合侵蚀模拟和定量评估方面的理论与方法研究还非常薄弱,尤其是缺乏揭示多动力驱动关系的有效试验关键技术^[11]。杨吉山等^[12]、王其东等^[13]、苏涛等^[14]通过野外模拟冲刷与室内模拟降雨试验,研究了砒砂岩产流产沙规律及坡面流水动力特征;陈溯航等^[15]研究了原状砒砂岩的冻融循环变形特征;杨具瑞等^[16]建立了砒砂岩区小流域沟冻融风化侵蚀模型,对冻融风化侵蚀量进行了模拟计算。上述研究均为单一营力作用对砒砂岩产流产沙的影响,未考虑风力、水力、冻融等多种营力的耦合作用,与砒砂岩区实际侵蚀环境存在较大差异,不能充分反映该区的产流产沙规律。而对复合侵蚀的研究也多以风水两相侵蚀为主,很少涉及三相或多相复合侵蚀研究。杨会民等^[17]将风水复合侵蚀划分为风水交替侵蚀和风水共同侵蚀 2 种类型,阐述了风水复合侵蚀空间尺度差异、风水交替侵蚀的特征等,但并未研究砒砂岩条件下的风水复合侵蚀。因此,本文通过室内模拟风力、降雨、冻融试验,揭示不同侵蚀营力组合下的砒砂岩坡面的产流产沙变化特征,以期对砒砂岩区土壤侵蚀过程模拟及水土流失治理提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2018 年 7 月开始在水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室降雨大厅内进行。试验装置由土槽、人工模拟降雨系统、风力装置和冷冻装置 4 部分组成,风力装置与冷冻装置之间采用轨道连

接,以方便土槽在各区域间来回移动。土槽尺寸为 5 m×1 m×0.6 m,试验坡度根据砒砂岩区坡面地形条件设定为 35°,土槽底部布设直径为 5 mm 的透水孔,可使土壤水自由入渗。人工模拟降雨系统距地面 22 m,可模拟的降雨强度范围为 30~180 mm/h,降雨均匀度>85%。土槽两侧分别设置冷冻装置与风力装置(图 1),可通过轨道将土槽移动至冷冻装置或风力装置内进行处理。冷冻装置可设置内部环境温度,土壤表面的温度监测仪器可监测实时温度,冷冻装置最低温度为-30℃。风力装置可调节风力大小,通过装置内设置的风速仪可监测实时风速,风力装置可调最大风速为 15 m/s。

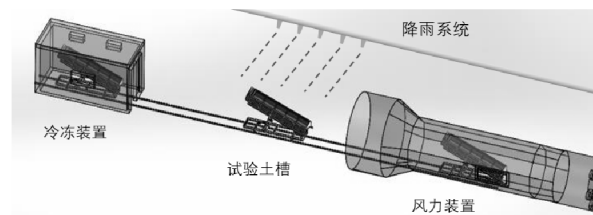


图1 复合侵蚀模拟系统示意

试验用土取自内蒙古鄂尔多斯准格尔旗暖水乡的红色砒砂岩,试验土壤 $>0.05, 0.01\sim 0.05, 0.005\sim 0.01$ mm 的粒径(质量)百分比分别为 73.44%, 16.02%, 10.54%。土样过 10 mm 筛,填土前在土槽底部铺设 10 cm 厚粗沙以保证土壤透水性,填土时每 10 cm 为 1 层进行分层压实,消除下垫面差异的影响,且填土时在每层埋入温湿度仪,可实时监测土壤的温度及水分数据。其间使用环刀测量容重,保证土壤容重为 1.3 g/cm^3 左右,填土厚度为 60 cm,其中砒砂岩厚度为 50 cm。

1.2 试验设计

为研究不同侵蚀营力对坡面水沙过程的影响,拟定 3 组模拟降雨试验,侵蚀营力组合分别为水蚀、冻融+水蚀、冻融+风蚀+水蚀,每组试验重复 1 次。第 1 组为水蚀试验,填土完成后用 30 mm/h 的小雨对坡面进行前期降雨,控制土壤含水量在 35%~40%。模拟雨强根据砒砂岩区侵蚀性降雨强度设置为 110 mm/h,自坡面产流起计时,每场试验时长 60 min,每 2 min 使用 1 个径流桶采样,试验过程中每 2 min 通过土壤水分仪在地表下 10 cm 处测量 1 次含水率,试验完成后测量产流量与产沙量。第 2 组为冻融+水蚀试验,试验依次分为冻融和水蚀 2 个阶段,填土完成后降小雨为冻融过程提供土壤水分条件,含水率控制在 25%左右。冻融阶段在冷冻装置内进行,打开冻融装置,监测土壤表层温度至-10℃时关闭冻融装置,然后在常温环境内升温至 10℃,此过程为 1 次冻融循环。根据冻融循环次数与容重和孔隙度的关系^[18],拟定冻融循环 6 次,冻融阶段完成后按

照第 1 组试验条件进行人工模拟降雨试验,即水蚀阶段。第 3 组为冻融+风蚀+水蚀试验,试验依次分为冻融、风蚀与水蚀 3 个阶段,冻融与水蚀阶段与第 2 组设置一致,冻融完成后,风蚀阶段在风力装置内进行,根据野外实测数据将风速设置为 6 m/s,为充分模拟野外风场与风速条件,进行 3 场风蚀试验,每次时长 8 h。

2 结果与分析

2.1 复合侵蚀条件下砒砂岩坡面产流产沙特征

由表 1 可知,相同降雨条件下,水蚀、冻融+水蚀、冻融+风蚀+水蚀 3 组试验的径流量之比为 1:1.2:1.2,表明冻融能够增大径流量,风蚀对径流量影响不大;产沙量之比为 1:2.4:2.8,表明冻融与风蚀均能够增大砒砂岩侵蚀产沙量,其中冻融作用远大于风蚀;含沙量之比为 1:2.0:2.4,表明含沙量随侵蚀营力种类的增多而增大。

表 1 复合侵蚀下砒砂岩坡面产流产沙特征值

试验条件	前期	产流	产流量/	产沙量/	含沙量/
	含水量/%	时间/min	L	kg	(kg·L ⁻¹)
水蚀	36.6	1.88	190.3	306.4	1.61
冻融+水蚀	36.9	4.90	229.6	738.2	3.21
冻融+风蚀+水蚀	36.5	3.87	229.0	867.8	3.79

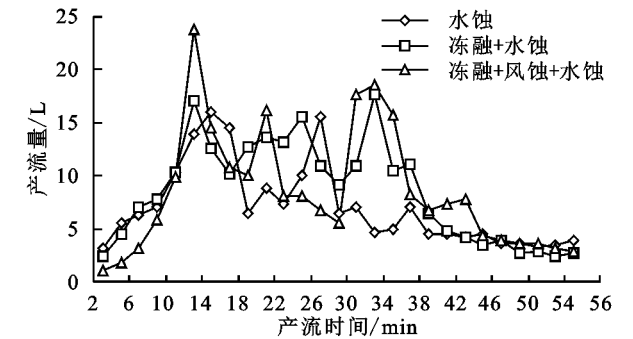
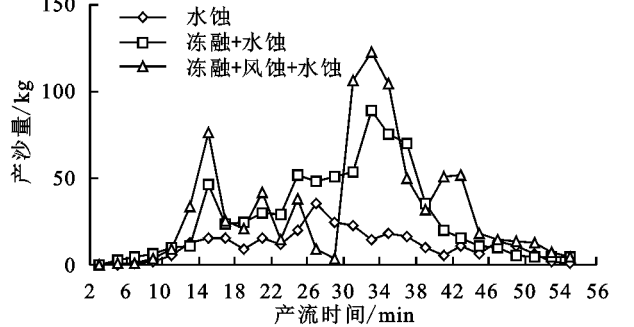


图 2 复合侵蚀条件下砒砂岩坡面产流产沙过程

在初始上升阶段,产流量增速较快,径流剪切力亦快速增加,且冻融产生的土壤表层裂隙更易于产生细沟,因此冻融坡面细沟提前 2~4 min 出现,故复合侵蚀在试验初期的侵蚀产沙量增速大于单一水蚀过程。在波动阶段,复合侵蚀的多种营力通过改变表层土壤的物理化学性质及微地形,增大了土壤可蚀性,加速了细沟的发育过程,坡面地形尤其是细沟的急剧变化使得产流产沙过程发生明显波动,而单一水蚀过程的细沟发育过程相对稳定,水沙过程波动较小。在下降阶段,复合侵蚀的产流产沙下降速率远高于单一水蚀过程,主要是由于冻融、风蚀等侵蚀营力仅能使土体表层的土壤物化特性发生一定变化,难以对深层土体产生影响,试验中后期的细沟发育已趋于稳定,表层土壤侵蚀殆尽,复合侵蚀的侵蚀环境逐渐接近单一水蚀,使得复合侵蚀的水沙过程与单一水蚀趋于一致。

以上分析表明,复合侵蚀营力对侵蚀产沙量影响较大,对径流量影响相对较小。究其原因可能是由于冻融循环能够通过破坏表层土壤的土体结构,改变土壤孔隙率、容重、土壤胶结等物化性质,加速砒砂岩的风化与遇水溃散过程,能够显著增大砒砂岩的侵蚀产沙量^[19]。风力侵蚀主要通过风力使坡面表层砒砂岩中已风化或者尚未完全风化的土壤颗粒松动,加速砒砂岩天然风化过程,增大侵蚀产沙量。径流量主要由土壤含水率与下渗率决定,冻融与风蚀无法从根本上改变砒砂岩产流特性。

由图 2 可知,3 组试验产流产沙过程均呈上升—波动—下降的趋势,产流的上升阶段是从产流开始至 13 min 左右,随后为波动阶段;水蚀与冻融+水蚀试验的产流波动阶段至 36 min 结束,冻融+风蚀+水蚀试验的产流波动阶段至 42 min 结束;后续过程为产流下降阶段。冻融+水蚀、冻融+风蚀+水蚀 2 组试验的变化过程更为接近,水沙过程的峰值及变幅均远大于单一水蚀过程。其中,冻融+风蚀+水蚀过程的峰值产流量、产沙量、含沙量分别是单一水蚀过程的 1.5、3.5、1.8 倍。因此,砒砂岩产流产沙过程的峰值及变幅随营力种类的增多而增大,单一水蚀的产流产沙过程相较于复合营力作用下的水沙过程具有显著的坦化特征。



致,表明复合侵蚀通过改变砒砂岩表层土壤的物化特性使得土体表层的侵蚀产沙环境发生变化,进而对产流产沙过程产生影响。冻融+水蚀、冻融+风蚀+水蚀 2 组试验的产沙总量分别为单一水蚀试验的 2.4、2.8 倍,结果表明复合侵蚀能够大大加速表层土体的侵蚀。

2.2 不同营力组合对砒砂岩水分及入渗的影响

土壤入渗率是评价土壤涵养水源和抗蚀性的重要指标之一,也是模拟土壤侵蚀过程的基本参数。坡面的产流入渗过程是由降雨和下垫面条件共同决定的,根据试验数据,坡面平均入渗率由公式(1)计算^[20]:

$$f_i = (Pt \cos \alpha - 10R/S)/t \tag{1}$$

式中: f_i 为坡面平均入渗率(mm/min); P 为降雨强度(mm/min); α 为坡度(°); R 为降雨时间 t 内产生的径流量(ml); S 为实际承雨面积(cm²); t 为降雨时间(min)。

就产流时间而言,水蚀、冻融+水蚀、冻融+风

蚀+水蚀试验的产流时间分别为 2,5,4 min,冻融能够增大表层土壤的入渗率,延迟产流时间,风蚀对土壤入渗率及产流时间影响不大。在土壤前期含水量相近的情况下,产流时间的差别能够反映试验坡面的物理状况差异^[21],即冻融通过减小土壤容重、增大孔隙率、产生土壤裂隙等提高了入渗率,延长了产流时间^[22]。风蚀主要依靠风力使砒砂岩表面风化层中的细小颗粒剥离脱落,因此不能直接影响土壤入渗特性,对产流时间影响较小。

各组试验的土壤入渗及表层含水率过程见图 3。降雨初始阶段,由于复合侵蚀作用对表层入渗能力的改变使表层含水率随时间增大,且侵蚀营力作用越多含水率增加越快。在此阶段结束后,复合作用反而使含水率减小,且营力作用越多含水率越小。复合侵蚀

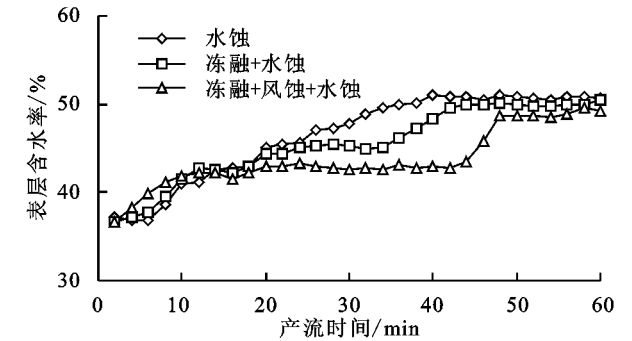


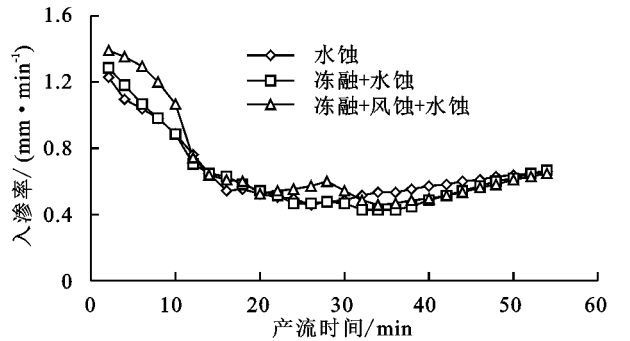
图 3 复合侵蚀条件下砒砂岩含水率与入渗率过程

入渗率与含水率呈负相关关系,即入渗率随含水率增大而减小。各组试验的入渗率与含水率过程总体趋势一致,均可划分为前中后 3 个阶段。入渗率在前期急剧减小,中期波动下降,后期缓慢增大并趋于稳定。含水率前期急速增大,中期波动增大,后期趋于稳定。就入渗过程而言,复合侵蚀在试验前期的初始入渗率大于单一水蚀,且营力作用越多,入渗率越大。降雨 12 min 后,不同营力组合试验的入渗率趋于相等并略有波动,营力作用越多,入渗率波动越大且中期波动时间更长。水蚀坡面、冻融+水蚀坡面、冻融+风蚀+水蚀坡面入渗率分别在 26,32,34 min 进入后期缓慢上升阶段,与土壤水分增长至饱和的时间顺序相对应。随着表层土壤逐渐被侵蚀,复合侵蚀对入渗的影响逐渐减小,趋于相同。后期入渗率的缓慢增长是砒砂岩的物化特性所导致的,降雨对砒砂岩的物化性质持续造成改变,形成了更易入渗的土壤,从而使入渗率发生变化。

2.3 不同营力组合对砒砂岩坡面水沙关系的影响

以各组试验的累计径流量为自变量,累计产沙量为因变量,进行函数拟合(表 2),结果表明累计径流量与累计产沙量呈较好的幂函数关系,决定系数均在 0.98 以上。由图 4 可知,单位径流量的产沙量随侵蚀营力的增多而增大,即冻融+风蚀+水蚀>冻融+水

作用加速了砒砂岩物化特性的改变,使砒砂岩中的不稳定成分与水更快结合,并发生化学反应,从而使含水率减小。随着下层土壤水分渐渐达到饱和,水蚀坡面、冻融+水蚀坡面、冻融+风蚀+水蚀坡面的含水率分别在 24,34,42 min 时再次迅速增加,在 40,44,48 min 时,土壤表层含水率趋于稳定,不再继续增加,土壤水分达到饱和,营力作用的增加使变化过程的时间减少。此变化的时间差异是由于营力作用的增加使砒砂岩能够与水更充分地结合,导致下层的水分饱和的时间更晚。在下层砒砂岩饱和后,表土层已经被大量冲刷,营力作用越多,表土层的破坏程度越大,使表层水分能够更快达到饱和。降雨后期,3 种坡面均达到饱和含水率,营力作用越多,饱和含水率越小,这也是复合侵蚀作用对砒砂岩的物化性质的改变所导致的。



蚀>水蚀。根据函数拟合结果,复合侵蚀的系数为水蚀的 10 倍以上,指数则为单一水蚀的 0.8 倍左右。通过计算可得,不同营力组合试验侵蚀量与幂函数系数的相关系数 r 为 0.98。由此可知,幂函数的系数是反映侵蚀营力组合的主要参数(显著性水平 0.01),指数变化较小,可能与砒砂岩本身性质有关。在不同侵蚀营力的组合中,冻融的幂函数系数增幅远大于风蚀,同此前分析结论一致。

表 2 累计径流量与累计产沙量的关系

侵蚀条件	拟合公式	R^2
水蚀	$y=0.0079x^{2.0292}$	0.9837
冻融+水蚀	$y=0.0854x^{1.6680}$	0.9974
冻融+风蚀+水蚀	$y=0.0919x^{1.6912}$	0.9967

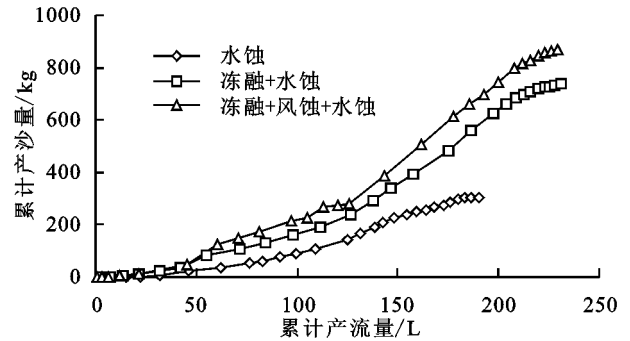


图 4 不同营力组合水沙关系

3 结论

(1)冻融能够增大砒砂岩径流量、侵蚀产沙量,风蚀对增加侵蚀产沙量的作用相比冻融较小。冻融作用使径流量与产沙量分别增加20%,140%,风蚀使产沙量增加17%。

(2)砒砂岩产流产沙过程的峰值及变幅随营力种类的增多而增大,冻融+风蚀+水蚀过程的峰值产流量、产沙量、含沙量分别是单一水蚀过程的1.5,3.5,1.8倍。单一水蚀的产流产沙过程相较于复合营力作用下的水沙过程更稳定。

(3)砒砂岩表层含水率在降雨初期随着营力作用的增加而增大,随后又随着营力作用的增加而减小。初始入渗率随营力侵蚀作用的增加而增大,复合侵蚀对坡面入渗的影响随降雨的进行逐渐减小。

(4)砒砂岩的累计产流量与累计产沙量呈较好的幂函数关系。径流量相同时,不同侵蚀条件下的产沙量从大到小依次为冻融+风蚀+水蚀、冻融+水蚀、水蚀。水沙关系受冻融作用影响较大,受风力作用影响较小。

试验模拟的风蚀、冻融过程较天然条件存在一定差异,试验风洞无法精确模拟野外自然条件下的复杂风场,冻融循环时长与临界条件也存在一定差别。此外,砒砂岩的风化过程是自然条件下长期作用的结果,由于时间限制,试验对风化过程进行了人为加速。以上各类因素可能导致室内模拟试验的结果与天然情况存在一定差异,今后的研究中,需结合野外试验小区观测资料对研究结论进行修正和验证。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 肖培青,姚文艺,刘慧.砒砂岩地区水土流失研究进展与治理途径[J].人民黄河,2014,36(10):92-94,109.
- [3] 徐建华,吴成基,林银平,等.黄河中游粗泥沙集中来源区界定研究[J].水土保持学报,2006,20(1):6-9,14.
- [4] 唐政洪,蔡强国,李忠武,等.内蒙古砒砂岩地区风蚀、水蚀及重力侵蚀交互作用研究[J].水土保持学报,2001,15(2):25-29.
- [5] 张攀,姚文艺,刘国彬,等.砒砂岩区典型小流域复合侵蚀动力特征分析[J].水利学报,2019,50(11):1384-1391.
- [6] Du H, Dou S, Deng X, et al. Assessment of wind and water erosion risk in the watershed of the Ningxia-Inner Mongolia Reach of the Yellow River, China[J].Ecological Indicators,2016,67:117-131.
- [7] Pelt R S V, Hushmurodov S X, Baumhardt R L, et al. The reduction of partitioned wind and water erosion by conservation agriculture[J].Catena,2016,148:160-167.
- [8] Tuo D F, Xu M X, Gao L Q, et al. Changed surface roughness by wind erosion accelerates water erosion[J].Journal of Soils and Sediments,2016,16(1):105-114.
- [9] Zhang Q, Fan J, Zhang X P. Effects of simulated wind followed by rain on runoff and sediment yield from a sandy loessial soil with rills[J].Journal of Soils and Sediments,2016,16(9):2306-2315.
- [10] 张攀,姚文艺,刘国彬,等.土壤复合侵蚀研究进展与展望[J].农业工程学报,2019,35(24):154-161.
- [11] 刘存玺,高峰,宋五才.沙棘生态建设是实现东胜山川秀美的希望[J].沙棘,2001(4):33-34.
- [12] 杨吉山,姚文艺,郑明国,等.原状砒砂岩坡面产流产沙规律试验研究[J].人民黄河,2017,39(1):98-101,109.
- [13] 王其东.降雨条件下砒砂岩坡面侵蚀规律试验研究[D].南京:东南大学,2016.
- [14] 苏涛,张兴昌,赵怀玉.砒砂岩地区坡面径流水动力学特性研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(8):203-209.
- [15] 陈溯航,李晓丽,张强,等.鄂尔多斯红色砒砂岩冻融循环变形特性[J].中国水土保持科学,2016,14(4):34-41.
- [16] 杨具瑞,方铎,毕慈芬,等.砒砂岩区小流域沟冻融风化侵蚀模型研究[J].中国地质灾害与防治学报,2003,14(2):87-93.
- [17] 杨会民,王静爱,邹学勇,等.风水复合侵蚀研究进展与展望[J].中国沙漠,2016,36(4):962-971.
- [18] 邓西民,王坚,朱文珊,等.冻融作用对犁底层土壤物理性状的影响[J].科学通报,1998(23):2538-2541.
- [19] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[M].United States. Dept. of Agriculture. Agriculture handbook (USA), 1978:537.
- [20] Pan C Z, Shangguan Z P. Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grassplots under simulated rainfall conditions[J].Journal of Hydrology, 2006,331(1/2):178-185.
- [21] 王辉,王全九,邵明安.前期土壤含水量对坡面产流产沙特性影响的模拟试验[J].农业工程学报,2008,24(5):65-68.
- [22] 李占斌,李社新,任宗萍,等.冻融作用对坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):56-60.