

复合侵蚀作用下砭砂岩坡面侵蚀泥沙颗粒特征

高玄娜^{1,2}, 肖培青², 张攀², 郝仕龙¹, 杨春霞²

(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:明晰砭砂岩坡面侵蚀泥沙颗粒输移特征是研究黄河泥沙淤积问题的关键。采用水力、风力、冻融复合侵蚀实体模拟技术,研究在 35°坡度和 110 mm/h 雨强条件下单一水蚀、冻融+水蚀、冻融+风蚀+水蚀 3 组不同侵蚀动力复合作用下,砭砂岩坡面侵蚀泥沙颗粒变化特征。结果表明:砭砂岩坡面在单一水蚀作用下以整体侵蚀为主,侵蚀泥沙颗粒变化稳定;冻融+水蚀作用下粗颗粒产出明显,冻融作用对粗颗粒的影响凸显;冻融+风蚀+水蚀作用下坡面稳定性最差,侵蚀泥沙颗粒变化最剧烈。复合侵蚀作用下坡面侵蚀过程以搬运粒径较大的泥沙颗粒为主;各粒级侵蚀泥沙颗粒随侵蚀动力的增加起伏变化剧烈。

关键词: 颗粒特征; 复合侵蚀; 模拟试验; 砭砂岩

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)01-0044-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2021.01.006

Particle Characteristics of Erosion Sediment on Pisha Sandstone Slope Under Composite Erosion

GAO Xuanna^{1,2}, XIAO Peiqing², ZHANG Pan², HAO Shilong¹, YANG Chunxia²

(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: The key to study the sediment deposition of the Yellow River is to clarify the sediment transport characteristics of the erosion sediment on the Pisha Sandstone slope. The physical simulation technology of water, wind and freezing-thawing composite erosion was used to study the variation characteristics of erosion sediment particles on Pisha Sandstone slope under the composited action of three groups of different erosion dynamics, which were single water erosion, freezing-thawing water erosion, and freezing-thawing wind water erosion, under the condition of 35° slope and 110 mm/h rain intensity. The results showed that the Pisha sandstone slope was dominated by overall erosion under single water erosion action, and the erosion sediment particles changed stably. Under the action of freezing-thawing water erosion, coarse particles were produced obviously, and the effect of freezing-thawing on coarse particles was prominent. The slope stability was the worst under freezing-thawing wind water erosion, and the change of erosion sediment particles was the most drastic. In the process of slope erosion under composite erosion, sediment particles with larger diameter were mainly transported. The fluctuation of erosion sediment particles with the increase of erosion dynamics changed dramatically.

Keywords: particle characteristics; composite erosion; simulation experiment; Pisha sandstone

泥沙粒径分布是重要的泥沙物理属性,直接影响泥沙的侵蚀、搬运、堆积过程,对河床演变和土壤养分的流失具有重要的意义,对相关土壤侵蚀模型的研发与应用具有推动作用^[1-4]。土壤侵蚀泥沙颗粒特征一

直是国内外学者研究的热点。在侵蚀泥沙颗粒富集方面,由于侵蚀动力作用及土壤本身特性,侵蚀泥沙颗粒与供试土壤颗粒的大小分布存在差异^[5];在泥沙颗粒变化方面,胡宏祥等^[6]研究表明,随着降雨的进

收稿日期:2020-07-26

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业务费专项(HKY-JBYW-2019-14);华北水利水电大学研究生创新课题项目(YK2019-25)

第一作者:高玄娜(1994—),女,在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:gaouxuanna@163.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

行,地表土颗粒组成呈现黏粒与粉粒含量减少,砂粒含量相对增加的趋势;在研究泥沙颗粒分布上,吴凤至等^[7]认为泥沙颗粒分布变化由土壤原始颗粒、产沙强度、降雨量、产流强度和坡面流速共同决定。目前针对土壤侵蚀颗粒的研究多集于黄土区及紫色土区^[8-10],国内外学者多关注于雨强、坡度、产沙强度、产流强度、降雨量以及植被截留等方面的影响,缺乏对侵蚀过程及其机理的剖析,尤其对复合侵蚀作用下泥沙颗粒特征的研究较少。泥沙颗粒性质与坡面侵蚀过程密切相关^[11],由于以往研究的不同或标准不统一,导致研究结果缺乏可比性。因此,对泥沙颗粒变化特征的进一步研究有助于深入理解泥沙的侵蚀和搬运过程,并且改进土壤侵蚀模型。

黄河下游以粒径 $>0.05\text{ mm}$ 的沉积物为主,砒砂岩区面积虽然仅占黄河流域面积的 2%,但平均每年进入黄河的沙量高达 2 亿 t,其中粒径 $>0.05\text{ mm}$ 的粗泥沙约 1 亿 t,由该区进入黄河的年均粗泥沙量占黄河下游淤积总量的 25%^[12-14],是黄河粗泥沙的主要来源区。砒砂岩是集中分布在我国黄土高原晋陕蒙交界的一种松散岩层,成岩程度低,抗蚀性极差^[15-16],具有“遇水成泥、遇风成沙”的特点,加之这一地区受到水、风、温度等的复合作用,侵蚀动力类型及季节周期性交错特征突出^[17],受水力—风力—冻融的复合驱动,冬春季冻融、风化严重,夏秋季暴雨洪水多发,进而导致高强度的侵蚀产沙过程^[18-19]。黄河中下游泥沙淤积使河床不断抬高,长期威胁两岸人民生活及社会发展。当前,砒砂岩的侵蚀影响已经引起学术界的广泛关注,杨吉山等^[20]在野外进行降雨冲刷试验,探究对比了红白砒砂岩的侵蚀产沙特征,但单一的水蚀冲刷试验并不能有力说明砒砂岩地区的实际侵蚀情况;杨具瑞等^[4]建立了冻融风化侵蚀比例模型,并模拟计算了冻融风化侵蚀量,但在研究中并未能区别冻融、风化的作用;赵国际^[21]利用观测资料,通过对砒砂岩的理化及侵蚀产沙特性说明了砒砂岩产流及产沙能力高于当地的黄土和风沙土,然而并未着重分析侵蚀动力的复合作用。以往研究从不同角度对砒砂岩地区的侵蚀泥沙进行了探讨,但是对于砒砂岩地区的泥沙是如何从坡面流入河流的情况还不了解。过去受到研究方法和观测手段的限制,关于水力—风力—冻融 3 种动力的复合侵蚀研究较为鲜见,对于砒砂岩地区泥沙颗粒特征的研究还不够透彻,对于复合侵蚀作用下砒砂岩坡面侵蚀泥沙颗粒分布特征及搬运机制的研究更少。因此本文将通过室内模拟冻融、风力、降雨试验,分析复合侵蚀作用下砒砂岩坡面侵蚀泥沙颗粒的变化特征,可为揭示砒砂岩泥沙搬运机制提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2018 年 7 月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。试验用土取自鄂尔多斯市准格尔旗暖水乡境内的二老虎沟小流域(东经 $110^{\circ}36'2.74''$,北纬 $39^{\circ}47'38.79''$)。供试土壤取自典型的盖土砒砂岩区,植被覆盖度达 35% 左右。

试验装置由人工模拟降雨装置、风力驱动装置、低温驱动装置和土槽 4 部分组成,各装置之间用活动轨道连接,方便土槽在各区域间来往移动(图 1)。人工模拟降雨系统距地面 22 m,模拟降雨器的强度范围为 $30\sim 180\text{ mm/h}$,降雨均匀度 $>85\%$ 。风力驱动装置主要包括风力控制装置、风洞及风速仪,控制装置通过控制页扇旋转速度来调节风力大小并实时监测,可调最大风速为 30 m/s ,风洞内设置 2 个大型页扇可模拟风力侵蚀环境。低温驱动装置主要包括冷冻室、温度控制装置及压缩机,通过压缩机抽取冷冻室内空气并降温,再将空气输入至冷冻室内来降低温度,温度控制装置可设置内部环境温度及温度变化范围并实时监测,最低温度可达 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试验土槽为移动式可变坡钢槽,长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 $5\text{ m}\times 1\text{ m}\times 0.6\text{ m}$ 。

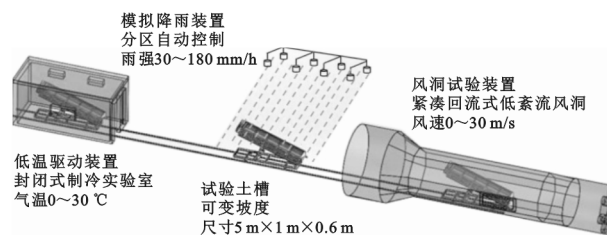


图 1 复合侵蚀试验装置示意

1.2 试验设计

根据野外调查分析,二老虎沟小流域坡度多为 $25^{\circ}\sim 40^{\circ}$,因此将本次试验坡度设定为 35° 。二老虎沟属典型的大陆性半干旱气候,年温差较大,年平均气温 $7.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,冬季表层土体的平均温度为 $-5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低温度为 $-7.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冻融期为 11 月初至翌年的 3 月底,其中冻融过程包括上冻期、封冻期和解冻期 3 个阶段。冻土深度约 1.5 m。春季解冻期随着温度上升,表层土体的冻融循环次数较上冻期频繁,约为 10 次,且完成 1 次冻融循环的持续时间相对均匀,基本维持在 24 h 左右。多年平均降水量约 350 mm,水力侵蚀高峰期在 6—9 月,侵蚀性降雨强度平均为 110 mm/h 。大风天气较多,集中在 3—5,10—11 月,其中风力侵蚀高峰期在 3—5 月,全年平均风速 2.2 m/s ,最大风力可达 8 级,因此将试验雨强设定为 110 mm/h ;将风速设置为 6 m/s ,持续时间 8 h;在低温驱动装置中设定低温至 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,根据野外观测得到的解冻期冻融

循环次数,拟定冻融循环 6 次。由于二老虎沟小流域土壤侵蚀动力在时间上存在着相互交错与叠加的复杂关系,基本上是双动力叠加侵蚀造成的,在每年 2 月上旬至 3 月中下旬表现为风蚀、冻融叠加;每年的 6 月中上旬至 8 月中下旬表现为风蚀、水蚀叠加;每

年的 10 月中旬至 11 月中下旬表现为风蚀、水蚀、冻融叠加^[15]。因此为研究复合侵蚀作用对砒砂岩坡面泥沙颗粒变化的影响,设计 3 组模拟试验,分别为单一水蚀、冻融+水蚀、冻融+风蚀+水蚀。每次降雨持续 1 h,试验重复 2 次(表 1)。

表 1 试验设计

试验组次	设定条件	场次
单一水蚀	坡面产流开始后记录产流时间,每隔 2 min 用径流桶收集径流和产沙,试验完成后用烘干法(105 ℃)得到侵蚀泥沙样。降雨持续 1 h	2 场重复
冻融+水蚀	试验先冻融再降雨。冻融阶段在低温驱动装置内进行,装置自动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 ℃,以此为 1 个冻融循环。并冻融循环 6 次,冻融完成后按照单一水蚀试验条件进行人工模拟降雨	2 场重复
冻融+风蚀+水蚀	试验依次分为冻融、风蚀与水蚀 3 个阶段。冻融过程与第 2 组设置一致,冻融完成后,风蚀阶段在风力驱动装置内进行,为充分模拟野外风场与风速条件,设计进行 3 场风蚀试验。冻融、风蚀过程完成后按照单一水蚀试验进行降雨	2 场重复

首先将试验土样过 10 mm 筛以清除土样中的石块杂物。土槽底部布设直径为 5 mm 的透水孔,并在填土前,在土槽底部铺设 10 cm 厚粗砂,以确保试验土层的透水状况接近供试土壤。然后采用分层填土的方式向土槽中填入 50 cm 厚的试验用土,每层 10 cm,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变化。使用环刀法测量容重,将土壤平均容重控制在 1.3 g/cm³左右。每次填土后对坡面表层土壤进行体积含水率的测量,土壤表层含水率在 18%左右;填土完成后用 30 mm/h 的小雨对坡面进行前期降雨,控制土壤含水率在 30%~35%范围内,24 h 后开始降雨试验。由温湿度仪监测数据可知,冻融过程中土壤表层含水率在 24%左右;风蚀过程中土壤表层含水率在 20%左右。

1.3 数据处理与分析

试验结束后,鉴于土样中颗粒组成各异,本次颗粒分析采用粗筛、洗筛、细筛以及激光粒度仪法的颗粒组成联合分析法,0.075 mm 粒径以上筛析,再烘干后过筛,没有出现板结现象;0.075 mm 粒径以下基本为黏粒,质地均匀比重相同,直接利用激光粒度仪测定。0.075 mm 以下激光粒度仪测定的体积百分比与质量百分比曲线重合,可以进行联合试验。因此,本文中研究的侵蚀泥沙粒径是经过分散处理之后的物理粒径(最终粒径)。

泥沙颗粒特征选用富集率(ER)和土壤颗粒的平均重量直径(MWD)来表征。富集率被广泛用于描述土壤侵蚀过程中的养分富集现象,同时也可用以表述泥沙的颗粒分选及其严重程度。某一粒级颗粒的富集率等于侵蚀泥沙中该颗粒的含量和在相同质量供试土壤中的含量之比(本文采用体积百分比含量)^[22],当 ER>1 时,说明侵蚀泥沙中某粒级颗粒含量相比供试土壤含量增加,即出现颗粒富集情况;当

ER<1 时,表明在降雨过程中主要富集的是原始泥沙颗粒,而不是侵蚀泥沙颗粒^[23]。

侵蚀泥沙颗粒大小的分布用平均重量直径表示,计算公式为:

$$MWD=\sum_{i=1}^3\frac{x_{i-1}+x_i}{2}\times\omega_i$$

(1)

式中:*i* 为 3 个粒级;*x_i*为第 *i* 个粒级的平均重量直径(mm);*x₀*=*x₁*;ω_{*i*}为第 *i* 个粒级颗粒重量百分比(%)。

2 结果与分析

2.1 复合侵蚀作用下侵蚀泥沙颗粒的平均重量直径

由图 2 可知,在模拟复合侵蚀试验过程中,坡面侵蚀泥沙 MWD 表现为冻融+风蚀+水蚀颗粒>冻融+水蚀颗粒>单一水蚀颗粒。由 MWD 的统计结果可以看出,单一水蚀试验的侵蚀泥沙颗粒 MWD 的变化范围是 0.64~0.71 mm,平均值为 0.68 mm;冻融+水蚀试验侵蚀泥沙颗粒 MWD 的变化范围是 0.69~0.78 mm,平均值为 0.75 mm;冻融+风蚀+水蚀试验侵蚀泥沙颗粒 MWD 的变化范围是 0.68~0.85 mm,平均值为 0.76 mm。不同复合侵蚀动力条件下,侵蚀泥沙颗粒平均重量直径的变化规律存在一定的差异性。随着不同侵蚀动力复合种类的增多 MWD 呈增大趋势。单一水蚀试验中,侵蚀泥沙的 MWD 变化最为稳定;而冻融+水蚀试验中,MWD 在增大的同时波动幅度增大;在冻融+风蚀+水蚀试验中,与前 2 组试验相比,MWD 起伏变化最剧烈。原因可能与冻融、风力叠加侵蚀影响土壤颗粒大小及坡面稳定性有关。

2.2 复合侵蚀作用下泥沙颗粒组成特征

为深入分析砒砂岩坡面泥沙搬运机制,有必要对坡面侵蚀过程中泥沙颗粒分布情况及分选特性进行研究。按照中华人民共和国水利部发布实施的

SL 237—1999标准^[24],同时考虑粗泥沙对黄河河床抬升的影响,本研究将泥沙颗粒分为砂粒(2~0.075 mm)、粉粒(0.075~0.005 mm)和黏粒(<0.005 mm) 3 个粒级。

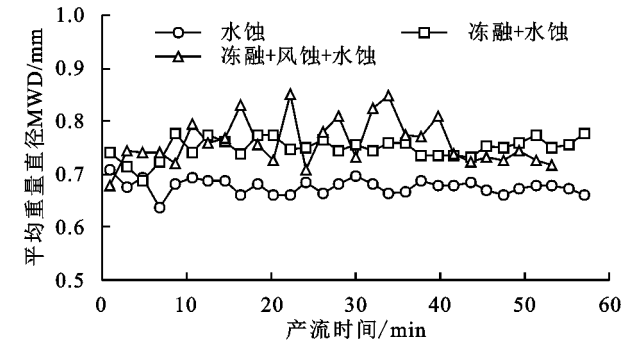


图 2 复合侵蚀作用下砒砂岩坡面侵蚀泥沙颗粒的平均重量直径

由表 2 可知,在颗粒组成方面,不同复合侵蚀作用下侵蚀泥沙中砂粒、粉粒和黏粒的平均含量分别为 48.84%,42.93%,8.23%,而供试土壤中的平均含量分别为 40.45%,48.12%,11.43%,两者之间相比比例相差不大,说明侵蚀泥沙具有与供试土壤颗粒相匹配的特征,这与 Asadi 等^[25]和 Slattery 等^[26]的研究结果相似。

侵蚀动力	砂粒		粉粒		黏粒	
	含量/%	富集率	含量/%	富集率	含量/%	富集率
单一水蚀	42.00	1.04	46.22	0.96	11.78	1.03
冻融+水蚀	51.39	1.27	41.95	0.87	6.66	0.58
冻融+风蚀+水蚀	53.14	1.31	40.61	0.84	6.25	0.55
平均值	48.84		42.93		8.23	

单一水蚀试验中,砂粒和黏粒含量分别增加了 2.0%~16.2%,1.2%~14.2%,而粉粒含量则降低了 1.7%~12.1%;冻融+水蚀试验中,粉粒和黏粒含量分别降低了 3.1%~44.9%和 33.8%~62.7%,而砂粒含量增加了 8.7%~71.7%;在冻融+风蚀+水蚀试验中,粉粒和黏粒含量降低,分别降低了 1.5%~23.8%和 38.4%~50.6%,而砂粒含量增加了 11.7%~40.5%。单一水蚀试验中黏粒含量升高,原因可能是随着降雨进行,雨滴击溅作用使得表土破碎,而此时的径流搬运能力不足以搬运所有被雨滴击溅分离的土壤颗粒,较粗的颗粒将沉积在表层,侵蚀泥沙中细颗粒含量升高,同时上方水流汇入会导致侵蚀泥沙中黏粒含量增加^[8],但随着侵蚀动力的复合叠加,随着坡面细沟的产生,其侵蚀力和搬运力均远大于雨滴击溅和坡面片状水流所具有的侵蚀力和搬运力,粉粒含量和黏粒含量下降,砂粒含量明显增加,说明侵蚀动力复合作用使得砒砂岩坡面侵蚀泥沙中的粗颗粒增多、颗粒粗化。

由图 3 可知,相比泥沙粗颗粒,黏粒含量在 3 组试验中随着降雨的持续产出占比皆为最低,且较为稳

定,这与供试土壤本身的颗粒组成有关。而粒径较大的砂粒和粉粒在复合侵蚀试验中受影响明显。在单一水蚀试验过程中,侵蚀泥沙颗粒含量在降雨过程中产出变化较为稳定,与供试土壤颗粒含量相比,砂粒含量提高而粉粒含量降低,但粉粒含量仍占多数。而当水力叠加冻融侵蚀时,在降雨初期产流开始后,与单一水蚀试验明显不同的是,黏粒含量明显减少,粉粒含量先增加后减少,砂粒含量先下降后逐渐上升并远超粉粒含量。其原因可能是由于冻融作用对土壤孔隙度、土壤胶结、土壤容重等性质的影响,雨滴击溅作用使土壤颗粒剥离、分散,为径流提供可搬运的物质,此时土壤颗粒堵塞土壤孔隙,阻滞降水入渗,破坏了表层的土体结构,大大增加了,此时坡面的径流和侵蚀力;同时也会增加径流紊动性,增强径流的分散和搬运能力,开始大量输移粗颗粒,从而改变了侵蚀泥沙中各粒径的含量^[27]。

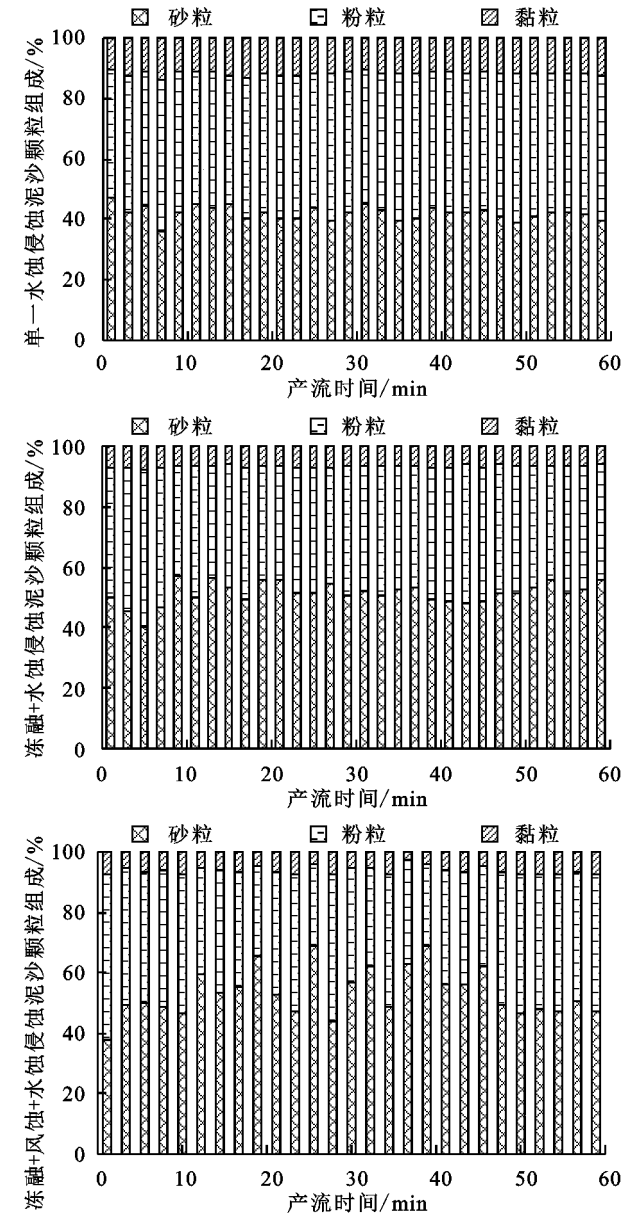


图 3 复合侵蚀作用下砒砂岩坡面侵蚀泥沙颗粒组成变化

在降雨过程中,砂粒和粉粒含量随降雨进行波动起伏明显。推测主要原因是受到冻融作用,短时间内径流冲刷和雨滴的击溅就容易使坡面出现细沟侵蚀,分散在坡面的径流在坡面缝隙和细沟中汇集并下渗,使得坡面浅层易出现塌陷情况,较大粒径的泥沙颗粒在侵蚀中流失,导致侵蚀泥沙中砂粒含量的上升^[28];同时细沟径流减弱雨滴的动能,降低了雨滴对坡面的作用力,减少搬运坡面的细颗粒泥沙。当水力叠加冻融、风力侵蚀时,发现在降雨初期,侵蚀泥沙中砂粒与粉粒含量变化异于前 2 组试验,粉粒含量高而砂粒含量低,推测是由于风力侵蚀使土槽坡面表层砒砂岩中已解冻或尚未完全解冻的固体冰晶松动,致使砒砂岩表层中的细小颗粒剥离^[29],导致在降雨初期内侵蚀泥沙中粉粒含量占多数。但由于风力侵蚀主要作用于土壤表层,随着降雨的继续进行,粉粒含量开始减少,砂粒含量开始增加并于较短时间内占据主要地位。相较于冻融+水蚀复合侵蚀试验,粉粒和黏粒含量出现小幅下降,砂粒含量继续升高,同时,随着降雨进行,侵蚀颗粒含量起伏变化剧烈。主要原因可能是土槽经历冻融和风力作用后,致使砒砂岩坡面土体在降雨过程中加速侵蚀,坡面在降雨开始后的较短时间内便出现较深细沟,加之降雨作用击打和径流下渗使得砒砂岩坡面多次大面积崩塌,造成大量粗颗粒流失。

2.3 复合侵蚀作用下泥沙颗粒富集率特征

由表 2 可知,单一水蚀试验中砂粒和黏粒的富集率>1,在试验中最高分别达到 1.16 和 1.14;而冻融+水蚀试验和冻融+风蚀+水蚀试验中只有砂粒含量的富集率>1,在试验中分别达到 1.40 和 1.71。因此可以进一步说明,在降雨过程中优先搬运的是粒径较大的颗粒。这可能是由于冻融过程完成后,砒砂岩地区冻融周期短,白天气温上升,土壤表层土温>0℃,但此时冰晶并未完全融化,随着夜晚气温的降低再次冻结,因此仍会有大量冰晶存在,土槽中部分土体降雨开始时仍处于冻结状态,土壤颗粒之间结成固体冰晶,此时雨滴击溅提供了大量可搬运的粗颗粒泥沙,土槽坡面大量粗颗粒开始流失;此时坡面透水能力差,导致在短时间内坡面形成较大的径流,径流侵蚀能力较强;同时坡面加速解冻,入渗能力增强,冻融作用使砒砂岩土壤在胀缩交替中结构被破坏,又在降雨过程中,受到雨滴击打及降雨冲刷,使得坡面上层粗颗粒泥沙随着降雨大量向出沙口输移并富集。

通过观察不同复合侵蚀作用下各粒径泥沙颗粒富集率的变化情况,也可以发现,在单一水蚀试验的降雨中后期,侵蚀泥沙不同粒径颗粒的富集率趋近于 1,表明侵蚀泥沙各粒径颗粒含量与供试土壤接近,一方面再次说明侵蚀泥沙颗粒与供试土壤颗粒相匹配;另一方面则

说明水蚀对砒砂岩坡面的侵蚀方式以整体侵蚀为主。冻融+风蚀+水蚀试验相较于冻融+水蚀复合侵蚀试验,粉粒和黏粒富集率出现小幅下降,砂粒富集率提高,值得注意的是,随着降雨进行,侵蚀颗粒富集率起伏变化剧烈,此时的砂粒富集现象明显,粉粒和黏粒的富集率普遍<1(图 4),推测这可能与冻融、风蚀和水蚀叠加致使坡面多次发生崩塌有关。

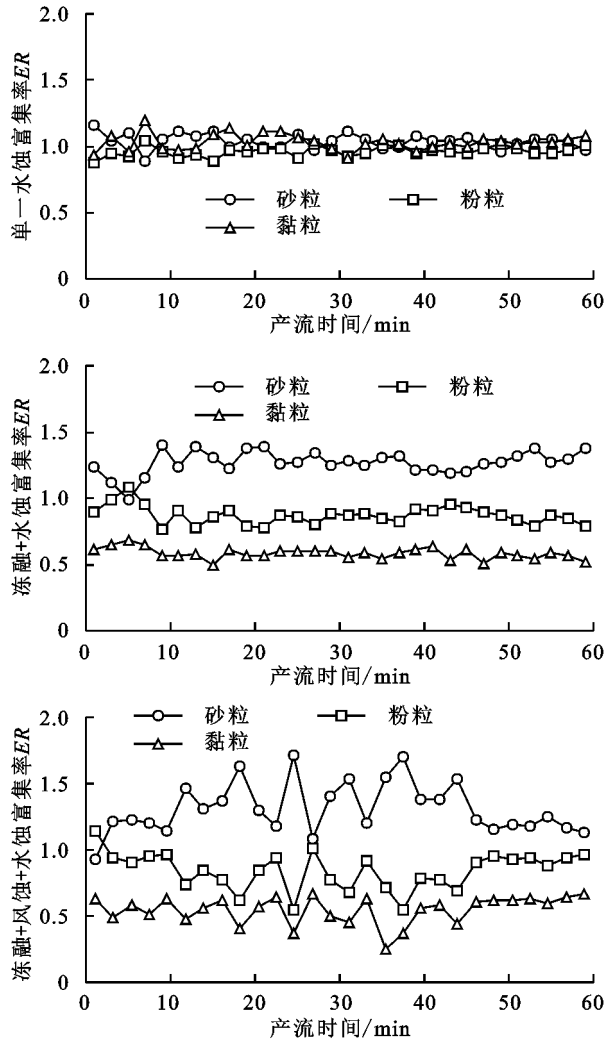


图 4 复合侵蚀作用下各粒级侵蚀泥沙颗粒富集率

3 结论

- (1)单一水蚀试验的侵蚀泥沙颗粒在降雨过程中产出变化较为稳定;在降雨中后期,不同粒径颗粒的富集率趋近于 1,表现出与供试土壤颗粒高匹配的特征。
- (2)冻融+水蚀试验中侵蚀泥沙颗粒的黏粒含量明显减少,砂粒含量以较快速率升高,粗泥沙颗粒流失明显,砂粒和粉粒含量随着降雨波动变化明显,这与冻融作用叠加降雨使坡面浅层发生塌陷有关。
- (3)冻融+风蚀+水蚀试验中,在降雨初期,侵蚀泥沙中砂粒与粉粒含量变化异于前 2 组试验,粉粒含量高而砂粒含量低。随着降雨进行,水力叠加冻融、风力发生复合侵蚀致使砒砂岩坡面土体加速侵蚀,使坡面不稳定发生多次大面积崩塌,造成大量粗颗粒流

失,侵蚀颗粒含量起伏变化剧烈,砂粒富集现象明显。

(4)水力叠加冻融复合侵蚀使砒砂岩侵蚀泥沙中粉粒和黏粒呈减少趋势,砂粒增加明显,此时冻融作用影响显著;当水力叠加冻融、风力侵蚀时,与水力叠加冻融相比,侵蚀泥沙颗粒变化更剧烈,粗颗粒尤其是砂粒流失严重。风力作用对粉粒含量的影响有所体现。

复合侵蚀动力作用关系复杂,本文运用水蚀、风蚀和冻融侵蚀模拟对复合侵蚀作用下砒砂岩坡面泥沙颗粒特征进行了探讨,虽然目前室内模拟试验还无法精确模拟野外复杂的自然条件,但试验模拟过程中砒砂岩坡面泥沙颗粒特征已反映出不同动力组合条件对侵蚀及不同粒径泥沙输移的影响,在今后的研究中仍需结合室内外更多的试验观测,进一步揭示复合侵蚀作用下砒砂岩坡面泥沙的搬运机制。

参考文献:

[1] Hairsine P B, Rose C W. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles, 1. Sheet flow [J]. *Water Resources Research*, 1992, 28(1): 237-243.

[2] Hairsine P B, Rose C W. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles, 2. Rill flow [J]. *Water Resources Research*, 1992, 28(1): 245-250.

[3] Hairsine P B, Sander G C, Rose C W. Unsteady soil erosion due to rainfall impact: A model of sediment sorting on the hillslope [J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 220(3): 115-128.

[4] 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.

[5] Meyer L D, Line D E, Harmon W C. Size characteristics of sediment from agricultural soils [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 47(1): 107-111.

[6] 胡宏祥,洪天求,马友华,等.土壤及泥沙颗粒组成与养分流失的研究[J].*水土保持学报*, 2007, 21(1): 26-29.

[7] 吴凤至,史志华,岳本江,等.坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究[J].*土壤学报*, 2012, 49(6): 1235-1240.

[8] 肖培青,郑粉莉.上方来水来沙对细沟侵蚀泥沙颗粒组成的影响[J].*泥沙研究*, 2003(5): 64-68.

[9] 张冠华,刘国彬,王国梁,等.黄土丘陵区两种典型灌木群落坡面侵蚀泥沙颗粒组成及养分流失的比较[J].*水土保持通报*, 2009, 29(1): 1-6.

[10] 王晓燕,陈洪松,田均良,等.侵蚀泥沙颗粒中¹³⁷Cs的含量特征及其示踪意义[J].*泥沙研究*, 2005(2): 61-65.

[11] 王玲.陡坡地水蚀过程与泥沙搬运机制[D].陕西 杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2016.

[12] 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.

[13] 姚文艺,肖培青,王愿昌,等.砒砂岩区侵蚀治理技术研究进展[J].*水利水电科技进展*, 2019, 39(5): 1-9, 15.

[14] Zhang P, Yao W Y, Liu G B, et al. Experimental study of sediment transport processes and size selectivity of eroded sediment on steep Pisha sandstone slopes [J]. *Geomorphology*, 2020, 363: e107211.

[15] 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.

[16] 石迎春,叶浩,侯宏冰,等.内蒙古南部砒砂岩侵蚀内因分析[J].*地球学报*, 2004, 25(6): 659-664.

[17] 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.

[18] Visser S M, Sterk G, Ribolzi O. Techniques for simultaneous quantification of wind and water erosion in semi-arid regions [J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 59(4): 699-717.

[19] 张平仓,唐克丽.六道沟流域有效水蚀风蚀能量及其特征研究[J].*土壤侵蚀与水土保持学报*, 1997, 3(2): 32-40.

[20] 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.

[21] 赵国际.内蒙古砒砂岩地区水土流失规律研究[J].*水土保持研究*, 2001, 8(4): 158-160.

[22] 郭进,文安邦,严冬春,等.三峡库区紫色土坡地土壤颗粒流失特征[J].*水土保持学报*, 2012, 26(3): 18-21.

[23] 朱高立,文博,李静,等.不同雨强和覆盖度条件下崩积体侵蚀泥沙颗粒特征[J].*土壤学报*, 2016, 53(6): 1371-1379.

[24] 中华人民共和国水利部. SL 237—1999 中华人民共和国行业标准: 土工试验规程[S], 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

[25] Asadi H, Ghadiri H, Rose C W, et al. An investigation of flow-driven soil erosion processes at low stream powers [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 342(1): 134-142.

[26] Slattery M C, Burt T P. Particle size characteristics of suspended sediment in hillslope runoff and stream flow [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997, 22(8): 705-719.

[27] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [J]. USA: *Agriculture Handbook(USA)*, 1978, 537: 62.

[28] Shi Z H, Fang N F, Wu F Z. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 454: 123-130.

[29] 卫午毓,肖培青,张攀,等.复合侵蚀作用下砒砂岩坡面产流产沙过程试验[J].*水土保持学报*, 2020, 34(2): 18-22.