

黄土丘陵区冻土坡面侵蚀过程特征研究

苏远逸^{1,2,3,4}, 陈田庆^{1,2,3}, 张盼盼^{1,2,3}, 熊宇斐^{1,2,3}, 李鹏⁴

(1.陕西省土地工程建设集团 自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 西安 710075;

2.陕西省土地工程建设集团 陕西省土地整治工程技术研究中心, 西安 710075;

3.陕西省土地工程建设集团 自然资源部土地工程技术创新中心, 西安 710075; 4.西安理工大学, 西安 710048)

摘要:为了探究黄土丘陵区未冻坡面和冻土坡面在不同径流坡长条件下侵蚀之间的差异,在室内进行模拟冷冻和放水冲刷试验,采用 3 种径流坡长(2 m, 4 m 和 6 m)和 2 种坡面类型(未冻坡面和冻土坡面),定量研究了未冻坡面和冻土坡面的产流产沙过程和水沙关系。结果表明:(1) 未冻坡面和冻土坡面的初始产流时间均随着径流坡长的延长而缩短,在相同径流坡长条件下,冻土坡面的初始产流时间较未冻坡面减少;(2) 未冻坡面的平均产流量与平均产沙量和冻土坡面的平均产沙量均随着径流坡长的延长而增大,而冻土坡面的平均产流量随着径流坡长的变化无显著差异;(3) 未冻坡面产流率和产沙率的关系分为缓慢和急速增加两个阶段,而冻土坡面的产沙率则随着产流率的增大而增大;(4) 累积产流量与累积产沙量之间呈正相关关系,参数 c 的绝对值与径流坡长呈正比,并且冻土坡面大于未冻坡面。土壤冻结后使初始产流时间大大缩短,径流量的增加伴随着冻结土壤的不断融化导致冻土坡面侵蚀加剧。

关键词:黄土丘陵区; 冻土坡面; 侵蚀过程; 水沙关系

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0001-07

Study on Erosion Process Characteristics of Frozen Soil Slope in Loess Hilly Region

SU Yuanyi^{1,2,3,4}, CHEN Tianqing^{1,2,3}, ZHANG Panpan^{1,2,3}, XIONG Yufei^{1,2,3}, LI Peng⁴

(1.Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Natural Resources, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Xi'an 710075, China; 2.Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Xi'an 710075, China; 3.Land Engineering Technology Innovation Center, Ministry of Natural Resources, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Xi'an 710075, China; 4.Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to explore the differences in erosion between unfrozen slope and frozen slope under different runoff slope lengths in the Loess Hilly Region, simulated freezing and water discharge scouring tests were carried out indoors. Three runoff slope lengths (2 m, 4 m and 6 m) and two slope types (unfrozen slope and frozen slope) were used to quantitatively study the runoff and sediment yield process and water sediment relationship between unfrozen slope and frozen slope. The results show that: (1) The initial flow production time of both unfrozen slopes and permafrost slopes decreases with the extension of runoff slope length, and the initial flow production time of permafrost slopes decreases compared with unfrozen slopes under the same runoff slope length; (2) The average flow production, the average sand production on unfrozen slopes and the average sand production on frozen slopes both increase with the extension of runoff slope length, while the average flow production on frozen slopes does not differ significantly with the change of runoff slope length. (3) The relationship between flow production rate and sand production rate on unfrozen slopes is divided into two stages: slow and rapid increase, while sand production rate on frozen soil slopes increases with the increase of flow production rate. (4) There is a positive correlation between cumulative flow production and cumulative sand production, and the absolute value of parameter c is proportional to the runoff slope

收稿日期:2022-01-02

修回日期:2022-01-11

资助项目:陕西省自然科学基金研究计划“黄土丘陵区治沟造地新造土体水热传输规律研究”(2021JQ-961)

第一作者:苏远逸(1993—),男,陕西宝鸡人,博士,工程师,主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail:suyuanyi666@163.com

通信作者:李鹏(1974—),男,山东烟台人,博士,教授,主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail:lipeng74@163.com

length, and is greater on the frozen slope than on the unfrozen slope. The freezing of soil shortens the initial flow production time significantly, and the increase in runoff volume is accompanied by the continuous melting of frozen soil leading to increased erosion on the frozen slope.

Keywords: Loess Hilly Region; frozen soil slope; erosion process; water sediment relationship

冻融侵蚀是指土壤及其母质孔隙中的水分在冻结时体积膨胀,孔隙增大导致土体稳定性降低,消融后在重力的作用下土体沿坡向下发生位移的现象^[1-4]。冻融作用和土壤侵蚀往往是同时或者交替发生,在侵蚀过程中,土壤中剖面的水分分布和泥沙运移改变了冻融作用的程度^[5]。季节性冻融地区的冻融侵蚀一般为轻度或者中度^[6]。但是在解冻期土壤的可蚀性比其他季节的 2~3 倍,因此即使降雨强度很小也可能发生严重的土壤侵蚀。冻融作用使土壤理化性质发生改变,导致入渗减缓^[7],加剧土壤侵蚀。因此,冻融作用下的土壤侵蚀普遍较为强烈。Zuzel 等^[8]认为融雪径流和冻融作用是春季解冻期发生土壤侵蚀的主要原因。融雪水侵蚀是当温度升高,雪水融化,表层冻土开始解冻,而深层有冻土存在导致融雪水无法下渗,融雪水与表层解冻的土壤呈泥浆状沿地面流动发生的侵蚀现象。Demidov 等^[9]研究表明,在部分季节性冻融侵蚀区,春季解冻期的融雪水侵蚀占全年水土流失量的 70% 以上。冻融作用不能直接带走所有泥沙,但可以为其他侵蚀类型提供充足的侵蚀来源。Barnes 等^[10]通过在野外长期监测冻融作用对侵蚀的影响,定量分析了不同流量、坡度和含水量条件下冻融前后土壤的侵蚀特性,发现冻融作用会显著增加沟壑尤其是侧壁的侵蚀量。

温度和降水是发生冻融侵蚀的两个基本气候条件^[11]。第一是发生冻融侵蚀的地区要满足有充足的气温低于 0℃ 和气温高于 0℃,能使水分完全凝结成冰后充分消融。第二是在适当的时期尤其是秋后期具有一定的降水量,水分足够下渗到必要的深度作为冻融作用的驱动主体。我国黄土高原风蚀水蚀交错带符合这两种条件,该地区地处温带中纬度,属于温带大陆性季风气候,气温低于 0℃ 的天数在 100 d 以上,并且多年平均降雨量为 300~600 mm/a,非汛期的降雨量占 30% 左右^[12-14]。在冬春季交替时,尤其是春季解冻期温度升高后,不完全解冻的土体中存在不透水层,土壤入渗率大大降低,融雪径流和春季降雨可产生更多的径流。并且在土壤反复的冻融作用下,土壤理化性质等发生改变,土壤的稳定性降低,使春季解冻期坡面和沟道发生的侵蚀更加剧烈。由此看来,在解冻期尽管降水量不大,但是土壤侵蚀问题依旧严重^[15]。

在我国,对冻融条件下土壤侵蚀过程的研究主要是通过室内模拟试验完成的,孙宝洋等^[16]通过室内冲刷试验,研究指出冻融作用对土壤的剥离能力有显著影响,土壤剥离是土壤侵蚀的初始阶段,也是受冻融作用影响最大的阶段。然而我国对于冻融侵蚀的研究区域主要集中在东北黑土区和青藏高原地区等季节性冻融地区^[17-19],而对于我国黄土丘陵区的研究较少。因此,为了探究黄土丘陵区未冻坡面和冻土坡面的侵蚀差异,本研究以黄土作为主要研究对象,对比定量分析了未冻坡面和冻土坡面在不同径流坡长条件下产流产沙过程和水沙关系,以期完善黄土丘陵区的土壤侵蚀机理提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用土选取陕西省榆林市绥德县王茂沟小流域(东经 110°20′26″—110°22′46″,北纬 37°34′13″—37°36′03″)的黄绵土,将试验用土运回实验室后去除草根、砾石等杂质后过 10 mm 的土样筛进行预处理。经 Mastersizer 2000 测得土壤的颗粒组成为黏粒(<0.002 mm)0.17%、粉粒(0.002~0.05 mm)61.22%和砂粒(>0.05 mm)38.31%,经测定黄土的干密度约为(1.25±0.10) g/cm³,有机质含量为(2.0±0.10) g/kg。

1.2 试验装置

本次试验在西安理工大学雨洪侵蚀大厅内进行。试验装置主要由冲刷装置和冻土装置 2 部分组成。冲刷装置由径流收集装置、土槽、水槽、稳流槽、水箱和阀门等组成(图 1)。土槽(长 2 m,深 0.2 m,宽 0.2 m)为木质土槽,设置为 12° 的斜坡。在土槽顶部连接一个宽 0.2 m,深 0.05 m 的变坡长水槽,坡长分别为 2, 4, 6 m。稳流槽采用带孔的有机玻璃板分为两部分,稳流槽中的水来自装有流量控制器的水箱,水箱设有排水孔,以保持水压稳定。冻土装置采用西安理工大学的冻融试验系统,该试验系统采用六面体拼装结构,其内部长 4.5 m、宽 2.5 m、高 2.5 m,可调温度范围在-40~-30℃,精度为±1℃,温度均匀度≤±2.0℃,同时具备制冷和加热功能,满足试验需求。

1.3 试验方法

本试验模拟春季解冻期融雪径流侵蚀,由于春季气温回升,冰雪融化,并且雪融化的时间要早于土体,

因此在土槽上方设置不同长度的径流坡面,用来模拟上方融雪形成的径流对方还未解冻的土体造成的侵蚀状况。在本试验中设计的放水强度为 1 L/min,试验时的水温和室温均在 15℃左右^[20]。根据野外现场调研结果和已有研究成果,目前黄土高原 50%以上坡耕地的坡度在 10°~15°,因此该试验的坡度设计

为 12°。将野外采回的土样称重并烘干,根据计算结果设定土壤前期含水量为 15%,土壤干容重为 1.25 g/cm³。试验选用土壤处理(未冻坡面和冻土坡面)和径流坡长(2,4,6 m)2 个影响因子进行组合试验,每组试验重复 3 次,共 18 场试验,试验结果采用 3 次试验结果的平均值,具体冲刷试验设计见表 1。

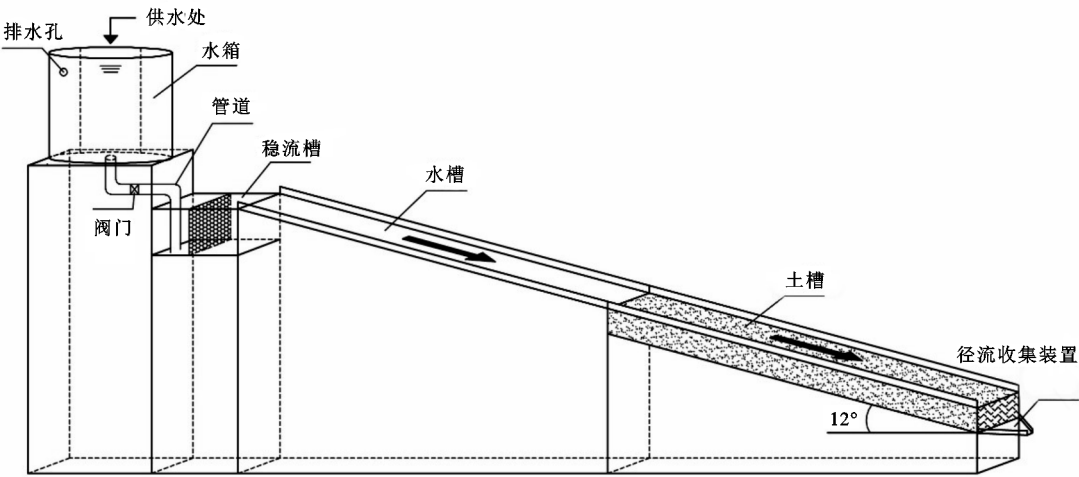


图 1 冲刷试验装置

表 1 冲刷试验设计

土壤处理	径流坡长/m	试验编号	流量/(L·min ⁻¹)	产流历时/min	坡度/(°)	初始土壤含水量/%	土壤容重/(g·cm ⁻³)
未冻坡面	2	U ₂	1	15	12	15.78	1.27
	4	U ₄	1	15	12	16.61	1.21
	6	U ₆	1	15	12	15.65	1.22
冻土坡面	2	F ₂	1	15	12	16.19	1.22
	4	F ₄	1	15	12	16.61	1.21
	6	F ₆	1	15	12	16.26	1.22

将试验用土运回实验室后进行装填,共分为以下几个步骤:(1) 土壤风干并过筛(10 mm×10 mm),除去植物根、小石块等杂质;(2) 取适量土样测量其含水率,用喷壶洒水混合均匀使含水量达到 15%左右,并用塑料膜覆盖防止水分蒸发;(3) 根据测定野外黄土的干容重(1.25 g/cm³)计算得出需要的用土量,将配置好的黄土每 5 cm 装入土槽中,一共 4 层,每层黄土装填压实后在表面进行浅锄,保证土壤紧密结合;(4) 将填好土的土槽表面覆上塑料薄膜,防止土槽中土壤的含水量发生改变;(5) 将需要冷冻的土槽放入冻土装置,温度设定为-20℃,待土槽连续冻结 24 h 土体完全冻结后取出进行试验。在试验过程中,由于室温比冻土温度高,并且水温也不易控制,因此冲刷试验的过程也是冻土解冻的一个过程。

试验开始前先率定冲刷流量,在率定值连续 3 次与设计流量之间的误差小于 5%时进行冲刷试验。水流进入土槽后到径流收集装置出现径流的时间为

初始产流时间,径流收集装置出现径流开始后记录产流时间,产流持续 15 min 后关水。试验过程中用统一规格带有刻度的塑料桶收集每分钟的浑水样,试验结束后统一记录浑水体积,采用烘干法测得每分钟的产沙量,并计算出泥沙体积,最后用浑水体积减去泥沙体积后得到每分钟的径流量。

1.4 数据处理与分析

试验数据使用 Excel 2019 进行统计,采用 SPSS (IBM SPSS Statistics Version 21)进行数据的描述性统计、方差分析(ANOVA,显著水平为 $p<0.05$)、回归与相关分析、曲线拟合等,用 Origin 8.5(Origin-Lab, USA)绘图,用 Photoshop CS4 绘制了冲刷试验装置示意图。

2 结果与分析

2.1 未冻坡面与冻土坡面侵蚀特征值

表 2 为不同径流坡长条件下未冻坡面与冻土坡

面侵蚀特征值的统计表,表中的侵蚀特征值主要包括初始产流时间、产流量峰值、产流量峰值出现时间、产沙量峰值和产沙量峰值出现时间。由表2可以看出,不同径流坡长条件下未冻坡面的初始产流时间分别是0.66 min(U_2),0.62 min(U_4)和0.53 min(U_6),冻土坡面的初始产流时间分别是0.41 min(F_2),0.36 min(F_4)和0.27 min(F_6),未冻坡面和冻土坡面的初始产流时间均随着径流坡长的延长而缩短,相比于径流坡长2 m的初始产流时间分别缩短了6.06%~19.70%(未冻坡面)和12.20%~34.15%(冻土坡面)。在相同的坡面类型下,初始产流时间均随着径流坡长的增大逐渐减小。冻土坡面的初始产流时间与未冻坡面相比均有不同程度的减小,在相同径流坡长条件下,冻土坡面的初始产流时间分别是未冻坡面的62.12%(F_2/U_2),58.06%(F_4/U_4)和50.94%(F_6/U_6)。

不同径流坡长条件下未冻坡面的产流量峰值分别为774.5 ml(U_2),759.7 ml(U_4)和734.9 ml(U_6),冻土坡面的产流量峰值分别是960.12 ml(F_2),980.28 ml(F_4)和967.53 ml(F_6),未冻坡面的产流量峰值随着径流坡长的增大而减小。在相同径流坡长条件下,冻土坡面的产流量峰值均远远大于未冻坡面。不同径流坡长条件下未冻坡面和冻土坡面产流量峰值出现的时间均集中在产流后10~15 min。

不同径流坡长条件下未冻坡面的产沙量峰值为99.86 g(U_2),109.33 g(U_4)和199.09 g(U_6),冻土坡面的产沙量峰值分别是539.95 g(F_2),568.89 g(F_4)和593.3 g(F_6)。未冻坡面和冻土坡面的产沙量峰值均随着径流坡长的增大而增大,未冻坡面 U_4 和 U_6 的产沙量峰值分别是 U_2 的1.09倍和1.99倍,冻土坡面 F_4 和 F_6 的产沙量峰值分别是 F_2 的1.05倍和1.1倍。在相同径流坡长条件下,冻土坡面的产沙量峰值分别是未冻坡面的5.41倍(F_2/U_2),5.18倍(F_4/U_4)和2.98倍(F_6/U_6)。不同径流坡长条件下,未冻坡面产沙量峰值出现时间在产流后的9~15 min,而冻土坡面产流量峰值出现时间在产流后的4~9 min。

表2 未冻坡面与冻土坡面侵蚀特征值

试验编号	IRT/min	Q_{\max} /ml	T_1 /min	M_{\max} /g	T_2 /min
U_2	0.66	774.50	14	99.86	15
U_4	0.62	759.70	15	109.33	9
U_6	0.53	734.90	10	199.09	14
F_2	0.41	960.12	12	539.95	9
F_4	0.36	980.28	13	568.89	4
F_6	0.27	967.53	14	593.30	6

注:IRT为初始产流时间(min); Q_{\max} 为产流量峰值(ml); T_1 为产流量峰值出现时间(min); M_{\max} 为产沙量峰值(g); T_2 为产沙量峰值出现时间(min)。

2.2 未冻坡面与冻土坡面侵蚀过程

2.2.1 产流过程 图2为不同径流坡长条件下未冻坡面和冻土坡面产流率随产流时间的变化过程。由图2A可以看出,对于未冻坡面而言,不同径流坡长条件下产流率随产流时间的变化过程大致可以分为两个阶段,分别是0~6 min的迅速增加阶段和6~15 min的相对稳定阶段。未冻坡面的产流率变化范围分别在245.23~774.5 ml/min(U_2),357.44~759.7 ml/min(U_4)和376.13~734.9 ml/min(U_6),产流率的变异系数(CV)分别是22.14%(U_2),16.13%(U_4)和13.41%(U_6)。经过ANOVA方差分析,不同径流坡长条件下未冻坡面的产流率随产流时间的变化无显著差异($p>0.05$)。由图2B可以看出,冻土坡面产流率随产流历时的变化与未冻坡面产流率的变化规律不同,冻土坡面的产流率随产流历时的变化相对稳定,波动范围分别在871.5~960.12 ml/min(F_2),795.32~980.28 ml/min(F_4)和760.76~967.53 ml/min(F_6),产流率的CV分别是2.48%(F_2),4.57%(F_4)和5.41%(F_6)。经过ANOVA方差分析,不同径流坡长条件下冻土坡面的产流率随产流时间的变化无显著差异($p>0.05$)。在相同径流坡长条件下,未冻坡面和冻土坡面产流率随产流时间的变化差异性显著($p<0.05$)。并且与未冻坡面相比,冻土坡面的产流率较大,但是波动范围较小。

不同径流坡长条件下未冻坡面的平均产流量为642.93 ml(U_2),660.09 ml(U_4)和670.97 ml(U_6),冻土坡面的平均产流量分别是921.5 ml(F_2),930 ml(F_4)和915.58 ml(F_6)。未冻坡面 U_4 和 U_6 的平均产流量分别是 U_2 的1.03倍和1.04倍,冻土坡面 F_4 和 F_6 的平均产流量分别是 F_2 的1.01倍和0.99倍。在相同径流坡长条件下,冻土坡面的平均产流量分别是未冻坡面的1.43倍(F_2/U_2),1.41倍(F_4/U_4)和1.36倍(F_6/U_6)。

2.2.2 产沙过程 图3为不同径流坡长条件下未冻坡面和冻土坡面产沙率随产流时间的变化过程。由图3A可以看出,对于未冻坡面而言,不同径流坡长条件下产沙率随产流时间的变化波动范围较大,分别为39.12~99.86 g/min(U_2),43.49~109.33 g/min(U_4)和62.99~199.09 g/min(U_6),产沙率的变异系数(CV)分别是27.8%(U_2),21.74%(U_4)和32%(U_6)。经过ANOVA方差分析,不同径流坡长条件下未冻坡面的产沙率随产流时间的变化差异性显著($p<0.05$)。由图3B可以看出,冻土坡面产沙率随产流历时的变化呈先上升后缓慢下降并保持相对稳

定的趋势,冻土坡面产沙率随产流历时的变化波动范围分别在 470.07~539.95 g/min(F_2), 440.68~568.89 g/min(F_4)和449.02~593.3 g/min(F_6)之间,产沙率的CV分别是 3.33%(F_2), 5.61%(F_4)和 5.91%(F_6)。经

过 ANOVA 方差分析,不同径流坡长条件下冻土坡面的产沙率随产流时间的变化无显著差异($p>0.05$)。在相同径流坡长条件下,未冻坡面和冻土坡面产沙率随产流时间的变化差异性显著($p<0.05$)。

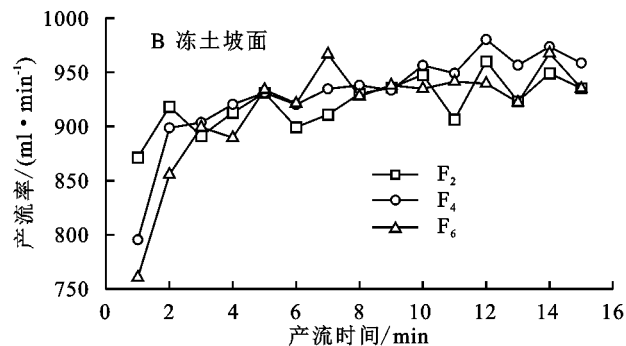
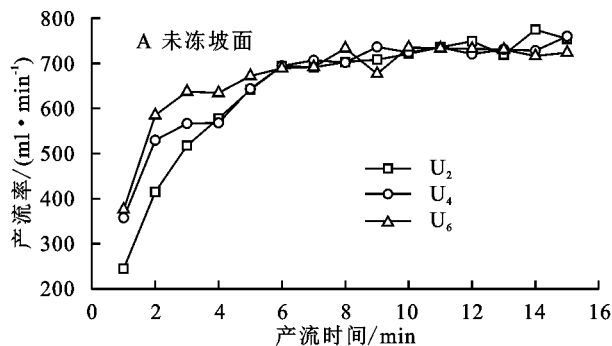


图2 未冻坡面和冻土坡面的产流过程

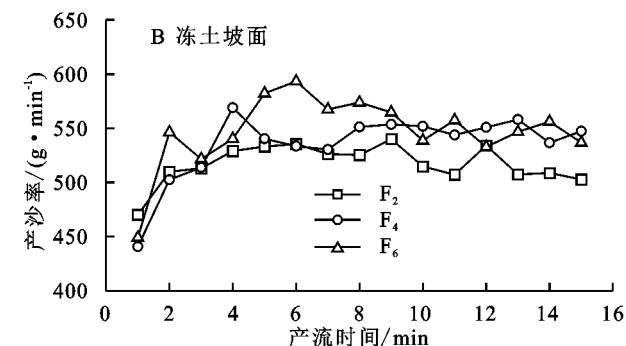
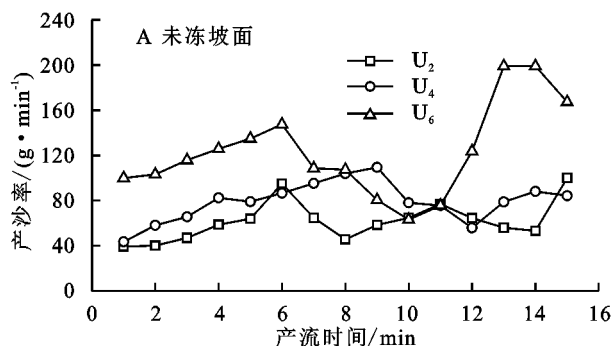


图3 未冻坡面和冻土坡面的产沙过程

不同径流坡长条件下未冻坡面的平均产沙量为 61.74 g(U_2), 78.88 g(U_4)和 123.36 g(U_6),冻土坡面的平均产沙量分别是 517.11 g(F_2), 534.85 g(F_4)和 547.14 g(F_6)。未冻坡面和冻土坡面的平均产沙量均随着径流坡长的增大而增大,未冻坡面 U_4 和 U_6 的平均产沙量分别是 U_2 的 1.28 倍和 2 倍,冻土坡面 F_4 和 F_6 的平均产沙量分别是 F_2 的 1.03 倍和 1.06 倍。在相同径流坡长条件下,冻土坡面的平均产沙量分别是未冻坡面的 8.38 倍(F_2/U_2), 6.78 倍(F_4/U_4)和 4.44 倍(F_6/U_6)。

2.3 未冻坡面与冻土坡面的水沙关系

2.3.1 产流率和产沙率关系 由图 4A 可以看出,在本研究中未冻坡面产流率和产沙率的关系分为两个阶段:缓慢增加阶段和急速增加阶段。在缓慢增加阶段,产沙率随着产流率的增加而缓慢增加,当产流率超过 650 ml/min 后,产沙率将急速增大,两个阶段交汇的地方即是未冻坡面水沙关系发生变化的突变点。由图 4B 可以看出,不同坡长条件下冻土坡面的产流率和产沙率与未冻坡面变化趋势不同,产沙率均随着产流率的增大而增大,冻土坡面的产流率和产沙率呈正相关关系。

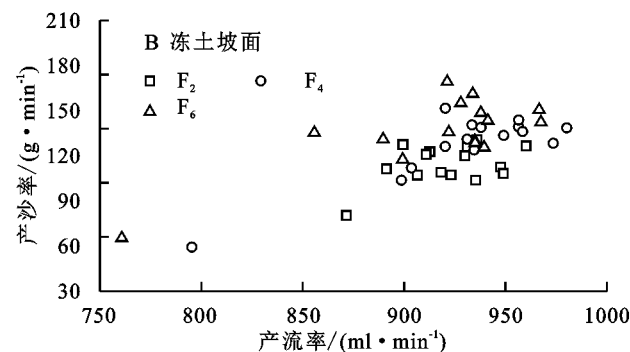
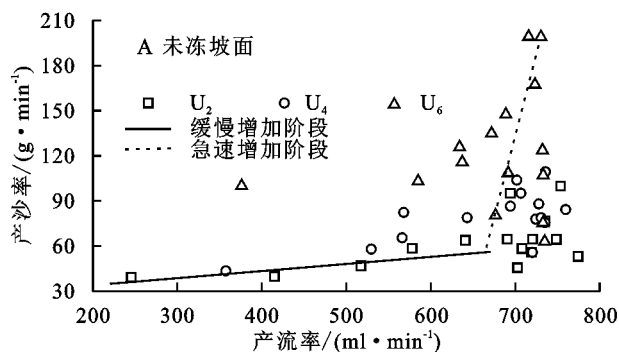


图4 不同坡面产流率和产沙率关系

2.3.2 累积产流量与累积产沙量关系 坡面累积径流量与累积产沙量之间的相互关系可以定量地反映

坡面侵蚀过程中产流与产沙之间的动态变化规律。根据试验数据分析可知,将本研究中两者数据进行函

数拟合,发现不同径流坡长条件下未冻坡面和冻土坡面的累积产流量与累积产沙量之间均呈极显著线性相关关系($p<0.01$),函数关系式如下:

$$M'=cQ'+d \tag{1}$$

式中: M' 为累积产沙量(kg); Q' 为累积产流量(L); c 和 d 为常数。

将拟合结果整理到表中,可以看出不同径流坡长条件下未冻坡面和冻土坡面的累积产流量与累积产沙量拟合函数的相关系数均在 98%以上。由表 3 可以看出,参数 $c>0$,表示坡面累积产沙量均随着累积产流量的增长而增长。结合函数关系以及产流产沙的物理意义,定义参数 c 为产沙能力系数,参数 c 的大小与径流坡长呈正相关关系,即坡面产沙能力随着径流坡长的增大而增大,并且冻土坡面的参数 c 均大于未冻坡面。

表 3 累积产流量与累积产沙量的相关关系

坡面 类型	试验 编号	拟合方程	相关系数 R^2
未冻坡面	U_2	$M'=0.09Q'+0.03$	0.9974
	U_4	$M'=0.12Q'+0.01$	0.9965
	U_6	$M'=0.17Q'+0.06$	0.9879
冻土坡面	F_2	$M'=0.57Q'+0.01$	0.9999
	F_4	$M'=0.58Q'+0.02$	0.9999
	F_6	$M'=0.60Q'+0.03$	0.9999

3 讨论

近年来全球极端天气频发,全球变暖已经是一个不争的事实。气候的极端变化导致季节性冻土地区过早融化,从而改变了坡面的水力侵蚀特征。土壤经过冻结,冻土坡面的初始产流时间相比于未冻坡面大大缩短(表 2),本试验的研究结果与 Wang^[21]和张辉^[22]等的研究成果相似。这是由于土壤在冻结过程中,坡面表层土壤中的水分和土壤孔隙中的水凝结形成“冰帽”,阻碍径流入渗,导致坡面径流快速汇集导致初始产流时间大大减小。

在试验期间,冻土坡面的产流率显著高于未冻坡面,也是同样的原因造成的。在试验的初始阶段,坡面仍处于冻结状态,且入渗率较小,随着试验的继续,坡面表层土壤温度逐渐升高,距离表层一定深度内的冻土逐渐融化,坡面产流率逐渐增大。在试验过程中,冻土坡面的产沙率也显著高于未冻坡面,并且冻土坡面的产沙率波动范围较大。由于表层冻土的存在降低了坡面的入渗率,地表径流增大,导致径流侵

蚀力增强。与此同时径流的增加又反作用于冻结的土壤,加快了土壤的融化,使坡面的侵蚀颗粒持续释放。径流的增加和冻土坡面的融化相互作用,导致冻土坡面的侵蚀加剧。

土壤侵蚀预测模型(WEPP)的基本理论描述了两种类型的土壤侵蚀^[23]:细沟间侵蚀和细沟侵蚀。细沟间侵蚀是指坡面水力侵蚀的初始阶段,土壤颗粒通过薄层流在土壤表面的分离和运移。细沟侵蚀是细沟形成后,径流向细沟头、沟壁和沟底土壤的侵蚀和输送过程。在本研究中,未冻坡面产流率和产沙率分为缓慢增加和急速增加两个阶段,冻土坡面的产沙率则随着产流率的增大逐渐增大,这与细沟的发育和侵蚀模式的改变有关。未冻坡面在产流率较小时,坡面形成不连续的跌坎,此时的侵蚀类型属于细沟间侵蚀,产沙率较小。随着试验的继续,跌坎逐渐连贯形成了细沟,侵蚀进一步加剧最终演化成细沟侵蚀,侵蚀产沙量迅速增加。对于冻土坡面而言,径流在冻土坡面迅速下切形成细沟,侵蚀类型在绝大部分时间属于细沟侵蚀。并且伴随着细沟的持续发育,主要表现为溯源侵蚀和侧壁坍塌,导致冻土坡面的侵蚀进一步加剧。

4 结论

(1) 在相同径流坡长条件下,冻土坡面的初始产流时间分别是未冻坡面的 62.12%(F_2/U_2),58.06%(F_4/U_4)和 50.94%(F_6/U_6)。未冻坡面和冻土坡面产流量峰值出现的时间均集中在产流后 10~15 min,未冻坡面产沙量峰值出现时间在产流后的 9~15 min,而冻土坡面产沙量峰值出现时间在产流后的 4~9 min。

(2) 未冻坡面产流率随产流时间的变化过程分为迅速增加和相对稳定两个阶段,而冻土坡面的产流率随产流历时的变化相对稳定。在相同径流坡长条件下,冻土坡面的平均产流量分别是未冻坡面的 1.43 倍(F_2/U_2),1.41 倍(F_4/U_4)和 1.36 倍(F_6/U_6)。

(3) 不同径流坡长条件下未冻坡面的产沙率随产流时间的变化差异性显著($p<0.05$),而冻土坡面的产沙率随产流时间的变化无显著差异($p>0.05$)。在相同径流坡长条件下,冻土坡面的产沙率显著高于未冻坡面($p<0.05$)。冻土坡面的平均产沙量分别是未冻坡面的 8.38 倍(F_2/U_2),6.78 倍(F_4/U_4)和 4.44 倍(F_6/U_6)。

(4) 未冻坡面产流率和产沙率分为缓慢增加和

急速增加两个阶段,而冻土坡面的产沙率则随着产流率的增大逐渐增大。未冻坡面和冻土坡面的累积产流量与累积产沙量之间呈极显著线性相关关系,参数 c 可以作为坡面侵蚀的指示指标。

参考文献:

- [1] 景国臣.冻融侵蚀的类型及其特征研究[J].中国水土保持,2003,24(10):21-22.
- [2] 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.
- [3] 魏霞,丁永建,李勋贵.冻融侵蚀研究的回顾与展望[J].水土保持研究,2012,19(2):271-275.
- [4] 张科利,刘宏远.东北黑土区冻融侵蚀研究进展与展望[J].中国水土保持科学,2018,16(1):17-24.
- [5] Kværnø S H, Øygarden L. The influence of freeze-thaw cycles and soil moisture on aggregate stability of three soils in Norway[J]. Catena, 2006,67(3):175-182.
- [6] Chow T L, Rees H W, Monteith J. Seasonal distribution of runoff and soil loss under four tillage treatments in the upper St. John River valley New Brunswick, Canada [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2000,80(4):649-660.
- [7] Su Y Y, Li P, Ren Z P, et al. Freeze-thaw effects on erosion process in loess slope under simulated rainfall[J]. Journal of Arid Land, 2020,12(6):937-949.
- [8] Zuzel J F, Pikul J L. Effects of straw mulch on runoff and erosion from small agricultural plots in northeastern oregon[J]. Soil Science.1993,156(2),111-117.
- [9] Demidov V V, Ostroumov V Y, Nikitishena I A, et al. Seasonal freezing and soil erosion during snowmelt[J]. Eurasian Soil Science, 1995,28(10):78-87.
- [10] Barnes N, Luffman I, Nandi A. Gully erosion and freeze-thaw processes in clay-rich soils, northeast tennessee, USA [J]. GeoResJ, 2016,9:67-76.
- [11] Li G Y, Fan H M. Effect of freeze-thaw on water stability of aggregates in a black soil of northeast China[J]. Pedosphere, 2014,24(2):285-290.
- [12] 王随继.黄河中游冻融侵蚀的表现方式及其产沙能力评估[J].水土保持通报,2004,24(6):1-5.
- [13] Chang E H, Li P, Li Z B, et al. Using water isotopes to analyze water uptake during vegetation succession on abandoned cropland on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2019,181:104095.
- [14] Su Y Y, Li P, Ren Z P, et al. Slope erosion and hydraulics during thawing of the sand-covered Loess Plateau [J]. Water,2020,12(9):2461.
- [15] 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.
- [16] 孙宝洋,吴志广,李占斌,等.冻融对土壤分离能力及侵蚀阻力的影响[J].农业工程学报,2020,36(11):57-65.
- [17] 王恩姮,赵雨森,陈祥伟.季节性冻融对典型黑土区土壤团聚体特征的影响[J].应用生态学报,2010,21(4):889-894.
- [18] 赵显波,刘铁军,许士国,等.季节冻土区黑土耕层土壤冻融过程及水分变化[J].冰川冻土,2015,37(1):233-240.
- [19] 赵云朵,胡霞.基于CT研究冻融对高寒草甸土壤孔隙结构的影响[J].水土保持学报,2020,34(3):362-367.
- [20] Wang T, Li P, Liu Y, et al. Experimental investigation of freeze-thaw meltwater compound erosion and runoff energy consumption on loessal slopes[J]. Catena, 2020,185:104310.
- [21] Wang T, Li P, Ren Z P, et al. Effects of freeze-thaw on soil erosion processes and sediment selectivity under simulated rainfall[J]. Journal of Arid Land, 2017,9(2):234-243.
- [22] 张辉,李鹏,鲁克新,等.冻融作用对坡面侵蚀及泥沙颗粒分选的影响[J].土壤学报,2017,54(4):836-843.
- [23] 张洋,张辉,李占斌,等.不同降雨强度下黄土区冻土坡面产流产沙过程及水沙关系[J].农业工程学报,2018,34(11):136-142.