

冻融作用对坡面侵蚀及泥沙颗粒分选的影响*

张 辉 李 鹏[†] 鲁克新 任宗萍 王 添 汤珊珊 王飞超

(西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048)

摘 要 为了探究冻土和解冻土对水力侵蚀的影响, 利用室内模拟降雨试验对冻土和解冻土两种坡面的坡面侵蚀过程及泥沙颗粒分选特征进行了研究。结果表明: 在降雨条件下, 相对于解冻坡面(TS), 冻土坡面(FS)的产流时间提前了173s, 而产流量、产沙量分别增加了9%和105%; 两种坡面侵蚀过程中的土壤颗粒平均重量直径(MWD)大小次序均为溅蚀颗粒>径流冲刷泥沙颗粒, 且冻土坡面溅蚀颗粒及冲刷泥沙颗粒MWD均显著大于解冻土坡面($p < 0.05$); 随着降雨进行, 解冻土坡面侵蚀泥沙中的黏粒、细粉粒含量呈先迅速增大后减少的趋势; 粗粉粒和砂粒含量则呈先减小后增大的趋势, 侵蚀泥沙逐渐向粗颗粒发展; 而冻土坡面各粒级颗粒随时间变化相对稳定。研究成果可为进一步揭示冻融作用下坡面水力侵蚀机理提供一定的参考依据。

关键词 模拟降雨; 冻土/解冻土; 溅蚀; 径流冲刷; 颗粒分选

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

冻融作用是指气候的日、年和多年变化可能导致特定气候区域的地球表层一定范围内土壤的冻结和融化作用^[1]。黄河中游地处温带中纬度地区, 每年约有105~125 d的气温在0℃以下, 多年平均年降水量300~600 mm, 满足冻融侵蚀发生的气候条件^[2]。已有研究表明, 冻融作用能有效地改变土壤结构^[3-4], 从而影响土壤的可蚀性; 当土壤处于冻结状态时, 土壤水因结冰而发生的体积膨胀会破坏土壤颗粒之间的连结性, 从而改变土壤颗粒的大小分布^[5]; 冻融作用将导致土壤颗粒大小呈减小的趋势^[6-7], 而这将对水力侵蚀造成很大影响。

在冻土解冻期, 由于解冻土层和冻结土层的存在, 坡面土壤可蚀性与未冻融和完全解冻坡面可蚀性存在较大差异^[8], 而前人的研究成果主要关注冻融前、后土壤可蚀性的变化, 而对冻结状态下土壤可蚀性研究较少^[9-12], 同时冻土和解冻土的土壤可蚀性差异尚不清楚。有研究表明, 冻土解冻

后, 抗剪强度下降, 土壤可蚀性增加^[11-13]; 坡面冻土初始解冻深度越小, 则前期侵蚀率越大, 侵蚀总量越大^[8], 因此, 相对于解冻土坡面, 冻土坡面更易发生侵蚀, 而这种现象发生的具体原因目前尚不明确。

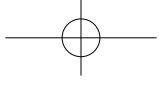
在侵蚀过程中的侵蚀泥沙颗粒粒径分布能够很好地反映侵蚀的变化过程^[14]。在侵蚀开始阶段, 侵蚀泥沙中的黏粒、粉粒含量较高; 随着侵蚀时间的延长, 泥沙颗粒逐渐变粗, 最后趋于稳定^[15]。吴凤至等^[16]研究发现, 溅蚀阶段侵蚀泥沙中2~50 μm颗粒含量较高; 细沟间侵蚀阶段的粗颗粒减少、细颗粒增多。吴新亮等^[17]研究发现, 侵蚀泥沙颗粒分布主要受黄土母质和降雨侵蚀力的影响, 且两者的影响差异较大。坡面侵蚀泥沙颗粒的粒径分布取决于土壤质地、降雨特性、径流类型、冻融作用、地形特征等很多因素^[18-20], 而这些因素也导致侵蚀泥沙颗粒分选规律存在很大差

* 国家自然科学基金项目(41330858, 41471226)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2016JM4017)共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41330858, 41471226) and Basic Research Program of Natural Sciences of Shaanxi (No. 2016JM4017)

[†] 通讯作者 Corresponding author: 李鹏(1974—), 男, 山东烟台人, 教授, 博士生导师, 主要从事水土资源与环境研究。E-mail: lipeng74@163.com

作者简介: 张 辉(1991—), 男, 陕西渭南人, 硕士研究生, 主要从事水力侵蚀研究。E-mail: zhanghui1017@yeah.net

收稿日期: 2016-12-02; 收到修改稿日期: 2017-01-19; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-04-13



异。其中，冻融作用能够破坏土壤颗粒之间的粘聚力^[5]，改变土壤原状颗粒大小，进而导致土壤颗粒容易发生分离。在水力侵蚀与冻融侵蚀复合作用下，坡面侵蚀及侵蚀泥沙颗粒分选规律会与单一的水力侵蚀作用有很大不同，然而，这种复合侵蚀作用下的侵蚀及泥沙分选过程目前尚不清楚。

由于下垫面条件差异和气候变化等原因，黄河中游局部地区之间的解冻期存在较大差异，而这种差异会影响该区域的土壤侵蚀情况，进而影响侵蚀泥沙的输移规律。本研究的主要目的是利用室内模拟降雨试验明确冻土坡面和解冻土坡面的水力侵蚀过程以及坡面侵蚀泥沙颗粒分选特征的差异，为进一步揭示冻融作用下坡面土壤水蚀机理提供一定的参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用土为西安郊区黄土，颗粒组成黏粒1.06%、粉粒93.58%和砂粒5.36%，土壤质地为粉砂质壤土，有机质含量为 $(3.0 \pm 0.1) \text{ g kg}^{-1}$ 。试验土槽采用木质土槽，土槽内部尺寸为 $0.9 \text{ m} \times 0.45 \text{ m} \times 0.15 \text{ m}$ （长×宽×高）。试验冻土装置采用澳柯玛DW-40W300超低温冰箱，冻土温度为 $-40^\circ\text{C} \sim -10^\circ\text{C}$ ，外形尺寸为 $1.15 \text{ m} \times 0.72 \text{ m} \times 0.84 \text{ m}$ （长×宽×高）。模拟降雨装置采用西安理工大学水资源研究所研制的由供水管路、恒压供水箱、针管式降雨器和控制阀等组成的针管式降雨装置。

1.2 试验设计

首先将自然风干后的供试土样过10 mm筛，剔除根系、石块等杂物；而后对过筛后的土样进行闷土，使其质量含水量达到15%左右，并保持土样内水分均匀。填土前，首先在土槽底部铺1层纱布，再装入2 cm厚的天然沙，以保证试验用土的透水性与自然坡面接近；然后根据设计的干容重 1.2 g cm^{-3} 按照式（1）计算出所需土样质量；按照每层土厚5 cm进行分层填装；在填完每一层土后，将表土略整粗糙后填装下一层土，以保证上、下两层土样结合紧密。在距坡顶30 cm和60 cm处的土壤表层以下3 cm处各布设一个温度探头，以测定土壤冻结时的温度变化特征。

$$m = B \times (1 + w) \times l \times b \times h \quad (1)$$

式中， m 为所需装土量，kg； B 为干容重，取 1.2 g cm^{-3} ； w 为土壤质量含水量，取15%； l 为土槽长，m； b 为土槽宽，m； h 为土槽深，m。

试验于2015年6月在西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点试验室培育基地雨洪侵蚀大厅完成。试验设计坡度为 12° ，设计雨强为 1.0 mm min^{-1} ，降雨空间分布均匀度控制在80%以上。

1.3 试验方法

室内试验分为冻土坡面模拟降雨试验和解冻土坡面模拟降雨试验2个部分，降雨历时均为60 min。具体过程如下：将填土后的土槽放入冻土装置，在 -18°C 环境下连续冻结24 h，保证距表层3 cm处的温度达到 $-5^\circ\text{C} \sim -6^\circ\text{C}$ 之间。第一组试验，将冷冻处理结束后的土槽立即放在模拟降雨装置下进行冻土坡面模拟降雨试验。第二组试验，将冷冻处理结束后的土槽放在室温下解冻24 h后放在模拟降雨装置下进行解冻土坡面模拟降雨试验。每组试验重复3次，试验结果取3次试验数据的平均值。

在模拟降雨试验开始前，将溅蚀板插入试验木槽的两侧，用于收集试验过程中的溅蚀泥沙颗粒；用水准仪校正试验土槽的坡度；进行雨强率定工作，当雨强满足 $(1.0 \pm 0.05) \text{ mm min}^{-1}$ 时，开始模拟降雨试验。在试验过程中，当土槽出水口开始产流后，记录产流时间，每隔5 min用高锰酸钾测量1次坡面径流流速；每1 min收集1次土槽出水口处的全部浑水样品，用精度为0.01g的电子天平测定浑水总重量后，放置在烘箱中 65°C 烘干并称重测得每1 min的坡面产沙量，进而推求每1 min的产流量。坡面产流后更换第1次溅蚀板，以后每隔10 min更换1次；将换下的溅蚀板水平放置，待风干24 h后收集溅蚀泥沙颗粒。将烘干后径流泥沙和风干后的溅蚀泥沙收集备测。

1.4 数据处理与分析

采用激光粒度仪测量泥沙样品的机械组成，激光粒度仪型号为Mastersizer2000，测定的范围为 $0 \sim 2 \text{ mm}$ ^[18]。泥沙颗粒机械组成的粒径分级采用中国制土壤质地分级标准，即：黏粒（ $< 0.002 \text{ mm}$ ）、细粉粒（ $0.002 \sim 0.02 \text{ mm}$ ）、粗粉粒（ $0.02 \sim 0.05 \text{ mm}$ ）、砂粒（ $0.05 \sim 0.25 \text{ mm}$ ）和粗砂粒（ $> 0.25 \text{ mm}$ ）。在试验中采用平均重量直径（MWD）表示侵蚀泥沙的颗粒大小分布状况，具体过程为：假设各粒级泥沙颗粒密度相同，泥沙颗粒平均重量直径（MWD）在数值上等于各

粒级颗粒的体积百分比乘以该粒级范围的算数平均值的总和,以此通过体积重量直径求得各泥沙颗粒的平均重量直径^[20-22]。

采用Excel2010和SPSS18.0进行试验数据分析,通过Origin8.0进行绘图,采用SPSS18.0对相关数据进行ANOVA方差分析和t检验。

2 结 果

2.1 两种坡面侵蚀过程特征

试验结果表明,在模拟降雨条件下,冻土坡面和解冻土坡面的产流量、产沙量显著不同(表1)。由表1中可以看出,冻土坡面的产流时间较解冻土坡面提前了173 s。两种坡面状态下的产流强度随时间变化的趋势相似(图1a):在产流开始后的10 min内,冻土坡面和解冻土坡面的产流强度均迅速增加,平均增加速率分别为 0.042 、 $0.036 \text{ L m}^{-2} \text{ min}^{-1}$;在产流开始后的10~21 min内,冻土坡面和解冻土坡面的产流强度缓慢增长,坡面的产流强度平均增加速率分别为 0.004 、 $0.007 \text{ L m}^{-2} \text{ min}^{-1}$;在产流开始21min以后,冻土坡面和解冻土坡面的产流强度分别逐渐趋近于 0.49 、 $0.47 \text{ L m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ 。在整个产流过程中,冻土坡面的产流强度始终大于解冻土坡面(图1a),冻土坡面的产流量、平均流速分别为解冻土坡面的1.09倍、1.35倍(表1)。

冻土坡面与解冻土坡面的侵蚀过程表现出明显的差异(图1b),在降雨过程中,冻土坡面的产沙强度始终显著大于解冻坡面,同时冻土坡面的产沙量是解冻坡面的2.05倍;在产流开始的

0~5min内,冻土坡面的产沙强度随着产流时间的延长呈显著增加趋势,并在第4分钟达到峰值 $19.45 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$,前5分钟的平均产沙强度是解冻土坡面的4.67倍;而解冻土坡面的产沙强度在第10分钟时才达到峰值 $8.81 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ 。在冻土坡面和解冻土坡面的产沙强度达到峰值后,随着降雨历时的延长,坡面产沙强度一直呈现减小趋势。

冻土坡面和解冻土坡面的产沙量存在显著差异的原因可能是:一方面,在降雨开始时,冻土坡面的土体处于冻结状态,固体冰晶的存在导致土壤孔隙度减小,坡面存在不透水层或弱透水层,水力传导度降低^[23],坡面入渗能力下降,导致在短时间内形成较大的坡面径流,径流侵蚀力较强;另一方面,在降雨过程中,冻土坡面不断加速解冻为水力侵蚀提供了较多的可蚀性物质,而解冻土坡面无冻结层,入渗能力相对较大,在降雨过程中极易形成结皮^[24],在一定程度上减少了侵蚀物质来源,导致径流含沙量降低。因此,从物质来源以及侵蚀动力两方面来说,冻土坡面形成的径流量较大,且侵蚀物质来源于不断解冻的坡面土壤,故冻土坡面的侵蚀产沙量相对较大。Sharrratt等^[25]与周丽丽等^[26]通过降雨试验分析认为,在冻土层解冻时期,冻土层离地表越近,则产流量越大,含沙量越高,这与本文的研究结果基本一致。试验观测结果表明,在模拟降雨过程中,冻土坡面和解冻土坡面始终未发生细沟侵蚀,侵蚀类型仅有溅蚀和面蚀。坡面侵蚀的产沙过程主要是坡面径流对降雨溅散土壤的输移和对坡面表层土壤的剥蚀^[20]。一般而言,坡面侵蚀速率随降雨历时的增

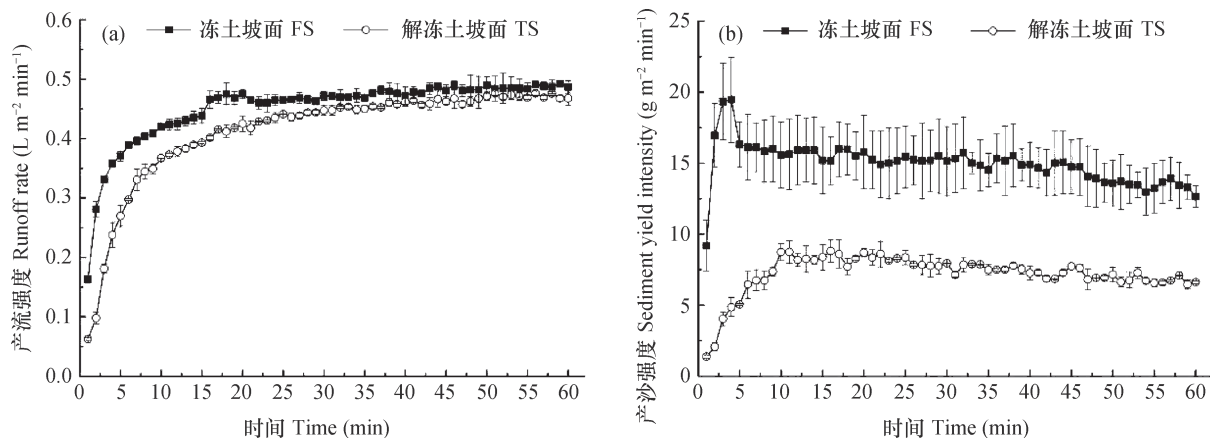


图1 冻土坡面(FS)和解冻土坡面(TS)的产流强度(a)和产沙强度(b)随时间的变化

Fig. 1 Temporal variations of runoff rate (a) and sediment yield intensity (b) on frozen and thawed soil slopes

表1 相同模拟降雨条件下冻土坡面（FS）和解冻土坡面（TS）的产流产沙试验结果

Table 1 Runoff rate and sediment yield intensity on frozen (FS) and thawed slopes (TS) under simulated rainfall				
处理 Treatment	产流时间 Initial runoff generation time (s)	径流量 Runoff (mm)	侵蚀量 Sediment yield (g m ⁻²)	流速 Runoff velocity (cm s ⁻¹)
冻土坡面 Frozen slope	177.0 ± 1.4	27.27 ± 0.43	891.9 ± 12.1	5.42 ± 0.94
解冻土坡面 Thawed slope	350.0 ± 7.8	24.98 ± 0.26	435.2 ± 9.7	4.02 ± 0.64

加而减小^[27]，产流初期的侵蚀产沙强度较大，随后逐渐减小，这与本试验所观察到的现象也基本相同。

2.2 坡面侵蚀泥沙颗粒分选特征

2.2.1 侵蚀过程中泥沙颗粒平均重量直径（MWD）变化规律 图2表示冻土坡面、解冻土坡面的土壤平均重量直径（MWD）的试验结果。从图2中可以看出，在模拟降雨试验过程中，冻土坡面和解冻土坡面MWD大小均表现为：溅蚀颗粒>冲刷泥沙颗粒。

由MWD的统计结果可以看出，冻土坡面冲刷泥沙颗粒MWD的变化范围为18.16~21.79 μm，平均值为19.89 μm，而溅蚀颗粒MWD的变化范围为23.46~27.73 μm，平均值为26.40 μm；解冻土坡面冲刷泥沙颗粒MWD变化范围为15.58~22.19 μm，平均值为19.33μm，而溅蚀颗粒MWD的变化范围为23.92~27.29 μm，平均值为25.32 μm。

t检验结果表明，冻土坡面和解冻土坡面的溅蚀颗粒MWD显著大于冲刷泥沙颗粒MWD（*p* < 0.01）；解冻土坡面溅蚀、冲刷泥沙的MWD分别与本底土壤颗粒的MWD间表现出极显著性差异（*p* < 0.01），冻土坡面冲刷泥沙颗粒MWD显著小

于土壤本底物颗粒（*p* < 0.01），但溅蚀颗粒与本底物颗粒之间并没有显著性差异。ANOVA方差分析结果表明，冻土坡面侵蚀过程中的溅蚀、冲刷泥沙颗粒MWD均显著大于解冻土坡面（*p* < 0.05），这可能与土壤冻结作用和径流的分选作用有关。

2.2.2 不同粒级泥沙颗粒含量的变化规律 为进一步揭示坡面侵蚀泥沙颗粒分选过程，对冻土坡面和解冻土坡面侵蚀过程中的不同粒级泥沙粒径含量进行了统计（表2、图3），结果表明两种坡面条件下各粒级泥沙颗粒含量有所不同。根据t检验分析结果，在整个降雨过程中，冻土坡面和解冻土坡面溅蚀泥沙和冲刷泥沙中的黏粒、细粉粒含量显著大于本底物（*p* < 0.01）；不同粒级的泥沙颗粒含量大小依次为冲刷泥沙>溅蚀泥沙>本底物；粗粉粒、砂粒含量显著小于本底物（*p* < 0.01），泥沙颗粒含量大小依次为冲刷泥沙<溅蚀<本底物，因此，溅蚀、细沟间侵蚀对土壤颗粒的分选作用不同，细沟间侵蚀对细小颗粒的分选能力大于溅蚀。冻土坡面溅蚀泥沙中的细粉粒含量大于解冻土坡面，而其他粒级的泥沙颗粒含量均小于解冻土坡面，说明冻结作用改变了溅蚀对土壤颗粒的分选作用。此外，冲刷泥沙各粒级平均含量的ANOVA检

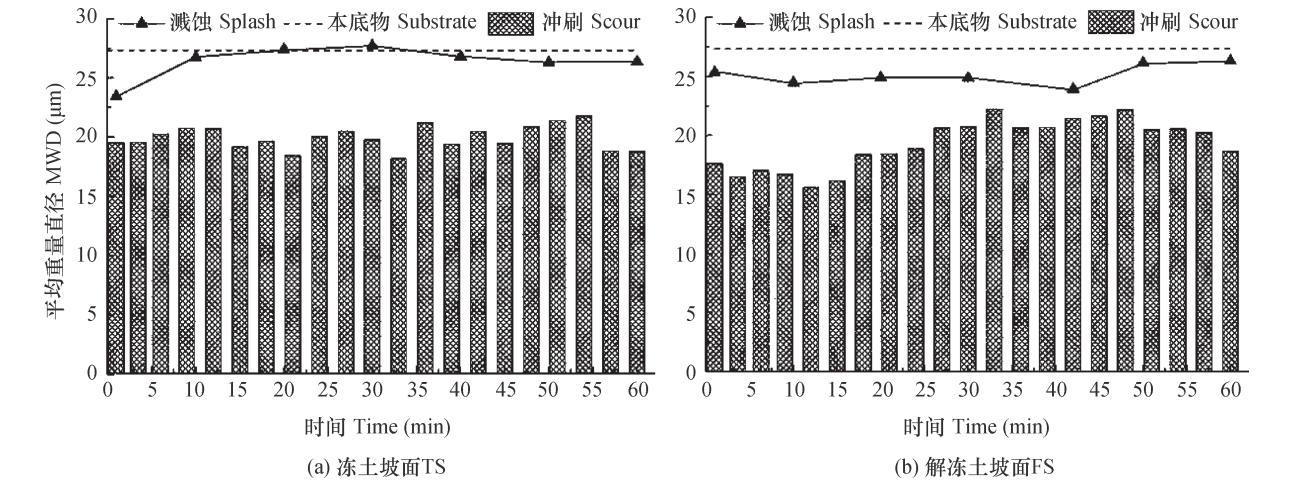


图2 冻土坡面FS（a）和解冻土坡面TS（b）3种颗粒平均重量直径（MWD）随时间的变化
Fig. 2 Temporal variation of mean weight diameter (MWD) of 3 fractions of soil particles on frozen and thawed soil slopes

验结果表明,在降雨过程中,冻土坡面黏粒、粗粉粒的平均含量显著大于解冻土坡面 ($p < 0.01$),细粉粒含量显著小于解冻土坡面 ($p < 0.05$),而两者沙粒含量之间无显著差异。以上分析结果表明,在冻土坡面和解冻土坡面水力侵蚀条件下,黏粒和细粉粒等细颗粒更容易被坡面径流输移带走,而冻土坡面相对于解冻坡面更容易侵蚀黏粒和粗粉粒,即 $< 2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $> 20\text{ }\mu\text{m}$ 的泥沙颗粒,解冻坡面更

容易侵蚀 $2\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 的细粉粒。
图3表示冻土坡面和解冻土坡面冲刷泥沙中各粒级泥沙百分含量随时间的变化规律。从图3中可以看出,在产流开始时,解冻土坡面侵蚀泥沙中的黏粒、细粉粒含量呈先迅速增大后减小的趋势,而粗粉粒和砂粒含量呈先减小后增大的趋势。因此,在坡面侵蚀过程中,冻土坡面侵蚀泥沙随着降雨时间的延长逐渐向粗颗粒发展;在坡面出口产流后

表2 各粒级颗粒平均百分含量

Table 2 Average percentage of each fraction of soil particles in content (%)				
处理 Treatment	黏粒 Clay	细粉粒 Fine silt	粗粉粒 Coarse silt	砂粒 Sand
本底值 Substrate	1.06	56.22	37.36	5.36
冻土坡面 TS	溅蚀 Splash 1.18	59.29	34.28	5.25
	冲刷泥沙 Scour 1.55	70.12	26.38	1.96
解冻土坡面 FS	溅蚀 Splash 1.12	60.44	33.90	4.53
	冲刷泥沙 Scour 1.33	71.98	24.90	1.79

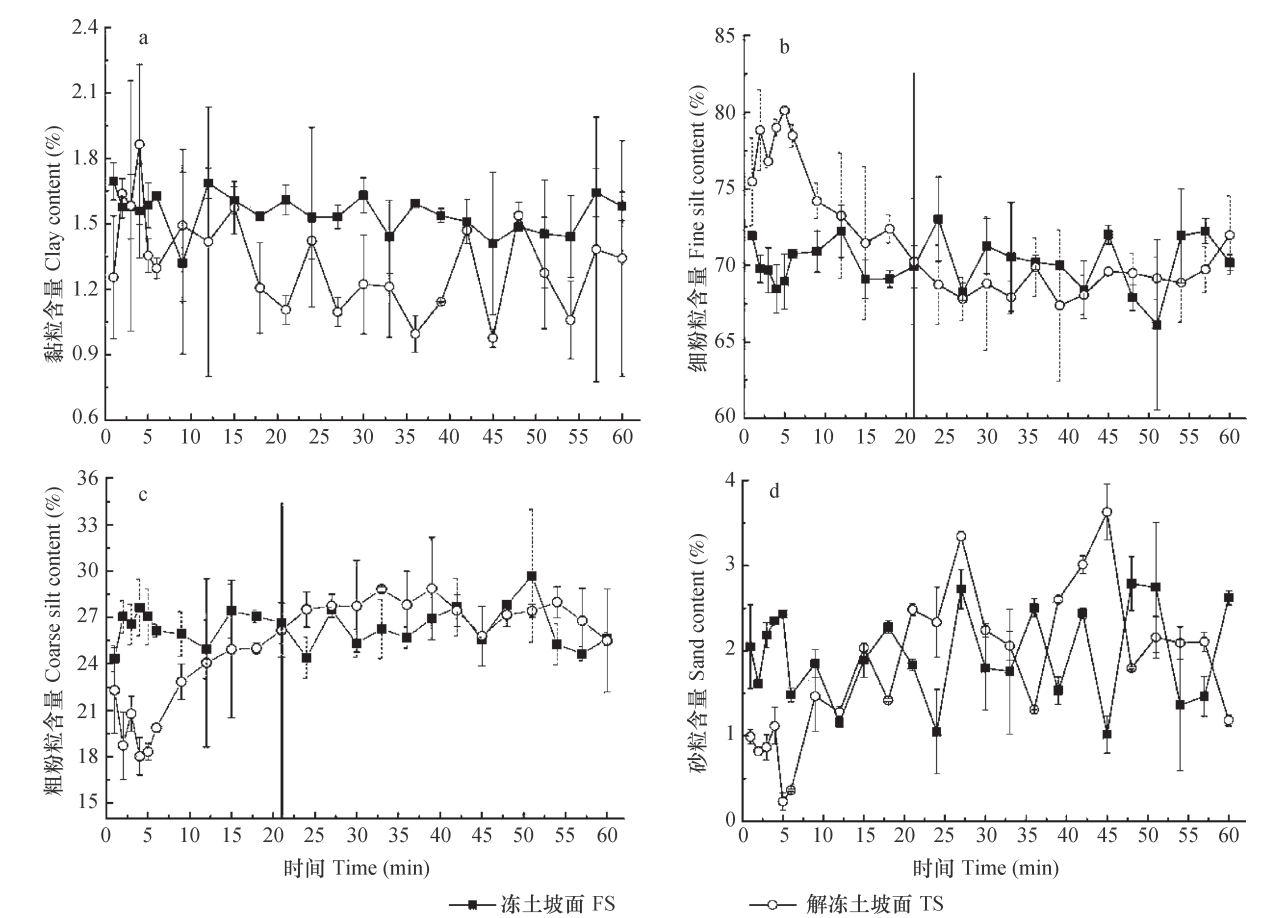
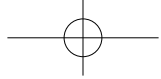


图3 冻土坡面和解冻土坡面中黏粒 (a)、细粉粒 (b)、粗粉粒 (c)、砂粒 (d) 含量随时间的变化规律
Fig. 3 Temporal variation of clay (a), fine silt (b), coarse silt (c), sand (d) contents in percentage on the frozen and thawed soil slopes



的前21min内,解冻土坡面的细粉粒含量大于冻土坡面(图3b),而粗粉粒含量小于冻土坡面(图4c);冻土坡面侵蚀泥沙颗粒含量随着降雨时间的延长并无明显变化规律。

解冻土坡面的径流侵蚀动力相对较小,径流对颗粒的分选性较好,土体表面细颗粒物质在产流开始后的较短时间内被径流挟带并输运至坡面出口,导致细颗粒物质含量在降雨初期迅速升高,随着降雨继续,细颗粒物质消耗殆尽而粗颗粒含量逐渐增加(图3b)。对于冻土坡面来说,坡面处于冻结状态,坡面入渗能力较低^[24],产流量较大,径流侵蚀动力较大,对粗颗粒的输移作用较强。因此,在降雨过程中,伴随着坡面冻土加速解冻,侵蚀颗粒不断释放,使得径流中的泥沙颗粒组成处于相对稳定状态,这说明冻土坡面在一定程度上改变了侵蚀泥沙颗粒的分选特征,降低了径流对泥沙颗粒的分选作用,导致不同粒级的泥沙颗粒的变化幅度较小。

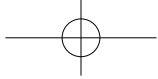
3 结 论

在模拟降雨条件下,相对于解冻土坡面,冻土坡面产流时间提前了173s,而坡面径流量、产沙量分别增加了9%和105%。在坡面侵蚀过程中,溅蚀颗粒、本底物颗粒的MWD显著大于冲刷泥沙颗粒MWD($p < 0.01$);解冻土坡面溅蚀泥沙颗粒MWD显著小于本底物颗粒,而冻土坡面溅蚀泥沙颗粒MWD与本底物颗粒之间没有显著性差异。此外,冻土坡面溅蚀、冲刷泥沙颗粒MWD均显著大于解冻土坡面($p < 0.05$)。解冻土坡面侵蚀泥沙中的黏粒、细粉粒含量随着降雨历时的延长呈先迅速增大后减小的趋势;而粗粉粒和砂粒含量呈先减小后增大的趋势;随着降雨历时的延长,解冻土坡面侵蚀泥沙逐渐向粗颗粒发展,而冻土坡面侵蚀泥沙中的各粒级颗粒在侵蚀过程中变化相对稳定。

参 考 文 献

- [1] 李述训,南卓铜,赵林.冻融作用对系统与环境间能量交换的影响.冰川冻土,2002,24(2):109—115
Li S X, Nan Z T, Zhao L. Impact of freezing and thawed on energy exchange between the system and environment (In Chinese). Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(2): 109—115
- [2] 王随继.黄河中游冻融侵蚀的表现方式及其产沙能力评估.水土保持通报,2004,24(6):1—5
Wang S J. Characteristics of freeze and thaw weathering and its contribution to sediment yield in middle yellow river basin (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 2004, 24(6): 1—5
- [3] Pawluk S. Freeze-thaw effects on granular structure reorganization for soil materials of varying texture and moisture content. Canadian Journal of Soil Science, 1988, 68(3): 485—494
- [4] 王恩姮,赵雨森,夏祥友,等.冻融交替后不同尺度黑土结构变化特征.生态学报,2014,34(21):6287—6296
Wang E H, Zhao Y S, Xia X Y, et al. Effects of freeze-thaw cycles on black soil structure at different size scales (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6287—6296
- [5] Bullock M S, Nelson S D, Kemper W D. Soil cohesion as affected by freezing, water content, time and tillage. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52(3): 770—776
- [6] Wang E H, Cruserichard M, Chen X W, et al. Effects of moisture condition and freeze/thaw cycles on surface soil aggregate size distribution and stability. Canadian Journal of Soil Science, 2011, 92(3): 529—536
- [7] Yang X M, Wander M M. Temporal changes in dry aggregate size and stability: Tillage and crop effects on a silty loam Mollisol in Illinois. Soil & Tillage Research, 1998, 49(3): 173—183
- [8] 范昊明,张瑞芳,武敏,等.草甸土近地表解冻深度对坡面降雨侵蚀影响研究.水土保持学报,2010,24(3):5—8
Fan H M, Zhang R F, Wu M, et al. Study on sloping land rainfall erosion affected by thaw depth of near-surface meadow soil (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(3): 5—8
- [9] Oztas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawed processes on soil aggregate stability. Catena, 2003, 52(1): 1—8
- [10] Skidmore E L, Thompson C A. Winter-associated changes in dry-soil aggregation as influenced by management. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(6): 1568—1572
- [11] Ting J M, Martin R T, Ladd C C. Mechanisms of strength for frozen sand. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109(10): 1286—1302
- [12] 范昊明,张瑞芳,周丽丽,等.气候变化对东北黑土冻融作用与冻融侵蚀发生的影响分析.干旱区资源与环境

- 境, 2009, 23 (6): 48—53
- Fan H M, Zhang R F, Zhou L L, et al. Impact of climate change on freeze-thaw function and freeze-thaw erosion in black soil region of northeast China (In Chinese). *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23 (6): 48—53
- [13] Gatto L W. Soil freeze-thaw-induced changes to a simulated rill: Potential impacts on soil erosion. *Geomorphology*, 2000, 32 (1): 147—160
- [14] Wang L, Shi Z H, Wang J, et al. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: A case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2014, 512 (512): 168—176
- [15] Slattey M C, Burt T P. Particle size characteristics of suspended sediment in hillslope runoff and stream flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997, 22 (8): 705—719
- [16] 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. *土壤学报*, 2012, 49 (5): 1235—1240
- Wu F Z, Shi Z H, Yue B J, et al. Particle characteristics of sediment in erosion on hillslope (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (5): 1235—1240
- [17] 吴新亮, 魏玉杰, 李朝霞, 等. 亚热带地区几种红壤坡面侵蚀泥沙的物质组成特性. *土壤学报*, 2014, 51 (5): 1223—1233
- Wu X L, Wei Y J, Li C X, et al. Composition of sediments of erosion from different red soil slopes in subtropical area (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (5): 1223—1233
- [18] 汤珊珊, 李鹏, 任宗萍, 等. 模拟降雨下覆沙坡面侵蚀颗粒特征研究. *土壤学报*, 2016, 53 (1): 39—47
- Tang S S, Li P, Ren Z P, et al. Particle size composition of sediment from sand-covered slope under simulated rainfall (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (1): 39—47
- [19] 李占斌, 李社新, 任宗萍, 等. 冻融作用对坡面侵蚀过程的影响. *水土保持学报*, 2015, 29 (5): 56—60
- Li Z B, Li S X, Ren Z P, et al. Effects of freezing-thawing on hillslope erosion process (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29 (5): 56—60
- [20] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 坡度和雨强对崩岗崩积体侵蚀泥沙颗粒特征的影响. *土壤学报*, 2014, 51 (5): 974—982
- Jiang F S, Huang Y H, Lin J S, et al. Effect of slope gradient and rainfall intensity on particle size composition of erosion sediment from colluvial deposits of benggang (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (5): 974—982
- [21] 杨帆, 张洪江, 程金花, 等. 华北土石山区坡面溅蚀和片蚀泥沙颗粒特征研究. *水土保持学报*, 2016, 30 (3): 71—77
- Yang F, Zhang H J, Cheng J H, et al. The sediment particles characteristics of splash and sheet wash in rocky mountain area of northern China (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 (3): 71—77
- [22] Issa O M, Bissonnais Y L, Planchon O, et al. Soil detachment and transport on field and laboratory-scale interrill areas: Erosion processes and the size-selectivity of eroded sediment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31 (8): 929—939
- [23] 郑秀清, 樊贵盛. 土壤含水率对季节性冻土入渗特性影响的试验研究. *农业工程学报*, 2000, 16 (6): 52—55
- Zheng X Q, Fan G S. Influence of moisture content on infiltration characteristics in seasonal frozen and thawed soils (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000, 16 (6): 52—55
- [24] Ran Q H, Shi Z N, Fu X D, et al. Impact of rainfall movement on soil crust development. *International Journal of Sediment Research*, 2012, 27 (4): 439—450
- [25] Sharratt B S, Lindstrom M J, Benoit G R, et al. Runoff and soil erosion during spring thaw in the northern U.S. Corn Belt. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2000, 55 (4): 487—494
- [26] 周丽丽, 王铁良, 范昊明, 等. 未完全解冻层对黑土坡面降雨侵蚀的影响. *水土保持学报*, 2009, 23 (6): 1—4
- Zhou L L, Wang T L, Fan H M, et al. Effects of incompletely thawed layer on black soil slope rainfall erosion (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23 (6): 1—4
- [27] 李建业. 前期土壤含水量与植被覆盖变化对坡面细沟间侵蚀的影响. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015
- Li J Y. Effect of the changing of antecedent soil moisture and vegetation cover on interrill erosion on the slope surface (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Northwest Agriculture and Forestry University, 2015



Effects of Freezing and Thawing on Soil Erosion and Sediment Particle Size Fractionation

ZHANG Hui LI Peng[†] LU Kexin REN Zongping WANG Tian TANG Shanshan WANG Feichao
(State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract 【Objective】The Freezing-thawing action refers to daily, annual and secular climate change that might lead to freezing and thawing of the earth's surface in a certain climatic region. When the soil is frozen, soil water is frozen, too, thus expanding in volume and the expansion destroys the connectivity between soil particles, and hence change particle size distribution of soil particles. And during the thawing period, owing to the existence of both thawed soil layer and frozen soil layer at the same time, the soil differs sharply in erodibility from those completely frozen or thawed. However, studies focused mainly on changes in soil erodibility before and after freezing and thawing and gave little attention to studies on erodibility of frozen soils. Under the joint actions of hydraulic erosion and freezing-thawing erosion, the slope varies sharply in soil erosion and sediment particle size fractionation from those under the single action of hydraulic erosion, however, it is still unclear how soil erosion and sediment particle size fractionation varies under the joint actions. 【Method】Therefore, an indoor experiment was carried out using simulated rainfall to explore effects of freezing/thawing on water erosion during the thawing period on slopes of loess, processes of soil erosion on frozen and thawed slope and particle size fractionation of sediment. 【Result】Results show that affected by rain, runoff initiated 173 seconds earlier on the thawed slope than on the frozen one, while runoff rate and sediment yield was 9% and 105% higher, respectively. In terms of MWD of sediment particles generated during the processes of soil erosion on the two slopes, an order was observed as splash particles > scouring particles, but MWDs of the two types of particles were both significantly higher on frozen soil slopes than on thawed soil slopes ($p < 0.05$). During the erosion process with the rainfall going on, the contents of clay and fine silt increased first and then decreased, but the contents of coarse silt and sand did reversely, on the thawed slopes, while the sediment got dominated with coarse particles. However, particle size fractionation of the sediment on frozen slopes did not vary much with the time going on. 【Conclusion】On frozen slopes, the existence of an aquiclude aggravates the soil erosion, but during the hydraulic erosion process, the erosion was low in selectivity of sediment in particle size relative to that on thawed slope. This paper is expected to provide some valuable reference for better understanding the mechanism of soil erosion.

Key words Simulated rainfall; Frozen/thawed soil; Splash erosion; Runoff scouring; Particle size fractionation

(责任编辑：檀满枝)