

# 辽西春季解冻期褐土工程堆积体坡面产流产沙模拟试验研究

姜倩<sup>1</sup>, 李坤衡<sup>1</sup>, 李宏伟<sup>2</sup>, 吕刚<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 西安 710000)

**摘要:** 为揭示春季解冻期工程堆积体土壤侵蚀过程机理, 以辽西地区的开挖河道工程堆积体为研究对象, 采用室内模拟放水冲刷试验对春季解冻期褐土工程堆积体坡面侵蚀过程进行研究。结果表明: 各解冻坡面径流量随着放水冲刷量的增加而增加, 并且在相同放水冲刷量下, 坡面径流量整体呈现未解冻坡面 > 解冻 2 h 坡面 > 解冻 4 h 坡面 > 对照; 解冻时间越长, 坡面对径流的延迟作用越明显; 解冻时间越长, 坡面侵蚀越严重。在相同放水冲刷量下, 堆积体坡面总产沙量整体呈现解冻 4 h 坡面 > 解冻 2 h 坡面 > 未解冻坡面 > 对照。相较于对照, 受冻融作用影响的坡面平均产沙率增加 7.90% ~ 44.76%。不同解冻时间及放水流量条件下工程堆积体坡面径流量、产沙量与放水流量均呈线性关系变化, 随着放水流量增加, 径流量、产沙量均线性增加; 相较于自然土壤, 工程堆积体更容易发生土壤侵蚀。

**关键词:** 土石混合体; 模拟冲刷试验; 土壤侵蚀; 春季解冻期; 辽西

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)02-0015-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.003

## Simulation Test on Runoff and Sediment Yield of Cinnamon Soil Engineering Accumulation Slope During Spring Thawing Period in Western Liaoning Province

JIANG Qian<sup>1</sup>, LI Kunheng<sup>1</sup>, LI Hongwei<sup>2</sup>, LÜ Gang<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000;

2. Hangjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co. Ltd. Shaanxi Province, Xi'an 710000)

**Abstract:** In order to reveal the mechanism of soil erosion process of engineering accumulation during spring thawing period, the accumulation of excavated river engineering in western Liaoning Province was taken as the research object, the erosion process of cinnamon soil engineering accumulation slope during spring thawing period was studied by indoor simulated water discharge scouring test. The results showed that: The runoff of each thawed slope increased with the increase of discharge scouring amount, and under the same discharge scouring amount, the runoff trend was unfreezing slope > thawed 2 h slope > thawed 4 h slope > control; the longer the thawing time, the more obvious the delay effect of slope on runoff and the more serious the slope erosion; under the same discharge scouring amount, the trend of the total sediment yield on the slope surface of the accumulation body was thawed 4 h slope > thawed 2 h slope > unfreezing slope > control. Compared with the control, the average sediment yield of slope affected by freezing and thawing increased by 7.90% ~ 44.76%, respectively. Under different thawing time and water discharge conditions, the runoff, sediment yield, and water discharge of engineering accumulation slope linearly changed. With the increase of discharge scouring amount, runoff and sediment yield linearly increased. Compared with natural soil, engineering accumulation is more prone to soil erosion.

**Keywords:** soil-rock mixture; simulated scouring test; soil erosion; spring thaw; western part of Liaoning Province

工程堆积体作为人为生产建设活动中开挖和堆垫的产物, 具有结构复杂、土体松散、抗蚀性差等特

点<sup>[1]</sup>, 主要由平台和坡面构成, 在外营力的作用下, 容易对其坡面造成侵蚀, 是生产建设项目水土流失的重

收稿日期: 2020-09-24

资助项目: 国家自然科学基金项目(41501548); 辽宁工程技术大学双一流学科创新团队建设项目(LNTU20TD-24)

第一作者: 姜倩(1987—), 女, 吉林长春人, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: 314143586@qq.com

通信作者: 吕刚(1979—), 男, 吉林九台人, 博士, 副教授, 主要从事土壤水文与土壤侵蚀研究。E-mail: lvgang2637@126.com

要来源<sup>[2]</sup>。由于工程堆积体特有的堆放和分布特点,造成局部水土流失剧增的现象,公路建设过程中弃土、弃渣堆积体对土壤流失总量的贡献可达 78%~90%<sup>[3]</sup>。而随着我国生产建设项目的不断的增加,因工程堆积体造成的水土流失问题日益加重,使得工程堆积体的坡面侵蚀问题得到很多学者的关注。张翔等<sup>[4]</sup>对红土及风沙土工程堆积体坡面产流产沙过程研究中发现,坡面产流产沙过程具有“多峰多谷”的特点,坡面产沙量随放水量的增大而增大,并呈现显著线性关系;康宏亮等<sup>[5]</sup>对风沙区工程堆积体坡面侵蚀研究中得出,在侵蚀过程中堆积体坡面表层土壤水分接近饱和后,土壤剥蚀率显著增加,显著增加后的平均剥蚀率是增加前的 1.64~40.77 倍;李宏伟等<sup>[6]</sup>在对土石混合堆积体坡面侵蚀的研究中发现,0~6 min 各坡面含沙量均呈下降趋势,而后逐渐趋于稳定;并且对其进行次降雨的过程中发现,堆积体坡面侵蚀量明显增加。由于人工堆放造成堆积体自身结构的特殊性,使其成为人为加速侵蚀的物质来源,因此,堆积体坡面侵蚀过程的研究对控制坡面稳定和防治水土流失具有实践意义。

解冻期土壤侵蚀是发生在冬春转换季节的一种侵蚀形式,主要指土壤在冻融交替作用下发生的冻融侵蚀,并且结合水力、重力等外营力作用下发生的一种侵蚀形式。由于解冻期的气温骤升骤降,土壤冻融作用加剧,导致土壤侵蚀程度严重。在季节性或常年积雪地区,春季积雪融化产生径流造成的侵蚀占全年总侵蚀量的比例较大,以往研究<sup>[7-8]</sup>也表明,地球上中纬度大部分地区经受季节性冻融作用。冻融作用可以改变土壤性质,进而影响土壤的可蚀性<sup>[9]</sup>;同时,土壤冻融作用还具有时间和空间的不一致性,影响坡面土体的稳定<sup>[10]</sup>。程圣东等<sup>[11]</sup>对黄土区不同初始解冻深度坡面冻融侵蚀研究表明,与未冻融坡面相比较,冻融坡面侵蚀过程中,产沙量显著增加 10~24 倍;魏震等<sup>[12]</sup>在冻融作用对坡面侵蚀的影响研究中表明,冻融坡面侵蚀量远大于未冻融坡面;还有研究<sup>[13-14]</sup>表明,冻融作用改变土壤容重和孔隙度,进而改变土壤的可蚀性,并且在一些地区融雪侵蚀率大于降雨侵蚀率。以往对工程堆积体坡面侵蚀的研究中多集中于房产、公路、矿山等建设项目<sup>[1,15-16]</sup>,并以探究堆积体细沟侵蚀过程、水力学参数特征及侵蚀形态等为主,对水力工程建设过程中形成的弃渣堆积体坡面侵蚀过程的研究较少。

辽西地区土壤类型以褐土为主,土壤有机质含量偏低,结构性差,土壤抗蚀差<sup>[17]</sup>,是发生土壤侵蚀的主要土壤类型。而河道土壤由于受河水的长期冲刷,导致土壤中砂粒含量高,使土体松散的堆积更容易在

外营力的作用下产生侵蚀,形成滑坡或泥石流,导致泥沙回流入河道,造成河道的再次堵塞,以及对其周围的水土资源造成破坏。因此,开展春季解冻期工程堆积体坡面侵蚀过程的研究对于揭示水力工程生产建设项目过程中弃渣堆积体侵蚀动力机制、泥沙输移特征具有重要的科学意义。本文以位于辽西地区的细河河道开挖形成的褐土工程堆积体为研究对象,采用室内模拟放水冲刷的方法研究工程堆积体坡面产流产沙过程,以期为生产建设项目水土流失量预测和水土保持措施布置提供基本参数和技术依据。

## 1 研究区概况

研究区属辽西地区大凌河支流的细河流域,细河是大凌河下游的最大支流,长 113 km,细河流域总面积 2 932 km<sup>2</sup>,阜新境内流域面积 2 290 km<sup>2</sup>。流域地处大陆性季风气候区,降雨年内分配不均,多发生在汛期 6—9 月,而 7—8 月最多,汛期雨量多集中在几次大暴雨中,洪水暴涨暴落。褐土是该区主要土壤类型,面积占比达 67.3%<sup>[18]</sup>。研究区为北方土石山区,在春季解冻期日温差、年温差较大,冻融交替明显,作用时间长。自 2003 年对细河进行综合治理,主要措施有细河主河道橡胶坝修建工程(2003—2012 年)、河堤修建工程(2003—2012 年)、河道清理工程(时间因每年蓄洪排涝情况而定)和桥梁拆除重建工程(海州桥,2019 年)等。大量工程建设活动,在河堤两侧形成大量的河道开挖工程堆积体。由于河坝(橡胶坝)的拦截蓄作用减弱河流对河道土的冲刷作用,土壤为经多年的河道沉积土。经人为挖掘后堆放于河道两侧,由于堆积体无植被覆盖,土壤砂粒含量高,有机质含量低,边坡土壤较为松散,因此极易发生水力侵蚀。

## 2 研究方法

### 2.1 供试土样

细河在阜新市区内流域面积广泛,市内河段是细河综合治理工程及水利工程集中建设区域。供试弃土渣来源于阜新市海州区细河开挖的河道土,弃渣堆积体于 2019 年 6 月由河道土人工堆积形成。工程堆积体顶部平台长约 5.9 m,宽约 2 m,底部长约 22.6 m,宽约 15.8 m,堆积体高 2.7 m,平台下方形成坡度在 20°~30°的堆积体坡面,呈宝塔状人工堆积体。使用体积为 200 cm<sup>3</sup>的钢制环刀分别在坡面从上到下“Z”形垂直于水平面按照 0—10,10—20,20—30 cm 的土层深度,分别采用环刀采集原状土壤样品,用于分析土壤物理性质。采用环刀法测量土壤容重,烘干法测量土壤初始含水率,土壤机械组成采用激光粒度仪进行测定。土壤的机械组成是依照美国制土壤

粒级分类标准,划分为砂粒( $>0.020\sim 2.000\text{ mm}$ )、粉粒( $>0.002\sim 0.020\text{ mm}$ )、黏粒( $\leq 0.002\text{ mm}$ )。测定方法见文献[19]。测得弃渣土壤中砂粒含量高达 82.23%,粉粒、黏粒含量相对较少,分别为 16.33%和 1.44%,土壤容重为  $1.4\text{ g/cm}^3$ ,初始含水率为 9.76%。

## 2.2 室内放水冲刷模拟试验设计

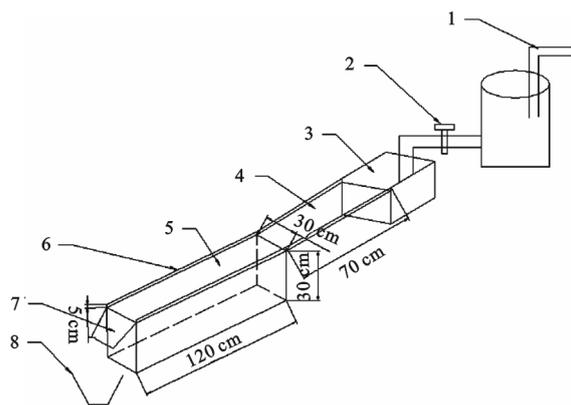
2019 年 10 月,在辽宁工程技术大学进行室内放水冲刷模拟试验,根据工程堆积体顶部平台形态特征,以单宽为  $0.3\text{ m}$ 、长为  $2\text{ m}$  所围成的区域为堆积体顶部汇流区。本试验模拟上方来水冲刷试验,运用公式(1)计算放水冲刷量<sup>[20]</sup>。

$$Q_f = \frac{Q_x + (I_y/60)}{20} \quad (1)$$

$$Q_x = S \times H \times k \times 10^3/60 \quad (2)$$

式中: $Q_f$ 为放水流量(L/min); $Q_x$ 为单位面积下积雪产生的水量(L); $I_y$ 为降雨强度(mm/h); $S$ 为汇流区单位面积( $\text{m}^2$ ); $H$ 为积雪厚度(m); $k$ 为松散密度,一般取 0.24。

试验坡度  $25^\circ$ ,共设计 3 个流量级(1, 2, 3 L/min),根据辽西地区气象资料,在春季解冻期气温为  $-4\sim 7^\circ\text{C}$ ,冷暖空气交替频繁,最高气温出现在 10:00—14:00,土壤处于未完全解冻状态,故设计 3 个解冻时间,分别为未解冻、解冻 2 h、解冻 4 h,解冻深度见表 1,并进行对照试验,共 12 场试验,试验装置见图 1。



注:1 为水源;2 为稳压阀;3 为溢流槽(玻璃);4 为稳流槽(玻璃);5 为土槽;6 为挡板;7 为出水口;8 为径流桶。

图 1 放水冲刷试验装置示意

2.2.1 试验装置 本试验为室内条件下的模拟春季解冻期融雪径流冲刷试验。模拟融雪径流侵蚀装置由供水水箱、流量控制阀、溢流槽、稳流水槽、径流坡面和试验土样部分相互连接组成(图 1)。当土样满足试验要求时将其放置在可调铁架中,其下部接有径流桶,用于承接径流泥沙样。铁架上配有与土槽相对应的凹槽,凹槽下方中心位置焊接 1 个“L”形卡槽,以固定下方的手摇式千斤顶,使土槽在升降和试验过

程中安全稳定。为了让冲刷径流接近稳流,在溢流水槽和土样之间连接 1 个长  $70\text{ cm}$  的玻璃材质稳流槽,相较于其他材质玻璃材质表面糙率更小,以确保水流流经土样表面时接近层流。千斤顶的升降高度可以满足土槽在  $0\sim 30^\circ$  自由升降。在土槽两侧加装  $5\text{ cm}$  挡板,防止试验过程中径流从两侧溢出。

2.2.2 土样装填 填土前对供试土样自然风干后进行培土,根据测得的土壤物理性质,按照容重( $1.4\text{ g/cm}^3$ )和土层厚度( $30\text{ cm}$ )计算填土质量,根据 10% 含水率计算添加水量;并用喷壶将计算好的水量喷洒到土样上,用铁锹搅拌均匀后盖上塑料薄膜,让土壤自然沉降 24 h,且防止水分蒸发。将处理好的土样按照  $5\text{ cm}$  1 层分层填充入长  $1.2\text{ m}$ 、宽  $0.3\text{ m}$  的土槽中,并层层压实;将填好土样的土槽用保鲜膜包裹,防止水分蒸发,准备放入冷库。

2.2.3 土样冷冻与运输 将填装好的土槽放入  $-15\sim -25^\circ\text{C}$  的冷库中,冷冻  $12\sim 15\text{ h}$  以保证土槽中土壤彻底冻实。土槽冷冻后由冷库专用的箱式冷藏车送到实验室,保证土槽在运输过程中始终处于冷冻状态,保证试验在解冻时间上的精准把握。

2.2.4 模拟冲刷试验 将经过冷冻的试验土壤取回后,放在铁架中,将坡度升至  $25^\circ$ ,模拟堆积体冻融坡面,准备进行模拟冲刷试验。试验在  $8\sim 15^\circ\text{C}$  室温下进行,冲刷开始后采用秒表计时并记录初始产流时间,观察试验过程并记录产流发生时间,用径流桶(大量筒)采集径流量,每 1 min 采集径流泥沙样 1 次,将径流泥沙样静止 12 h 后倒掉上清液,用烘干称重法测定泥沙量。径流量和产沙量均用电子天平测量,精确到小数点后 2 位。为减少径流对土槽下层未解冻土层加速融的影响,每次冲刷时间为  $20\text{ min}$ 。对照试验为不经冷冻处理的土壤,与冻融土壤在相同坡度与放水冲刷量下进行模拟试验。

本试验采用常规方法对冻结土壤解冻深度进行测量。在土槽上、中、下每  $30\text{ cm}$  取 1 个点,并在距离土槽一侧的  $5, 10, 15, 20, 25\text{ cm}$  的距离采用  $2\text{ mm}$  直径的细钢针垂直插入土壤表面,用直尺测量钢针插入深度,精确到毫米取平均值见表 1。

表 1 冻结土壤表面解冻深度随时间的变化过程

单位:cm					
时间/h	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm
0	0	0	0	0	0
1	3.5	2.7	2.5	2.5	3.0
2	5.2	3.5	3.7	4.1	5.5
3	7.8	4.6	5.0	6.5	8.5
4	11.5	8.6	7.6	9.5	12.6

## 2.3 数据处理

采用 SPSS 软件进行数据处理,Excel 进行绘图。

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同解冻时间的坡面产流特征

径流是坡面侵蚀的主要营力,同时也是土壤输沙的载体。由图 2 可以看出,放水量为 1 L/min 时,未解冻坡面在冲刷初期径流量呈现明显的先减小后增大再趋于稳定的趋势;并且未解冻坡面在冲刷初期,坡面径流量明显大于解冻坡面及对照坡面,坡面径流量是其他类型坡面的 1.18~2.4 倍。解冻 2 h 和解冻 4 h 堆积体坡面在冲刷初期坡面径流量变化幅度明显小于未解冻坡面。当放水量增加到 2,3 L/min 后,坡面径流量变化幅度明显减小,说明随着冲刷量的增加冻融作用对坡面径流量的影响逐渐减小。随着时间的延续,各类型坡面逐渐解冻,土壤中水分逐渐饱和,入渗减缓,坡面径流量趋于稳定,在相同流量下,冲刷后期不同坡面之间径流量变化幅度减小且趋于统一。各类型坡面径流量随着放水冲刷量的增加而增加,坡面径流量整体呈现未解冻坡面>解冻 2 h 坡面>解冻 4 h 坡面>对照。

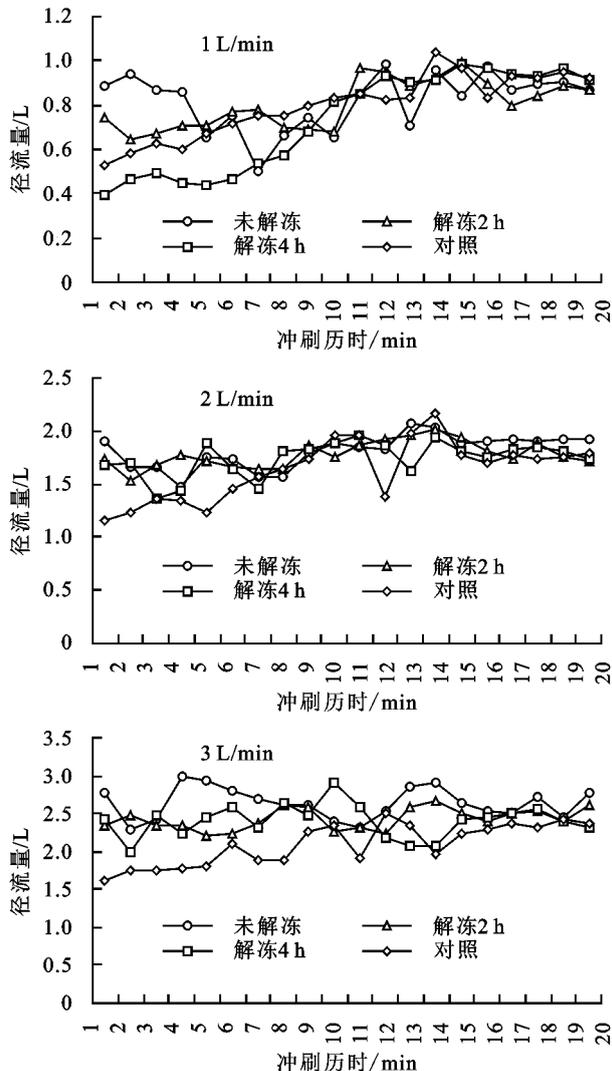


图 2 不同放水流量条件下冻融坡面径流量随时间的变化特征为分析不同解冻时间下坡面产流量的定量关系,

本文定义径流率为单位时间内小区坡面产生的径流量,将各场试验测得各个时段内的径流率取平均值,得到不同类型坡面平均径流率。从表 2 可以看出,不同解冻坡面的平均径流率随放水量的增加而增大,经冻融作用的坡面平均产流率明显高于对照。在不同放水量下,未解冻坡面平均径流率相对较大,分别为 0.81,1.83,2.58 L/min,在相同坡度下对比对照,坡面平均径流率分别增加 2.5%,14.4%,23.0%。解冻 2 h 坡面相较于对照,坡面平均径流率分别增加 1.2%,9.0%,15.0%,解冻 4 h 坡面相较于对照,坡面平均径流率分别增加 -7.0%,8.7%,14.7%。当放水量为 1 L/min,解冻 4 h 坡面平均径流率小于对照,这可能是由于较长的解冻时间加大堆积体坡面解冻深度,且冻融作用加大坡面土壤的孔隙度,增加坡面水分的入渗量,导致坡面径流减小。平均径流率的增大使受冻融影响的坡面更容易发生水土流失,故在春季解冻期应该对工程堆积体施加防护措施,避免对周围水土资源造成破坏。

表 2 不同类型坡面不同放水量条件下的平均径流率

单位:L/min

坡面类型	放水量	放水量	放水量
	1 L/min	2 L/min	3 L/min
未解冻坡面	0.81	1.83	2.58
解冻 2 h 坡面	0.80	1.75	2.42
解冻 4 h 坡面	0.73	1.74	2.41
对照	0.79	1.60	2.10

土体处于解冻状态时,土体的空隙被冰晶填充,形成不透水层,当积雪融化后,表层水分无法正常入渗到土壤中,加剧地表径流。而随着解冻时间的延长,坡面土壤解冻深度加深,不透水层的“阻断”效应也逐渐减弱,致使坡面径流量整体呈现未解冻坡面>解冻 2 h 坡面>解冻 4 h 坡面>对照。这与很多学者对黄土<sup>[21]</sup>、黑土<sup>[22]</sup>和草地壤土<sup>[23]</sup>的研究结果相似。但刘笑妍等<sup>[24]</sup>对冻融作用对东北黑土产流产沙的影响研究表明,冻融作用减小了坡面流量,与本文不符。首先与自然土壤相对比,褐土工程堆积体由于是人为堆放所致,土体结构被破坏,土壤中缺少植物根系,土壤孔隙度相对较小,影响表层水分入渗。其次,前者为野外观测试验,并未对土壤解冻程度做出明确交代。而本次研究在 3 种解冻时间下,土壤均处于未完全解冻状态,土壤解冻状态潜在的不一致性,可能是造成堆积体冻融坡面径流变化的重要原因。由图 2 可以看出,在不同解冻时间下的堆积体坡面产流量之间的变化差异,主要发生在冲刷试验的前中期,随着冲刷时间的延续,坡面逐渐解冻后,坡面径流量也趋于统一。

### 3.2 不同解冻时间的坡面产沙特征

由图3可以看出,与产流过程相比,产沙过程更为复杂,呈现出多峰多谷的特点,且随放水流量增大,产沙量波动程度增强;当放水量为1 L/min时,未解冻坡面径流量高于其他2种解冻类型坡面,但是坡面产沙量明显小于解冻2,4 h的冻融坡面。解冻4 h坡面在冲刷初期产沙量最小,随着冲刷历时的延长,坡面产沙量大幅上升。这是因为当坡面流量较小时,坡面径流量产生的动能难以将未解冻坡面的泥沙裹挟走,故径流量较大,泥沙相对较少。解冻2 h坡面初期产沙量最大为0.61 kg/min,原因是经过2 h解冻后,冻融坡面表层土壤更加松散,孔隙度增大,在冲刷初期表层土壤水分在少量入渗后即接近饱和,使得表层土壤很容易被坡面径流冲刷。当放水量为2 L/min时可以明显看出,坡面产沙量呈现解冻4 h坡面>解冻2 h坡面>未解冻坡面,各类型坡面产沙量波动幅度明显小于放水量为1 L/min时。当放水量增加到3 L/min时,坡面产沙量前后变化幅度更小,各解冻坡面土壤侵蚀量在冲刷过程中更为接近。

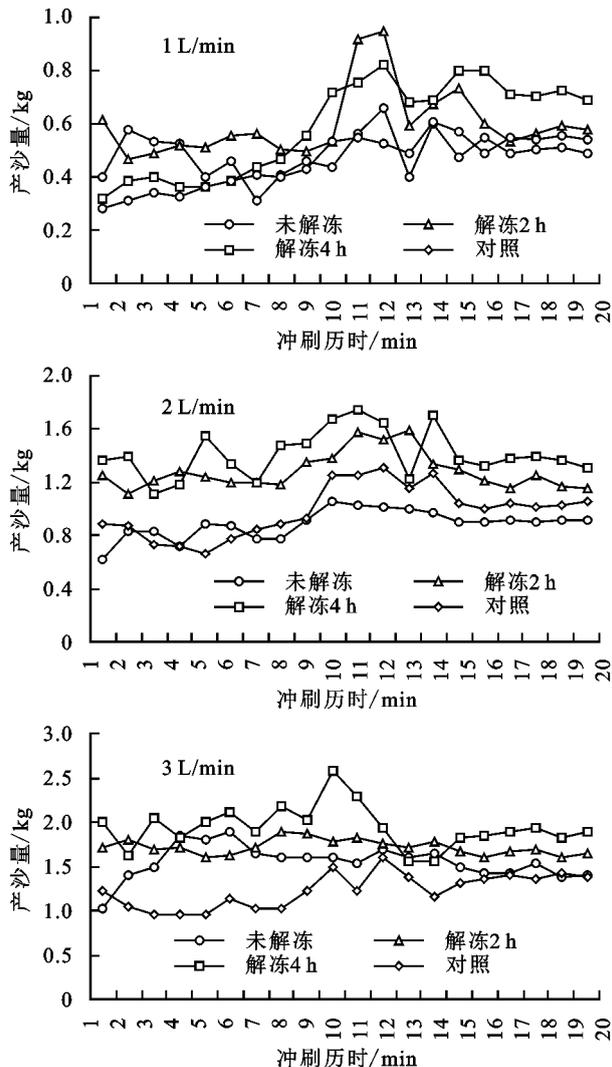


图3 不同放水流量条件下各解冻坡面产沙量随时间的变化特征

从表3可以看出,不同冻融类型坡面的平均产沙率随放水量的增加而增大,与对照相比,冻融坡面平均产沙率明显高于对照。在不同放水量下,解冻4 h冻融坡面平均产沙率相对较大,分别为0.58,1.41,1.95 kg/min,解冻2 h坡面平均产沙率分别为0.60,1.28,1.71 kg/min,未解冻坡面平均产沙率分别为0.48,0.88,1.55 kg/min;在相同坡度下对比对照,未解冻坡面平均产沙率分别增加6.0%, -8.3%, 26.0%。解冻2h坡面相较于对照,坡面平均产沙率分别增加33.0%, 33.0%, 39.0%,解冻4 h坡面相较于对照,坡面平均产沙率分别增加了29.0%, 46.8%, 58.5%。可见,冻融坡面相较于对照,坡面侵蚀更为严重。当放水量为2 L/min,未解冻坡面平均产沙率小于对照坡面,这是因为在放水冲刷试验过程中,坡面侵蚀是由面蚀逐渐向沟蚀转变的过程。有研究<sup>[5]</sup>表明,面蚀剥蚀率低且稳定,而细沟的出现会导致坡面剥蚀率持续增大。坡面在未解冻状态下冻结土壤难以被径流冲刷剥离,面蚀过程持续时间较长,导致平均产沙率较小。而对照试验在冲刷过程中更容易形成稳定的流经途径,进而形成沟蚀。故在流量较小时(1,2 L/min)未解冻坡面平均产沙率接近甚至小于对照坡面。而当放水量增大到3 L/min时,冲刷力的增强减弱冰晶的冻结作用,同时加速冻结坡面的解冻速度,故冲刷量较大时,未解冻坡面的平均产沙率明显大于对照坡面。

表3 不同解冻坡面不同放水量条件下的平均产沙率

单位: kg/min

坡面类型	放水量	放水量	放水量
	1 L/min	2 L/min	3 L/min
未解冻坡面	0.48	0.88	1.55
解冻2 h坡面	0.60	1.28	1.71
解冻4 h坡面	0.58	1.41	1.95
对照	0.45	0.96	1.23

很多学者<sup>[25]</sup>对自然土壤冻融坡面产沙过程中发现,冻融坡面产沙量明显高于未冻融土壤坡面。而本研究对工程堆积体冻融坡面的平均产沙率发现,多数情况下冻融坡面明显高于未经冻融处理的坡面(对照)。但是,当坡面流量较小时(1,2 L/min),未解冻坡面平均产沙率接近于甚至小于未冻融坡面。说明在未解冻状态下坡面土壤在较小径流量冲刷下,坡面表层土壤难以剥离。在冰晶连接下的土壤颗粒,一定程度上提高土壤抗蚀性,但随解冻时间的延长和坡面径流量的加大而逐渐减弱,坡面产沙量也随之增大。在与原生黄土冻融侵蚀产沙试验<sup>[26]</sup>比较中发现,黄土冻融坡面的泥沙流失量比对照增加4.67%,而工程堆积体冻融坡面产沙量比对照平均增加7.90%~44.76%。冻融作用对工程堆积体边坡侵蚀加剧影响更加明显。这是因为工程堆积体相较于自

然土壤没有良好的土体结构,土壤稳定性差,土体更加松散,并且褐土工程堆积体土壤砂粒含量更高,有机质和土壤黏粒含量明显低于其他自然土壤。这很大程度上减弱堆积体坡面土壤的抗蚀性,使冻融坡面更容易形成沟蚀,导致堆积体边坡更容易遭受侵蚀。所以在生产建设项目中,堆积体的堆放位置应远离河道、公路和农作物等,并及时采取水土保持措施加以防范,以免对水土资源造成破坏。

### 3.3 不同解冻时间下土壤产流、产沙与冲刷量的关系分析

径流具有较大的侵蚀动能及搬运能力,是造成水

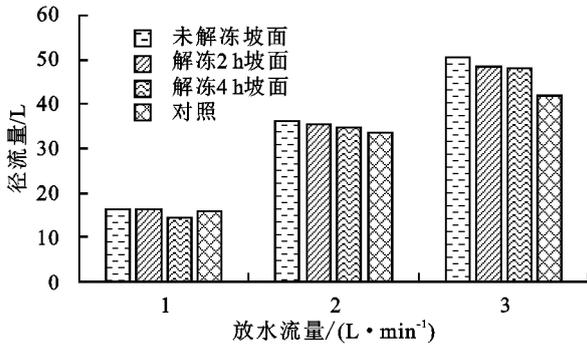
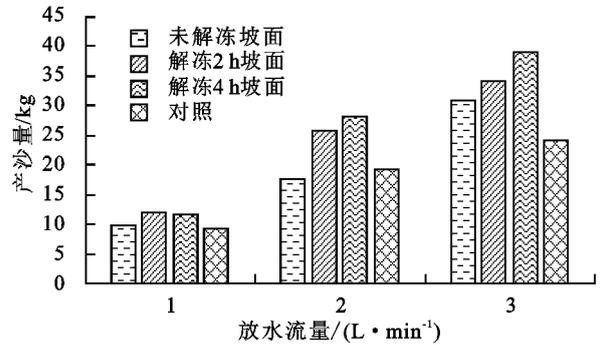


图 4 不同解冻时间工程堆积体随冲刷量变化的产流产沙量

土流失的主导因子。从图 4 可以看出,随着放水流量增加,径流量、产沙量均在增加。放水流量为 3 L/min 时,未解冻坡面总计径流量最大为 52.75 L,解冻 4 h 坡面总产沙量最大为 38.77 kg。各解冻坡面总产沙量整体呈现解冻 4 h 坡面>解冻 2 h 坡面>未解冻坡面>对照,且随着冲刷量的增大,差距越明显。当放水量为 1,2 L/min 时,不同冻融坡面总产流量差距并不明显。而当放水量增加到 3 L/min,可以明显看出坡面总径流量呈现未解冻坡面>解冻 2 h 坡面>解冻 4 h 坡面>对照的趋势。说明解冻时间和放水量直接影响堆积体坡面侵蚀程度。



在分析坡面径流量与放水冲刷量的关系可以看出,随着放水冲刷量的增加,各解冻坡面总径流量均呈增大趋势。但在相同流量下,不同解冻坡面总净流量相差不大。由图 2 也可以看出,堆积体坡面解冻程度的差异对冲刷初期影响较大,在冲刷的中后期各解冻坡面径流量基本处于同一水平。说明春季解冻期工程堆积体坡面径流量主要取决于放水冲刷量。这与林姿等<sup>[1]</sup>对煤矿工程堆积体边坡侵蚀水沙关系的研究结果一致。坡面平均产沙量随着放水冲刷量的增加。同时,在相同流量下冻融坡面产沙量明显高于未冻融坡面,并且随着解冻时间的延长坡面产沙量越大。

表 4 不同解冻条件下坡面产流量、产沙量与放水流量的经验方程

坡面类型	径流量与放水流量		产沙量与放水流量	
	经验方程	$R^2$	经验方程	$R^2$
未解冻坡面	$W=17.630Q-2.723$	0.980	$M=10.65Q-1.8333$	0.9798
解冻 2 h 坡面	$W=16.100Q+1.140$	0.986	$M=11.13Q+1.7167$	0.9829
解冻 4 h 坡面	$W=16.810Q-1.057$	0.986	$M=13.65Q-0.9867$	0.9853
对照	$W=13.425Q+3.907$	0.969	$M=7.40Q+2.7033$	0.9572

注:W 表示径流量(L);M 表示产沙量(kg);Q 表示放水流量(L/min)。

## 4 结论

(1)各解冻坡面径流量随着放水冲刷量的增加而增加,并且在相同放水冲刷量下坡面径流量整体呈现未解冻坡面>解冻 2 h 坡面>解冻 4 h 坡面>对照。解冻时间越长,坡面对径流的延迟作用越明显。

(2)解冻时间越长,坡面侵蚀越严重。在相同放水冲刷量下堆积体坡面总产沙量整体呈现解冻 4 h

为深入分析不同弃土弃渣下垫面径流量、产沙量和放水流量之间的定量关系,建立不同下垫面条件径流量、产沙量与放水流量的经验方程。从表 4 可以看出,在径流量、产沙量与放水流量的经验方程中,未解冻坡面径流量增长率最大为 17.63,解冻 4 h 坡面产沙量增长率最大为 13.65。斜率越大,证明在相同放水流量和坡度及冻融作用影响下的坡面产生更大的坡面径流及泥沙含量,冻融边坡受侵蚀影响越严重。土壤在冻融作用下,其理化性质、结构和质地等发生改变,导致其稳定性遭受破坏,土壤抗蚀性降低,从而在总体上使得土壤的性质向更易于侵蚀的方向发展。

坡面>解冻 2 h 坡面>未解冻坡面>对照。相较于对照,受冻融作用影响的坡面平均产沙率分别增加 7.90%~44.76%。

(3)不同弃土弃渣下垫面径流量、产沙量与放水流量均呈线性关系变化,随着放水流量增加,径流量、产沙量均线性增加;解冻时间的变化对堆积体坡面总径流量影响较小,对坡面总产沙量有直接影响。未解

冻坡面径流量增长率最大为 17.63, 解冻 4 h 坡面产沙量增长率最大为 13.65。

#### 参考文献:

- [1] 林姿, 史东梅, 李叶鑫, 等. 岩溶区煤矿工程堆积体边坡细沟发育及其水沙关系研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(3): 615-626.
- [2] 史东梅, 蒋光毅, 李叶鑫, 等. 不同土石比的工程堆积体边坡径流侵蚀过程[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 152-161.
- [3] 张乐涛, 高照良, 李永红, 等. 模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 145-153.
- [4] 张翔, 高照良, 杜捷, 等. 工程堆积体坡面产流产沙特性的现场试验[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 19-24, 32.
- [5] 康宏亮, 王文龙, 薛智德, 等. 陕北风沙区含砾石工程堆积体坡面产流产沙试验[J]. 水科学进展, 2016, 27(2): 256-265.
- [6] 李宏伟, 王文龙, 黄鹏飞, 等. 土石混合堆积体土质可蚀性 K 因子研究[J]. 泥沙研究, 2014(2): 49-54.
- [7] 孙宝洋, 李占斌, 肖俊波, 等. 冻融作用对土壤理化性质及风水蚀影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, 30(1): 337-347.
- [8] 王飞, 范昊明, 郭成久, 等. 我国两大冻融侵蚀区气候环境变化对比分析[J]. 生态环境, 2008, 17(1): 173-177.
- [9] Sharratt B S, Lindstorm M J, Benoit G R, et al. Runoff and soil erosion during spring thaw in the northern U.S. corn belt[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 55(4): 487-494.
- [10] 范昊明, 蔡强国. 冻融侵蚀研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(4): 50-55.
- [11] 程圣东, 杭朋磊, 李占斌, 等. 初始解冻深度对冻融坡面侵蚀产沙过程的影响[J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(3): 257-263, 293.
- [12] 魏霞, 李勋贵, Huang C H. 交替冻融对坡面产流产沙的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 157-163.
- [13] Ollesch G, Meissner R, Rode M, et al. Sukhanovski Y. 冬季土壤(融雪)侵蚀过程的特征和模型[J]. 中国水土保持, 2002(7): 16-17.
- [14] 刘佳, 范昊明, 周丽丽, 等. 冻融循环对黑土容重和孔隙度影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 186-189.
- [15] 张乐涛, 高照良, 田红卫. 工程堆积体陡坡坡面径流水动力学特性[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 37-41.
- [16] 郭明明, 王文龙, 李建明, 等. 神府煤田土壤颗粒分形及降雨对径流产沙的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 983-992.
- [17] 兰景涛, 范昊明, 柴宇, 等. 辽西土石质低山区不同土地利用类型土壤侵蚀特征研究[J]. 中国水土保持, 2009(8): 8-10.
- [18] 阜新市土地志编撰办公室. 阜新市土地志[M]. 辽宁 阜新: 阜新市政府机关印刷厂, 2001.
- [19] 农业标准出版研究中心. 最新中国农业行业标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- [20] 刘晓娇, 陈仁升, 刘俊峰, 等. 黄河源区积雪变化特征及其对春季径流的影响[J]. 高原气象, 2020, 39(2): 226-233.
- [21] 王飞超, 任宗萍, 李鹏, 等. 模拟降雨下冻融作用对坡面侵蚀过程的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 72-75, 83.
- [22] 王洋, 刘景双, 孙崇玉, 等. 农田黑土季节性冻融过程及其水分分布特征[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 6-9.
- [23] 延耀兴, 郑秀清. 季节性冻融条件下草地入渗特性的试验研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 34-37.
- [24] 刘笑妍, 张卓栋, 张科利, 等. 不同尺度下冻融作用对东北黑土区产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 45-50.
- [25] 任宗萍, 苏远逸, 李鹏, 等. 覆沙坡面径流冲刷试验研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 29-35, 41.
- [26] 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.

## 《水土保持学报》著作权使用声明

尊敬的《水土保持学报》各位作者:

您的来稿正式发表后, 文章著作权归作者所有, 其编辑版权归本刊编辑部所有。本刊已许可中国知网、万方、超星、维普、博看网、北京中邮阅读网等以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议, 请在投稿时说明, 本刊将按作者说明处理。