

# 土壤冻结对黄土细沟水流流速的影响

陈丽燕 雷廷武 班云云 高源

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 细沟水流流速是冻土和未冻土坡面水文过程的重要参数,与冻融坡面土壤侵蚀和泥沙输移密切相关。试验在长 8 m、宽 0.1 m、深 0.12 m 的土槽内填装深度为 0.05 m 的陕西安塞黄绵土坡面进行。设定坡度为 5°、10°、15°、20°,流量为 1、2、4、8 L/min,通过测量冻土与未冻土坡面细沟水流前锋流经整个土槽所用时间,计算水流的前沿流速,对比 2 种坡面上水流前沿流速的关系,研究冻结对水流流速的影响,同时采用电解质示踪法计算水流的优势流速,分析优势流速与前沿流速的关系。不同工况下,冻土坡面前沿流速在 0.260~0.843 m/s 之间,未冻土坡面水流前沿流速在 0.175~0.552 m/s 之间;冻土和未冻土坡面上,随坡度、流量的增大,前沿流速增大,增大率在缓坡(5°~10°、10°~15°)时逐渐减小,流量较小(1、2、4 L/min)时,流量增大,坡度对前沿流速增大率的影响也逐渐减小;坡度和流量对冻土坡面水流前沿流速的影响大于对未冻土坡面水流前沿流速的影响;冻土和未冻土坡面前沿流速均随坡度和流量的增大近似呈幂函数增大;在试验条件下,冻土坡面前沿流速和优势流速比未冻土坡面大 43% 和 40%;冻土和未冻土坡面上优势流速和前沿流速的比值分别为 0.61 和 0.63,表明该系数可以用于标定前沿流速。试验结果可为冻土坡面与未冻土坡面水流动力过程研究提供参考。

**关键词:** 黄绵土; 冻土坡面; 坡面径流; 前沿流速; 电解质示踪法

**中图分类号:** S157.9; P33      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2018)04-0282-08

## Effect of Soil Freeze on Flow Velocity in Loess Rills

CHEN Liyan LEI Tingwu BAN Yunyun GAO Yuan

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Water flow velocity along an eroding rill over frozen and non-frozen slopes is of great importance for understanding rill erosion hydrodynamics, which is closely related to erosion of freeze thaw soils and sediment transport. A series of flume experiments were conducted with loess soil from Ansai, Shaanxi Province. Flow velocities were measured in a stainless steel flume which was 8 m long, 0.1 m wide, and 0.12 m high. The experiments involved five slope gradients (5°, 10°, 15° and 20°), four flow rates (1 L/min, 2 L/min, 4 L/min and 8 L/min), with three replicates. Time intervals for water flow running from the top of the flume to the bottom end, covering a total length of 8 m was measured to calculate the velocities under different slopes and different flow rates, for both frozen soil and non-frozen soil slopes. The peak velocities were also gained by the data of conductivity changed with time by the electrolyte tracer method during the experiment. The leading edge velocities over frozen soil were between 0.260 m/s and 0.843 m/s and that of non-frozen were between 0.175 m/s and 0.552 m/s. Leading edge velocities over frozen soil and non-frozen soil were both increased with the increase of slope gradients and flow rate, the increasing rate of leading edge velocity was decreased with the increase of slope gradient or flow rate under gentle slope (5°~10°, 10°~15°) and low flow rate (1 L/min, 2 L/min and 4 L/min). Over frozen and non-frozen soils, the velocity was increased faster on gentle slopes than that on steep slopes and under low flow rate than that under high flow rate. The power function fitted the leading edge velocity very well for all the experimental conditions over frozen and non-frozen soils. The slope and the flow rate had greater effect on velocity over frozen soil slopes than over non-frozen soil. The result demonstrated that leading edge velocities and peak velocities over frozen soil were faster than that of non-

收稿日期: 2017-08-30    修回日期: 2017-12-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41230746)

作者简介: 陈丽燕(1980—),女,博士生,主要从事土壤侵蚀研究,E-mail: cly508@163.com

通信作者: 雷廷武(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀和旱地农业研究,E-mail: leitingwu@cau.edu.cn

frozen soil under all slopes and flowrates, the ratio of flow velocities over frozen soil and non-frozen soil was 1.43 and 1.40. The ratio of peak velocities and leading edge velocities over frozen and non-frozen slopes were 0.61 and 0.63. The experiment showed that the method for flow velocity measurement was reasonable, and it can also be widely used. The results can provide a data set for flow dynamics research over frozen soil and non-frozen soil.

**Key words:** loess soil; frozen soil; sheet flow; leading edge velocity; electrolyte tracer method

## 0 引言

在高纬度或高海拔的寒冷地区,冻融侵蚀是主要的土壤水力侵蚀类型<sup>[1]</sup>。冻融土壤侵蚀在美洲、欧洲和亚洲北部大部分地区是重要的侵蚀现象<sup>[2-5]</sup>。以冰雪覆盖为特征的高海拔山区和高纬度地区,对大多数河流的径流和泥沙运移有主要的控制作用<sup>[6]</sup>。我国是世界上多年冻土分布面积第三大国,全国冻融侵蚀面积达126.98万km<sup>2</sup>,占国土面积的13.36%。冻土是一种温度低于0℃且含有冰的土壤,对温度敏感且性质不稳定<sup>[7]</sup>。季节性冻土层融化后,由于下伏冻土阻止融水下渗,形成地表溢流,造成严重水土及养分流失。已有研究表明,土壤外部环境的改变影响土壤内部结构的变化<sup>[8]</sup>,冻融作用可以改变土壤结构、渗透性、导水性、容重、孔隙度、强度、团聚体水稳性等性质,进而影响土壤的可蚀性<sup>[9-14]</sup>,增大土壤侵蚀发生的强度<sup>[15-16]</sup>,冻融期内土壤养分变化过程也具有复杂性<sup>[17]</sup>。付强等<sup>[18]</sup>梳理了冻融交替对土壤理化性质的影响、冻融土壤水热环境响应及冻融土壤水热耦合模型等方面研究的前沿内容。温室气体排放导致气候变化,引起区域性和全球性气温升高以及气象条件的改变,同时影响地下热状况<sup>[19]</sup>。全球变暖的持续,会增加寒冷地区的融水侵蚀<sup>[20-21]</sup>,改变自然河流的流量等特征。

水流流速是研究地面水流、土壤侵蚀以及泥沙运移的重要参数。浅层地面水流的平均流速与土壤剥蚀以及水流泥沙运移直接相关,并决定了泥沙和污染物去向,是土壤侵蚀模型中的重要参数<sup>[22]</sup>。流速与流量、坡度、地形以及地表状况密切相关<sup>[23-24]</sup>。寒冷地区的融水水流流过冻土坡面和解冻土坡面,冻土表面流速大于未冻土和解冻土表面流速,导致更严重的土壤侵蚀,由于条件限制,定量测量冻土坡面流速的研究目前仍然比较少。

用于测量浅层水流流速的方法很多,最常用的为示踪法。常用的示踪剂包括染色剂<sup>[25-26]</sup>、盐溶液<sup>[27-28]</sup>、磁性材料<sup>[29]</sup>、热脉冲<sup>[30]</sup>、水同位素<sup>[31]</sup>、放射性同位素<sup>[32]</sup>以及漂浮物<sup>[33-34]</sup>等。不同的示踪法经常用来测定表面流速、优势流速,进而估计水流的平均流速。SINGH等<sup>[6]</sup>用木制漂浮物测量融水径

流流速,通过测量漂浮物运动给定距离所用的时间计算流速。木制漂浮物对于流量较小的侵蚀细沟中水流流速的测量并不适用。SHIT等<sup>[35]</sup>认为任何侵蚀只要产生了细沟,依据流速来描述流态就非常重要,其试验结果表明大部分细沟水流流速介于2~8cm/s。BAN等<sup>[1]</sup>采用电解质示踪法测量冻土坡面上水流流速,该方法测量精度比较高,但由于电解质薄层水流测量系统仪器昂贵,不能广泛应用。

KIRKBY等<sup>[36]</sup>认为温带地区年土壤流失量的50%以上都发生在冻土层解冻时期。黄土丘陵区地处温带内陆,每年0℃以下的时间约105~125d,大致是年总天数的1/3<sup>[37]</sup>。该地区的地理环境独特,各类地质灾害极易诱发,同时水土流失严重,地质水文环境对气象灾害十分敏感<sup>[38]</sup>,成为制约地区经济发展的重大问题<sup>[39]</sup>。径流是引起冻融坡面土壤侵蚀的主要动力来源<sup>[40-41]</sup>,径流流速是表征径流土壤侵蚀输沙动力的重要参数。土壤中的水分相变为冰,导致土壤颗粒受到挤压形成新的土骨架结构<sup>[42-43]</sup>,冻土坡面粗糙度发生相应改变,将对径流、土壤侵蚀产生较大影响。

本文以陕西黄土为研究对象,选取冻土和未冻土坡面2种处理,在室内冲刷试验中采用水流前锋示踪法测量冻土和未冻土坡面不同坡度和流量条件下的流速,对比分析坡度和流量改变对2种坡面水流流速的影响,同时用电质示踪法测量各断面电导率随时间变化的关系,计算水流的优势流速,并分析优势流速与前沿流速的相关关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料及试验过程

试验采用不锈钢土槽,长8m,宽0.1m,深0.12m,装土深度0.05m,如图1所示。

冷冻室长3.8m,宽2.4m,高3.0m,试验土槽采用2根3m、1根2m的土槽连接得到所需长度。试验于2016年5—6月在中国农业大学水利与土木工程学院实验大厅进行。

试验所用的土壤采自陕西安塞地区坡耕地表层,土壤类型为黄绵土、粉砂壤土。

试验前,首先制备冻土和未冻土样品。将试验土样均匀装入土槽内,装土时土壤表面保持一定的



图 1 试验土槽  
Fig. 1 Experimental flume

粗糙度,并使土槽边壁土壤表面略高于中间,以保证水流在土槽中间流动,尽可能避免边壁对水流的影响。装土后,向土槽内引入水流,将土壤充分饱和后,放置 24 h,以保证均匀一致的初始含水率,并尽可能消除填装不均匀的影响。为模拟自然界真实冻土状况,将充分饱和后的土槽放入冷库,在  $-25 \sim -15^{\circ}\text{C}$  条件下,冷冻 48 h 至土壤完全冻结后取出,立即进行试验。

试验采用蠕动泵提供恒定流量水流。水源由一个圆柱形储水罐提供,桶内混装冰块,保证水温接近  $0^{\circ}\text{C}$ 。

通过测量得到的水流前锋从水槽顶端运动到底端所用的时间和已知的土槽长度,计算水流的前沿流速。试验过程中将水流引入土槽顶端时,按下秒表开始计时,当水流前锋到达水槽底端断面瞬间停止记时,得到水流由顶端流到底部即全沟长 8 m 距离所用时间,由此即计算得到水流的前沿流速。

同时在土槽顶端放置电解质脉冲发生器,在水流引入土槽的同时注入电解质溶液,启动数据记录系统,在距离脉冲发生器下游 0.1、1、2、3、4、5、6、7、8 m 处各固定一组探针,水流引入土槽按下秒表同时点击“采集数据”按钮,测量不同断面的电导率,试验结束,计算机中形成 9 条完整的曲线,得到各断面电导率随时间变化数据。

试验设计 4 个流量(1、2、4、8 L/min),4 个坡度( $5^{\circ}$ 、 $10^{\circ}$ 、 $15^{\circ}$ 、 $20^{\circ}$ ),3 次重复,共进行  $4 \times 4 \times 3 = 48$  组试验。每次试验开始前,均校正水流流量。采用量筒和秒表记录一定时间段的水流量,计算流量,通过调节蠕动泵的转速得到设定的流量。

1.2 流速测量与计算方法

前沿流速为

$$u_L = \frac{L}{t} \tag{1}$$

式中  $u_L$ ——水流前沿流速, m/s  
 $L$ ——土槽顶端到底端的距离,即整个土槽的

长度,取 8 m

$t$ ——水流从土槽顶端运动到底端所用的时间, s

根据前沿流速计算公式,测量距离的长短对流速的精度影响较大,测量距离确定时,消除了测量距离的相对误差。水流流经较长的距离,使得操作者测量时间的相对误差减小,因此计算得到的水流流速精度提高。

水流优势流速  $u_p$  为

$$u_p = \frac{L_p}{T_p} \tag{2}$$

式中  $u_p$ ——优势流速, m/s  
 $L_p$ ——电解质溶液注入点到测量断面的距离, m  
 $T_p$ ——测量断面电导率达到峰值所用的时间, s

1.3 流速与坡度或流量的关系

根据水力学知识,设水流单宽流量为  $q$ ,水深为  $h$ ,则

$$q = uh \tag{3}$$

式中  $u$ ——水流流速, m/s  
水流为层流时

$$q = \frac{gSh^3}{3v} \tag{4}$$

式中  $g$ ——重力加速度,  $\text{m/s}^2$   
 $S$ ——坡度,  $(^{\circ})$   
 $v$ ——水流运动粘度,  $\text{m}^2/\text{s}$

联立式(3)、(4)得到

$$u = \left(\frac{g}{3v}\right)^{\frac{1}{3}} S^{\frac{1}{3}} q^{\frac{1}{3}} \tag{5}$$

式(5)表明坡度一定时,流速与流量成幂函数关系;流量一定时,流速与坡度成幂函数关系。式(5)中  $g$ 、 $v$  为常数,为了简便,将式(5)改写为

$$u = ax^b \tag{6}$$

式中  $a$ 、 $b$ ——常数  
 $x$ ——坡度或流量,  $(^{\circ})$  或 L/min

2 结果与分析

2.1 冻土和未冻土坡面前沿流速分析

2.1.1 冻土坡面坡度和流量对前沿流速的影响

采用式(1)计算得到的不同坡度和流量条件下冻土坡面水流前沿流速在 0.260 ~ 0.843 m/s 之间,前沿流速随流量变化如图 2 所示。

由图 2 可以看出,相同坡度条件下,随着流量由 1 L/min 增大到 8 L/min,前沿流速增大。相同流量条件下,随着坡度的增大,前沿流速增大。坡度较小

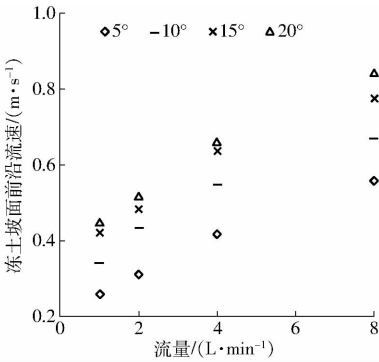


图 2 不同坡度条件下冻土坡面前沿流速随流量变化

Fig.2 Changes of leading edge velocity with flow rate over frozen soil slope at different slope gradients

时(如从 5°增大到 10°和从 10°增大到 15°时),速度增大较明显,而从 15°增大到 20°,流速增大不如小坡度明显。

2.1.2 未冻土坡面坡度和流量对前沿流速的影响

采用式(1)计算得到不同坡度和流量条件下未冻土坡面水流前沿流速在 0.175 ~ 0.552 m/s 之间,未冻土坡面水流前沿流速随流量变化如图 3 所示。

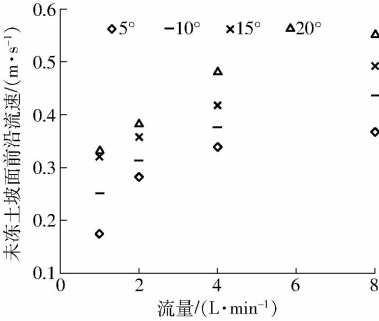


图 3 不同坡度条件下未冻土坡面前沿流速随流量变化

Fig.3 Changes of leading edge velocity with flow rate over non-frozen soil slope at different slope gradients

由图 3 可以看出,坡度一定时,未冻土坡面前沿流速随流量增大而增大,流量越大,流速增幅越小,出现该现象的原因是大坡度时未冻土坡面出现侵蚀细沟,并产生跌坎,试验现象如图 4 所示,跌坎的出现导致了流速的降低。流量一定时,前沿流速随坡度增大而增大,流速增幅在陡坡、小流量(如流量为 1 L/min,坡度从 15°增大到 20°)时较小;大流量时(4 L/min 和 8 L/min),前沿流速随坡度增大明显。

2.1.3 坡度和流量对前沿流速增大率的影响

坡度一定时,计算流量从 1 L/min 增大到 8 L/min 冻土和未冻土坡面前沿流速的增大率(表 1)为

$$\delta_q = \frac{u_8 - u_1}{u_1} \times 100\%$$

式中  $u_8$ 、 $u_1$ ——一定的给定坡度条件下,流量为 8、1 L/min 时的优势流速



图 4 水流冲刷形成的跌坎

Fig.4 Head cuts scoured by water flow

表 1 不同坡度条件下冻土和未冻土坡面前沿流速随流量的增大率

Tab.1 Increasing rate of leading edge velocity with flow rate at different slope gradients over frozen and non-frozen slopes

| non-frozen slopes |       | %     |
|-------------------|-------|-------|
| 坡度/(°)            | 冻土坡面  | 未冻土坡面 |
| 5                 | 114.9 | 109.7 |
| 10                | 97.0  | 73.8  |
| 15                | 84.2  | 54.0  |
| 20                | 89.6  | 65.6  |

由表 1 可以看出,冻土坡面由流量增大引起的前沿流速增大率大于未冻土坡面,说明流量对冻土坡面前沿流速的影响大于未冻土坡面,大坡度时未冻土坡面土壤侵蚀引起的跌坎是影响流速持续增大的主要原因。

流量一定时,计算坡度从 5°增大到 20°冻土和未冻土坡面前沿流速的增大率(表 2)为

$$\delta_s = \frac{u_{20} - u_5}{u_5} \times 100\%$$

式中  $u_{20}$ 、 $u_5$ ——一定的给定流量条件下,坡度为 20°、5°时的优势流速

表 2 不同流量条件下冻土和未冻土坡面前沿流速随坡度的增大率

Tab.2 Increasing rate of leading edge velocity with slope gradient at different flow rates over frozen and non-frozen slopes

| non-frozen slopes         |      | %     |
|---------------------------|------|-------|
| 流量/(L·min <sup>-1</sup> ) | 冻土坡面 | 未冻土坡面 |
| 1                         | 93.5 | 90.3  |
| 2                         | 65.6 | 35.0  |
| 4                         | 57.0 | 42.0  |
| 8                         | 50.8 | 50.4  |

由表 2 可以看出,冻土坡面由坡度增大引起的前沿流速增大率大于未冻土坡面,说明坡度对冻土坡面前沿流速的影响大于未冻土坡面。

综合表 1 和表 2,坡度和流量对冻土坡面前

沿流速的影响大于对未冻土坡面前沿流速的影响。

2.2 冻土坡面前沿流速与坡度和流量的函数关系

根据式(6),将不同坡度条件下,前沿流速随流量的变化关系进行拟合,结果如图 5 所示。

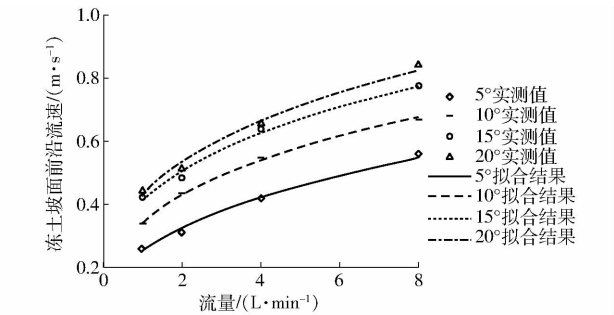


图 5 不同坡度条件下冻土坡面前沿流速随流量变化拟合函数关系

Fig. 5 Fitting relationship between leading edge velocity and flow rate at different slope gradients over frozen soil slopes

由图 5 可以看出,冻土坡面前沿流速随流量增大而增大,但增幅逐渐减小,符合幂函数关系。拟合参数值见表 3。

表 3 冻土坡面不同坡度条件下流速随流量变化幂函数拟合参数值

| Tab.3 Parameters of power function fitted to leading edge velocities at different flow rates and slope gradients over frozen slope |      |      |                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|----------------|
| 坡度/(°)                                                                                                                             | a    | b    | R <sup>2</sup> |
| 5                                                                                                                                  | 0.25 | 0.37 | 0.99           |
| 10                                                                                                                                 | 0.34 | 0.33 | 0.99           |
| 15                                                                                                                                 | 0.40 | 0.30 | 0.99           |
| 20                                                                                                                                 | 0.43 | 0.31 | 0.99           |

根据幂函数特性,参数  $b \in (0,1)$  时,因变量随自变量增大而增大,但增幅减小,趋近于 0。

同样拟合不同流量条件下,水流前沿流速随坡度的变化关系,结果如图 6 所示。

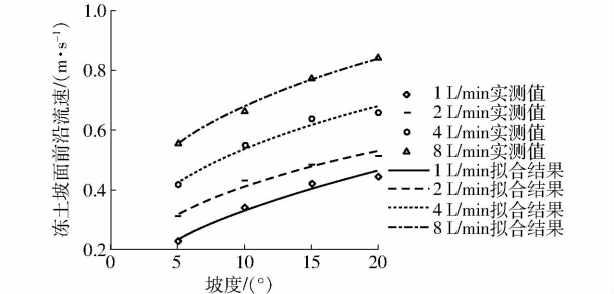


图 6 不同流量条件下冻土坡面前沿流速随坡度变化拟合函数关系

Fig. 6 Fitting relationship between velocities and slope gradient at different flow rates over frozen slopes

由图 6 可以看出,流量一定时,随着坡度增大,前沿流速增大,但增幅减小,变化关系符合幂函数,拟合得到的参数值见表 4。

表 4 冻土坡面不同流量条件下流速随坡度变化幂函数拟合参数值

| Tab.4 Parameters of power function fitting to leading edge velocities at different slope gradients and flow rates over frozen slope |      |      |                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|----------------|
| 流量/(L·min <sup>-1</sup> )                                                                                                           | a    | b    | R <sup>2</sup> |
| 1                                                                                                                                   | 0.14 | 0.40 | 0.99           |
| 2                                                                                                                                   | 0.18 | 0.37 | 0.97           |
| 4                                                                                                                                   | 0.25 | 0.34 | 0.98           |
| 8                                                                                                                                   | 0.34 | 0.30 | 0.96           |

2.3 未冻土坡面前沿流速与坡度和流量的函数关系

用式(6)拟合不同坡度条件下未冻土坡面水流前沿流速随流量的变化关系,如图 7 所示。

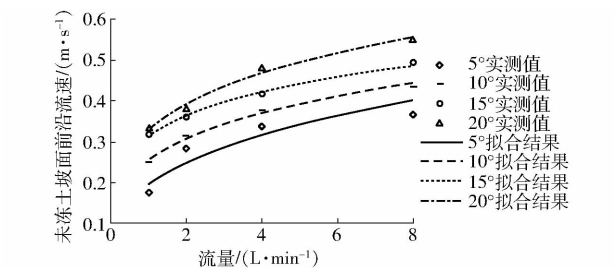


图 7 不同坡度条件下未冻土坡面前沿流速随流量变化拟合函数关系

Fig. 7 Fitting relationship between leading edge velocities and flow rate at different slope gradients over non-frozen soil

由图 7 可以看出,相同坡度条件下,前沿流速随流量呈增大趋势,随流量的变化符合幂函数关系,拟合参数值见表 5。

表 5 未冻土坡面不同坡度条件下流速随流量变化幂函数拟合参数值

| Tab.5 Parameters of power function fitted to leading edge velocities at different flow rates and slope gradients over non-frozen slope |      |      |                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|----------------|
| 坡度/(°)                                                                                                                                 | a    | b    | R <sup>2</sup> |
| 5                                                                                                                                      | 0.20 | 0.35 | 0.87           |
| 10                                                                                                                                     | 0.26 | 0.26 | 0.99           |
| 15                                                                                                                                     | 0.32 | 0.21 | 0.99           |
| 20                                                                                                                                     | 0.33 | 0.25 | 0.99           |

同样,采用式(6)拟合相同流量条件下水流前沿流速随坡度的变化关系,结果如图 8 所示。

由图 8 可以看出,相同流量条件下,前沿流速随坡度呈增大趋势,增幅逐渐减小,变化过程符合幂函数,拟合参数值见表 6。

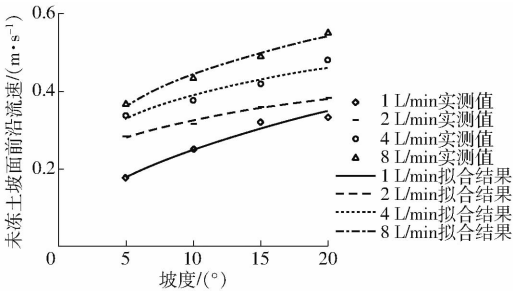


图 8 不同流量条件下未冻土坡面前沿流速随坡度变化拟合函数关系

Fig. 8 Fitting relationship between leading edge velocities and slope gradients at different flow rates over non-frozen soil

表 6 未冻土坡面不同流量条件下前沿流速随坡度变化幂函数拟合参数值

Tab. 6 Parameters of power function fitting to leading edge velocity at different slope gradients and flow rates over non-frozen slope

| 流量/(L·min <sup>-1</sup> ) | a    | b    | R <sup>2</sup> |
|---------------------------|------|------|----------------|
| 1                         | 0.08 | 0.49 | 0.98           |
| 2                         | 0.20 | 0.22 | 0.97           |
| 4                         | 0.22 | 0.24 | 0.94           |
| 8                         | 0.23 | 0.29 | 0.99           |

2.4 冻土与未冻土坡面水流流速对比

2.4.1 坡度对冻土与未冻土坡面水流流速影响

将不同坡度条件下冻土和未冻土坡面水流前沿流速进行常数项为零的线性拟合,结果如图 9 所示。

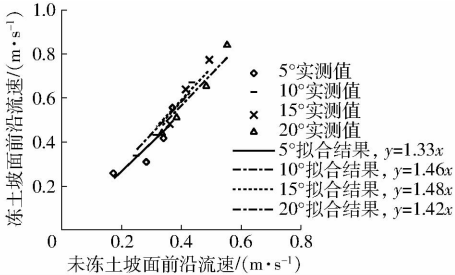


图 9 不同坡度条件下冻土与未冻土坡面水流前沿流速对比

Fig. 9 Relationship between leading edge velocities over frozen and non-frozen soil at different slope gradients

土壤饱和后冻结,表面粗糙度降低,水流阻力减小,因此冻土坡面水流流速大于未冻土坡面水流流速。由图 9 可以看出,随坡度从 5°增大到 15°,冻土坡面与未冻土坡面前沿流速比值从 1.33 增大到 1.48,呈增大趋势。坡度较大时,未冻土坡面会因为侵蚀形成细沟和局部跌坎,试验观测现象如图 4 所示,导致水流流速降低,而侵蚀发生的部位及细沟的形态多具有较大的随机性,因此对流速的影响也具有较大的随机性。其中 10°、15°、20°时二者的流速比比较稳定,为 1.46、1.48、1.42,表明不同坡度条

件下冻土坡面的流速整体比未冻土壤坡面流速大 42% ~ 48%。

2.4.2 流量对冻土和未冻土坡面前沿流速影响

将不同流量条件下冻土和未冻土坡面前沿流速进行常数项为零的线性拟合,拟合结果如图 10 所示。

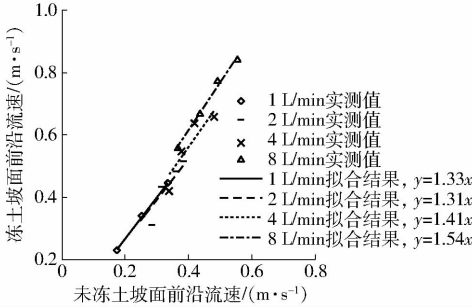


图 10 不同流量条件下冻土和未冻土坡面前沿流速关系对比

Fig. 10 Relationship between flow velocities over frozen and non-frozen soil slopes at different flow rates

由图 10 可以看出,随流量的增大,冻土与未冻土坡面前沿流速的比值从 2 L/min 开始逐渐增大,在流量为 8 L/min 时达到最大,为 1.54,说明流量从 2 L/min 增大到 8 L/min 时冻土坡面的流速增幅比未冻土坡面流速增幅大,原因是坡度较大时,未冻土坡面由于水流冲刷形成细沟和局部跌坎,水流从跌坎上落下后水平速度从零开始增加,水流每次经过跌坎,流速都会从零开始增大,因此总体速度减小,坡度越大、流量越大形成的跌坎越多,流速减小程度越大。并且由于水流冲刷,跌坎后一段距离内的坡度不再是试验设定坡度,而是小于试验设定坡度,也会导致流速减小。试验现象如图 6 所示,即流量较大时,未冻土壤细沟侵蚀引起坡面形态变化降低了土壤坡面流速。1、2、4 L/min 条件下,2 种坡面流速比值比较稳定,在 1.31 ~ 1.41 之间。

2.5 前沿流速与优势流速对比

将不同坡度、流量条件下冻土与未冻土坡面的前沿流速和优势流速进行常数项为零的线性拟合,结果如图 11 所示。

由图 11 可以看出,不同坡度、流量条件下冻土坡面优势流速与前沿流速的比值为 0.61,未冻土坡面优势流速与前沿流速的比值为 0.63,该比值可用来标定测得的水流的优势流速。

2.6 冻土与未冻土坡面水流流速对比

将所有坡度和流量条件下冻土和未冻土坡面的前沿流速和优势流速进行常数项为零的线性拟合,结果如图 12 所示。

由图 12 可以看出,前沿流速和优势流速在冻土

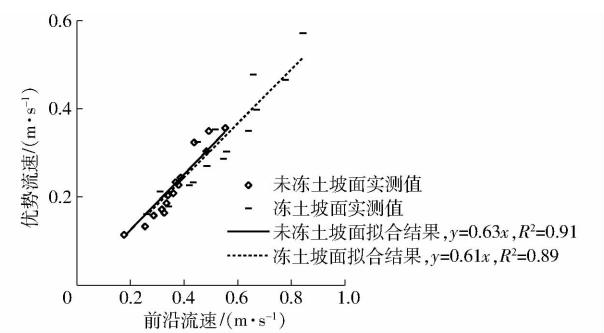


图 11 冻土与未冻土坡面前沿流速和优势流速的关系  
Fig. 11 Relationship between leading edge velocities and peak velocities over frozen and non-frozen soil slopes

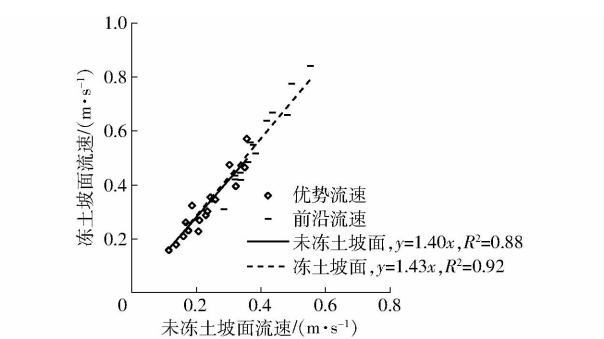


图 12 前沿流速和优势流速在冻土与未冻土坡面关系对比  
Fig. 12 Relationship between peak velocity and leading edge velocity over frozen and non-frozen soil slopes

与未冻土坡面的比值为 1.43 和 1.40,即在试验条件下,冻土比未冻土坡面前沿流速大 40% ~ 43%。出现这种结果的原因有:①冻土坡面较未冻土坡面

平滑,冻土坡面的摩擦力小于未冻土坡面,水流需要克服摩擦阻力消耗的能量比未冻土坡面小。②冲刷过程中,未冻土坡面出现的细沟和跌坎消耗了水流的能量,导致流速减小。因此,冻土坡面流速大于未冻土坡面流速。

3 结论

- (1)不同坡度和流量条件下,冻土坡面前沿流速范围在 0.260 ~ 0.843 m/s 之间,未冻土坡面前沿流速在 0.175 ~ 0.552 m/s 之间,流速随坡度和流量增大而增大。
- (2)前沿流速随坡度和流量增加呈幂函数增大,增幅逐渐减小。随着坡度和流量增大,土壤表面由于水流冲刷形成的跌坎消耗水流能量,导致流速减小。
- (3)不同坡度和流量条件下,冻土坡面流速大于未冻土坡面流速,前沿流速和优势流速在冻土与未冻土坡面的比值为 1.43 和 1.40。冻土坡面较平滑,对水流阻力小,因此冻土坡面流速大于未冻土坡面流速。
- (4)冻土和未冻土坡面优势流速与前沿流速的比值分别为 0.61 和 0.63。
- (5)黄土冻结后,坡面上水流动速显著增大,将导致更为严重的土壤侵蚀。试验所用测量前沿流速的方法减小了测量距离和测量时间上的误差,结果可为研究土壤冻融侵蚀机理提供数据基础。

参 考 文 献

1 BAN Y Y, LEI T W, LIU Z Q, et al. Comparison of rill flow velocity over frozen and thawed slopes with electrolyte tracer method [J]. Journal of Hydrology, 2016,534:630 - 637.

2 JOHNSON H, LUNDIN L. Surface runoff and soil water percolation as affected by snow and soil frost[J]. Journal of Hydrology, 1991,122(1 - 4):141 - 159.

3 HAYHOE H N, PELLETIER R G,MOGGRIDGE S. Analysis of freeze-thaw cycles and rainfall on frozen Canadian location[J]. Canadian Agricultural Engineering, 1992, 34(2):135 - 142.

4 BLACKBURN W H, PIERSON F B J, SCHUMAN G E, et al. Variability in rangeland water erosion processes[C] //Proceedings of a Symposium,SSSA Special Publication,1994:38:67 - 82.

5 VASILYEV A. Modelling wash-off and leaching of pollutants by spring-time flow[J]. Journal of Hydrology, 1994,159(1 - 4):215 - 222.

6 SINGH P,HARITASHYA U K,RAMASASTRI K S. Diurnal variations in discharge and suspended sediment concentration,including runoff-delaying characteristics of the Gangotri Glacier in the Garhwal Himalayas[J]. Hydrological Processes, 2005,19(7):1445 - 1457.

7 董月群,庄晓晖,雷廷武,等. 脉冲边界模型测量冻土坡面径流流速与距离优选[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(2):146 - 152. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150222&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150222&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.022.

DONG Y Q, ZHUANG X H, LEI T W, et al. Optimum measurement distance of water flow velocity over frozen slopes with pulse boundary model method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(2):146 - 152. (in Chinese)

8 BURYLO M, HUDEK C, REY F. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (southern Alps, France)[J]. Catena,2011,84(1 - 2):70 - 78.

9 徐敦祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京:科学出版社,2010.

10 KOK H, MCCOOL D. Quantifying freeze/thaw-induced variability of soil strength [J]. Transactions of the ASAE,1990,33(2):501 - 506.



- 11 SHARRATT B S, LINDSTROM M J. Laboratory simulation of erosion from a partially frozen soil[C]// Soil Erosion Research for the 21st Century, American Society of Agricultural Engineers, 2001:159 – 162.
- 12 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[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 55(4): 487 – 494.
- 13 WILLIAMS R B G, ROBINSON D A. Experimental frost weathering of sandstone by various combinations of salts[J]. Earth Surface and Landform, 2001, 26(8): 811 – 818.
- 14 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.  
LI Z B, LI S X, REN Z P, et al. Effect of freezing-thawing on hillslope erosion process [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(5): 56 – 60. (in Chinese)
- 15 王娇月, 宋长春, 王宪伟, 等. 冻融作用对土壤有机碳库及微生物的影响研究进展[J]. 冰川冻土, 2011, 33(2): 442 – 452.  
WANG J Y, SONG C C, WANG X W, et al. Progress in the study of freeze-thaw process on the organic carbon pool and microorganisms in soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(2): 442 – 452. (in Chinese)
- 16 ZHENG X Q, VAN LIEW M W, FLERCHINGER G N. Experimental study of infiltration into a bean stubble field during seasonal freeze-thaw period[J]. Soil Science, 2001, 166(1): 3 – 10.
- 17 梁建财, 李瑞平, 史海滨, 等. 河套灌区覆盖对盐渍土壤养分迁移与分布的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 113 – 121. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160216&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160216&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.016.  
LIANG J C, LI R P, SHI H B, et al. Effect of mulching on transfer and distribution of salinized soil nutrient in Hetao irrigation District[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 113 – 121. (in Chinese)
- 18 付强, 侯仁杰, 李天霄, 等. 冻融土壤水热迁移与作用机理研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 99 – 110. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20161214&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161214&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.014.  
FU Q, HOU R J, LI T X, et al. Soil moisture-heat transfer and its action mechanism of freezing and thawing soil[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 99 – 110. (in Chinese)
- 19 KURYLYK B L, MACQUARRIE K T B, MCKENIZE J M. Climate change impacts on groundwater and soil temperatures in cold temperatures in cold and temperate regions: implications, mathematical theory, and emerging simulation tools[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 138: 313 – 334.
- 20 IMMERZEEL W W, VAN BEEK L P H, BIERKENS M F P. Climate change will affect the asian water towers[J]. Science, 2010, 328(5984): 1382 – 1385.
- 21 THORSTEINSSON T, JOHANNESSON T, SNORRASON A. Glaciers and ice caps: vulnerable water resources in a warming climate[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5(6): 590 – 598.
- 22 RAHMAA E, LEI T W, SHI X N, et al. Measuring flow velocity under straw mulch using the improved electrolyte tracer method [J]. Journal of Hydrology, 2013, 495: 121 – 125.
- 23 LEI T W, CHUO R Y, ZHAO J, et al. An improved method for shallow water flow velocity measurement with practical electrolyte inputs[J]. Journal of Hydrology, 2010, 390(1 – 2): 45 – 56.
- 24 ZHANG G H, LIU B Y, LIU G B, et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(3): 713 – 719.
- 25 ABRAHAMS A D, PARSONS A J, LUK S H. Field measurement of the velocity of overland flow using dye tracing[J]. Earth Surface Process and Landforms, 1986, 11(6): 653 – 657.
- 26 ZHANG G H, LUO R T, CAO Y, et al. Correction factor to dye-measured flow velocity under varying water and sediment discharges[J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(1 – 2): 205 – 213.
- 27 LEI T W, XIA W S, ZHAO J. Method for measuring velocity of shallow water for soil erosion with electrolyte tracer[J]. Journal of Hydrology, 2005, 301(1 – 4): 139 – 145.
- 28 PLANCHON O, SILVERA N, GIMENEZ R, et al. An automated salting-tracing gauge for flow-velocity measurement[J]. Earth Surface Process Landforms, 2005, 30(7): 833 – 844.
- 29 VENTURA E, NEARING M A, NORTON L D. Developing a magnetic tracer to study soil erosion[J]. Catena, 2001, 43(4): 277 – 291.
- 30 ANGERMANN L, KRAUSE S, LEWANDOWSKI J. Application of heat pulse injections for investigating shallow hyporheic flow in a lowland river[J]. Water Resource Research, 2012, 48(12): W00P02.
- 31 BERMAN E S F, GUPTA M, GARLAND T, et al. High-frequency field-deployable isotope analyzer for hydrological applications [J]. Water Resource Research, 2009, 45(10): W10201.
- 32 GARDNER R P, DUNN III J W, LII J W D. A single-sample radiotracer technique for determining stream flow rates[J]. International Journal of Applied Radiation & Isotopes, 1964, 15(6): 339 – 344.
- 33 TAURO F, AURELI M, PORFIRI M, et al. Characterization of buoyant fluorescent particles for field observations of water flows [J]. Sensors, 2010, 10(12): 11512 – 11529.
- 34 TAURO F, PAGANO C, PORFIRI M, et al. Tracing of shallow water flows through buoyant fluorescent particles[J]. Flow Meas Instrum, 2012, 26(4): 93 – 101.



27 余述琼,张蚌蚌,相慧,等. 基于因素组合的耕地质量等级监测样点布控方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24):288 – 297.  
YU Shuqiong, ZHANG Bangbang, XIANG Hui, et al. Layout method for monitoring sample point of arable land quality level based on combination of factors [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24): 288 – 297. (in Chinese)

28 郭力娜, 张凤荣, 曲衍波, 等. 基于分等因素组合的农用地整理类型分区[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9):308 – 314.  
GUO Li'na, ZHANG Fengrong, QU Yanbo, et al. Farmland consolidation type zoning based on combination of grading factors [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 308 – 314. (in Chinese)

29 肖波, 张建新, 温丽娟, 等. 基于层次分析法的吴江经济开发区土地集约利用潜力评价研究[J]. 世界科技研究与发展, 2009, 31(3):542 – 545.  
XIAO Bo, ZHANG Jianxin, WEN Lijuan, et al. Stydies on the assessment for land use intensification potentiality of economic development zone in Wujiang [J]. WORLDSCI-TECH R&D, 2009, 31(3):542 – 545. (in Chinese)

30 高星, 吴克宁, 陈学砧, 等. 土地整治项目提升耕地质量可实现潜力测算[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16):233 – 240.  
GAO Xing, WU Kening, CHEN Xuezen, et al. Feasible potential of cultivated land quality promoted by land consolidation project [J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(16): 233 – 240. (in Chinese)

31 赵蕾, 谭荣建. 基于农用地分等的土地整理耕地质量评定方法[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(17):4266 – 4270.  
ZHAO Lei, TAN Rongjian. The method of assessing land quality of the implementation of land consolidation project based on agricultural land classification[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(17):4266 – 4270. (in Chinese)

32 马建辉. 耕地质量等别监测成果应用方法研究[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(10):55 – 60.  
MA Jianhui. Methods of monitoring cultivated land quality based on variation function and cultivated land gradation type [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(10):55 – 60. (in Chinese)

33 沈立宏, 张超, 桑玲玲, 等. 利用网格法确定县域农田整治优先度[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18):241 – 247.  
SHEN Lihong, ZHANG Chao, SANG Lingling, et al. Determination of consolidation priority for farmland at county level using grid method[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(18):241 – 247. (in Chinese)

34 王菲. 基于物元分析法的农村土地健康评价[D]. 武汉:华中农业大学, 2012.  
WANG Fei. Evaluation of rural land health based on matter-element model[D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University, 2012. (in Chinese)

(上接第 289 页)

35 SHIT P K,MAITI R. Rill hydraulics—an experimental study on gully basin in lateritic upland of paschimmedinipur, West Bengal, India[J]. Journal of Geography & Geology,2012, 4(4):1 – 11.

36 KIRKBY M J,MORGAN R P C. Soil erosion [M]. Chichester:John Wiley & Sons Ltd. ,1980.

37 李强,刘国彬,许明祥,等. 黄土丘陵区冻融对土壤抗冲性及相关物理性质的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(17):105 – 112.  
LI Q, LIU G B, XU M X, et al. Effect of seasonal freeze-thaw on soil anti-scouribility and its related physical property in hilly loess plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(17):105 – 112. (in Chinese)

38 武红娟. 气候变化对甘肃黄土地区公路边坡侵蚀影响及防治技术研究[D]. 西安:长安大学,2010.  
WU H J. Research on influence and control technique of road slope erosion caused by climate change in loess area in Gansu[D]. Xi'an: Chang'an University,2010. (in Chinese)

39 何东升. 延安地区土壤侵蚀与地质灾害相关性研究[D]. 西安:长安大学,2012.  
HE D S. Study on the relevance of soil erosion and geological disasters in Yan'an region[D]. Xi'an: Chang'an University,2012. (in Chinese)

40 董瑞琨,许兆义,杨成永. 青藏高原冻融侵蚀动力特征研究[J]. 水土保持学报,2000,14(4):12 – 16.  
DONG R K,XU Z Y,YANG C Y. Dynamic and character of freezing-thawing erosion on Qinghai – Tibet Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2000,14(4):12 – 16. (in Chinese)

41 景国臣. 冻融侵蚀的类型及其特征研究[J]. 中国水土保持,2003(10):17 – 18.  
JING G C. Study on types of freeze-thaw erosion and its characteristics[J]. Soil and Water Conservation in China,2003(10):17 – 18. (in Chinese)

42 王家澄,徐学祖,张立新,等. 土类对正冻土成冰及冷生组构影响的实验研究[J]. 冰川冻土,1995,17(1):16 – 22.  
WANG J C, XU X Z, ZHANG L X, et al. Experimental study of influence of soil type on ice formation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995,17(1):16 – 22. (in Chinese)

43 穆彦虎,马巍,李国玉,等. 冻融作用对压实黄土结构影响的微观定量研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(12):1919 – 1925.  
MU Y H, MA W, LI G Y, et al. Quantitative analysis of freeze-thaw cycle upon microstructure of compacted loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2011,33(12):1919 – 1925. (in Chinese)