

# 初始解冻深度对黄绵土坡面产流产沙的影响

袁瀛<sup>1</sup>, 张辉<sup>2</sup>

(1. 陕西省水土保持勘测规划研究所, 西安 710004;

2. 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:**春季解冻期土壤侵蚀受初始解冻深度影响较大,通过室内模拟降雨试验研究了降雨强度和初始解冻深度对解冻期黄绵土坡面降雨侵蚀的影响。试验处理包括 3 个降雨强度(0.6,0.9,1.2 mm/min)和 4 个初始解冻深度(0,2,4,6 cm)。结果表明:在不同的初始解冻深度下,雨强由 0.6 mm/min 增加到 1.2 mm/min 时,坡面产流量增加了 2.79~3.63 倍;相同降雨条件下,坡面产流量随着初始解冻深度的增加大致呈逐渐增加趋势;相同初始解冻深度下,雨强由 0.6 mm/min 增加到 1.2 mm/min 时,坡面产沙量增加了 0.78~4.22 倍;随着初始解冻深度的增加,不同降雨强度下的坡面产沙量变化规律较为复杂,但是当雨强和初始解冻深度均增加时,坡面产沙量增加,这表明降雨强度、初始解冻深度对坡面产沙量的影响存在交互作用。经分析后发现,坡面产流量主要受降雨强度的影响,而坡面产沙量主要受降雨强度、降雨强度—解冻深度交互作用的影响。根据试验数据,分别建立了坡面产流量与降雨强度的经验关系式以及坡面侵蚀量与降雨强度、降雨强度—解冻深度交互作用的经验关系式。该研究成果期望为完善土壤侵蚀机理研究提供一定的参考依据。

**关键词:**土壤侵蚀; 初始解冻深度; 降雨强度; 黄绵土

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)02-0066-06

## Effect of Initial Thawing Depth on Runoff and Sediment Yield on Loessial Soil Slope

YUAN Ying<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>2</sup>

(1. Surveying and Planning Institute of Soil and Water Conservation of Shaanxi Province, Xi'an 710004, China;

2. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The initial thaw depth has the great impact on the soil erosion in spring thaw period. A rainfall simulation study was conducted to examine the effects of rainfall intensity and initial thaw depth on loessial soil erosion in the spring thaw period. The experimental treatments included three rainfall intensities (0.6, 0.9, 1.2 mm/min), four initial thaw depths (0, 2, 4, 6 cm). The results showed that runoff increased by 2.79~3.63 times when rainfall intensity increased from 0.6 mm/min to 1.2 mm/min under different initial thaw depths. The runoff was roughly increasing, with the increasing of the initial thaw depth. Soil loss increased by 4.2 times when rainfall intensity increased from 0.6 mm/min to 1.2 mm/min under different initial thaw depths; the effects of initial thaw depth on soil erosion were complex, but when the initial thaw depth and rainfall intensity increased simultaneously, soil loss increased, which suggested that the rainfall intensity and initial thaw depth had the coupling effects on the erosion of the slope. Runoff had the strongest correlation with rainfall intensity. Soil loss had the strongest correlation with rainfall intensity, followed by coupling effects of rainfall intensity-initial thaw depth. According to these observed date, the empirical equations for predicting runoff and soil loss were also established. These findings may provide the supplement for understanding the erosion mechanisms.

**Keywords:** soil erosion; initial thaw depth; rainfall intensity; loessial soil

冻融是指土层由于温度降到零度以下和升至零度以上而产生冻结和融化的一种物理地质作用和现象<sup>[1]</sup>。这种由于温度变化所引起土体、岩石反复融化与冻结而导致土体或岩体的破坏、扰动、变形甚至移动的现象定义为冻融侵蚀<sup>[2]</sup>。季节性冻融是指土壤在冬季冻结而在夏季消融。中国的黄土丘陵区地处温带内陆,年0℃以下天数约为105~125 d,约占全年总天数的1/3,多年平均年降水量450~550 mm,满足季节性冻融作用发生的气候条件<sup>[3]</sup>。

已有研究表明,冻融过程能有效地改变土壤结构,导致土体稳定性、抗剪强度等物理性质发生改变,造成土壤的抗蚀性降低,从而增大了土壤侵蚀发生的几率<sup>[4]</sup>。Klaveren等<sup>[5]</sup>研究发现,在水分一定的条件下,相对于未冻土,通过一次冻融循环后的土壤可蚀性较高。Frame等<sup>[6]</sup>通过室内试验发现,冻融循环后的侵蚀产沙量相对增加了25%。李强等<sup>[7]</sup>通过测定和分析冻融前后土壤物理性质及其抗冲性发现,与冻融前相比,裸地对照(CK)和低密度草地(LD)处理下总产沙量相对增加了19.4%和6.7%,但在高密度草地(HD)处理下影响不大。同时,CK,LD和HD条件下的土壤的崩解速率分别提高了20.6%,18.8%和7.3%。

以上的研究结果均表明,冻融作用可通过改变土壤性质来影响土壤可蚀性,从而影响土壤侵蚀和输沙过程,但是冻融作用对土壤侵蚀的影响各不相同,定量理解冻融作用对侵蚀产沙过程的参数还不存在。而相对于探讨冻融前后土壤性质以及可蚀性的变化,更多的关注均放在春季解冻期的土壤水力侵蚀上,在解冻期,坡面表层融解而深处未融解的情况下,未融解层就形成了不透水层,春季的降水和融雪水无法在土层中迅速下渗,从而导致地表径流和土壤含水量增加,侵蚀产沙量增加<sup>[8]</sup>,故未完全解冻层作为主要影响因素之一,对土壤侵蚀影响较大<sup>[8-11]</sup>。Froese等<sup>[12]</sup>研究认为,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。Sharratt等<sup>[13]</sup>通过降雨试验分析认为,冻土层距离地表越近,则坡面产流量越大、径流含沙量越多,土壤中存在不透水的“心土层”是导致土壤表层水分含量较高的主要原因。Oygarden等<sup>[14]</sup>通过研究发现,下部冻层的存在是导致较小降雨带来大范围的片蚀和细沟侵蚀的主要原因,且侵蚀量超过100 t/hm<sup>2</sup>,相当于整个地区8~9 mm厚土壤流失量。冯大光、周丽丽、范昊明等<sup>[8-11]</sup>通过室内降雨试验发现,土壤解冻深度对我国东北地区黑土入渗、产流以及侵蚀量有较大影响。

虽然未完全解冻层是影响春季解冻期土壤侵蚀的主要原因之一,但国内外对其研究却相对较少,且国内对于黄土的研究远远落后于黑土。基于以上原因,本文在前人研究的基础上,以我国黄土丘陵区黄绵土为研究对象,通过室内人工模拟试验,分析了不同初始解冻深度、降雨强度下的坡面降雨侵蚀过程,为进一步揭示未完全解冻层对坡面土壤侵蚀的影响提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验用土取自陕西省绥德县王茂庄乡王茂沟小流域。试验前将土样风干,过5 mm×5 mm的筛,剔除植物根系、石块等杂物。土壤干容重为1.3 g/cm<sup>3</sup>,土壤饱和含水率为46.41%,机械组成为黏粒0.20%、粉粒72.01%、沙粒27.79%。

试验装置主要由冻土系统、试验土槽和降雨系统3部分组成。冻土系统采用西安理工大学的冻融试验系统;试验土槽为木制不透水结构,边角及外围用角铁锚固,底部配有可移动的试验小车,土槽尺寸为长200 cm、宽75 cm、深35 cm,下端连接用于收集径流、泥沙样品的集流槽。试验采用下喷式模拟降雨系统,根据不同的降雨强度选择不同型号的喷头,有效降雨覆盖面积约为4.5 m×4.5 m,降雨高度为5.2 m,降雨强度变化范围为0.5~2.0 mm/min,降雨均匀度均在85%以上。

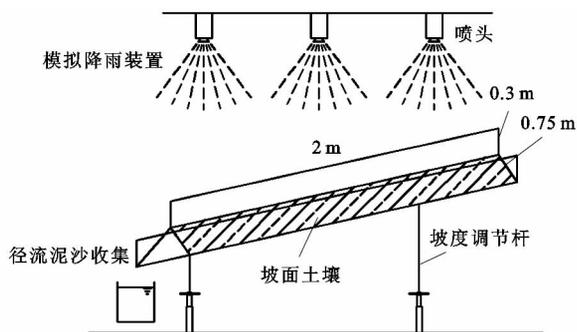


图1 模拟降雨装置与试验土槽的结构示意图

### 1.2 试验方法

试验设计的土壤初始重量含水量为15%,土壤坡面坡度设定为15°;分别设定0,2,4,6 cm共4个初始解冻深度及0.6,0.9,1.2 mm/min共3个雨强。供试土壤按1.3 g/cm<sup>3</sup>的干容重分层装土25 cm;土壤坡面坡度设定为15°。

初始解冻深度的控制采用冻融试验系统冻结和室内融解的方法:即在填装好土层之后,将土槽所在

的移动小车推入冻融试验系统中,在 $-18\sim-22^{\circ}\text{C}$ 下连续冻结 24 h 以上以保证土壤冻透之后,再将试验小车推出冻融试验系统,并放在室内模拟降雨器下,在室温下解冻到试验设计所要求的初始解冻深度,初始解冻深度的测量采用直径为 2 mm 的细钢丝针测定的传统方法,测定过程参考文献[15]中的方法,具体如下:在长度为 200 cm,宽度为 75 cm 的试验土槽上,距离坡底出水口 40,100,160 cm 的位置,选择 3 条平行于槽宽的线,距离土槽一侧垂直于边壁 15,30,45,60 cm 处分别均匀的选取 4 个点,总共选取  $3\times 4=12$  个点,在解冻的过程中,考虑到黄绵土的比热较小,土体温度变化较快的特点,每隔 25 min 用细钢针垂直插入冻土坡面,快速测量出不同位置的初始解冻深度,并求其平均值,当其平均值达到试验设计的初始解冻深度时,即认为其满足试验要求,即可进行下一步的模拟降雨试验。

由于试验条件限制,降雨过程中水温保持在  $15^{\circ}\text{C}$  以下,设定降雨历时为坡面产流后 60 min;坡面产流后,每 1 min 在集流槽接 1 次水沙样品;降雨试验结束后,烘干样品并称重,计算每 1 min 的坡面产流量和产沙量。

## 2 结果与分析

### 2.1 径流过程

由表 1 可以看出,降雨强度对黄绵土坡面初始产流时间有很大影响,随着雨强的增大,不同条件下的坡面初始产流时间提前了 7.55~24.61 min。当初始解冻深度为 6 cm 时,雨强由 0.6 mm/min 增加到 1.2 mm/min 时,坡面初始产流时间提前了 24.61 min。

从表 1 中还可以看出,随着降雨强度的增加,坡面产流量显著增大;当初始解冻深度分别为 0,2,4,6 cm 时,雨强由 0.6 mm/min 增加到 1.2 mm/min 时,坡面产流量分别相应增加了 3.49,3.63,2.98,2.79 倍,在一定程度上可以认为初始解冻深度越小,则坡面产流量随着降雨强度的增幅越大。

从表 1 中还可以看出,坡面产流强度在产流初期迅速增加,降雨后期均逐渐趋于稳定,且雨强越大,坡面径流达到稳定的速度越快,在 0.6 mm/min 雨强下,坡面产流强度在坡面产流 35 min 之后才趋于稳定,而在 1.2 mm/min 雨强下,坡面产流强度在 10 min 左右即趋于稳定,且坡面产流强度随着降雨强度的增加呈明显增大趋势(图 2)。范昊明等<sup>[10]</sup>研究表明,在相同初始解冻深度下,随着雨强的增加,表层解冻土壤在较短的时间内就可以达到饱和并产生径流,从而造成产流时间提前,由降雨转化的地表径流相应

增加。在 0.6,0.9,1.2 mm/min 雨强下,当坡面初始解冻深度由 0 cm 增加到 6 cm 时,坡面初始产流时间分别延迟了 28.49,25.91,11.43 min,因此降雨强度越大,则随着初始解冻深度增加,坡面初始产流时间延迟幅度越小。由于冻土层的存在降低了土壤的渗透能力,冻土层越接近于地表,则更快成为入渗水流的控制界面而降低土壤下渗能力,坡面水流汇集所需时间缩短,产流时间提前。跌坎的出现往往被认为细沟侵蚀开始的标志,结合图 2 和表 1 可以看出,坡面跌坎的出现对坡面径流的影响较小。

坡面产流量随着初始解冻深度变化较为复杂,受降雨强度和初始解冻深度的综合影响。不同降雨强度下坡面产流量的变化趋势有所不同。不同雨强条件下,随着初始解冻深度的增加,坡面产流量先逐渐增加后减小(表 1),因此在试验条件下坡面产流量的变化存在一个临界初始解冻深度,在 0.6,0.9,1.2 mm/min 雨强下的临界初始解冻深度分别为 4,2,4 cm。

观察不同初始解冻深度下坡面产流过程可以发现,在相同雨强条件下,坡面产流量先快速增大后逐渐趋于稳定,但不同雨强下的坡面产流强度随初始解冻深度的变化有所差异。在 1.2 mm/min 雨强下,坡面产流过程较为简单,基本呈现在产流 10 min 之后逐渐稳定的趋势,而在其他两种雨强下的基本呈现缓慢增加趋势。在 1.2 mm/min 雨强下,不同初始解冻深度的坡面产流强度大小依次为:4 cm>2 cm>6 cm>0 cm;在 0.9 mm/min 雨强下,表现为 2 cm>4 cm>0 cm>6 cm;在 0.6 mm/min 雨强下,表现为 4 cm>6 cm>2 cm>0 cm。

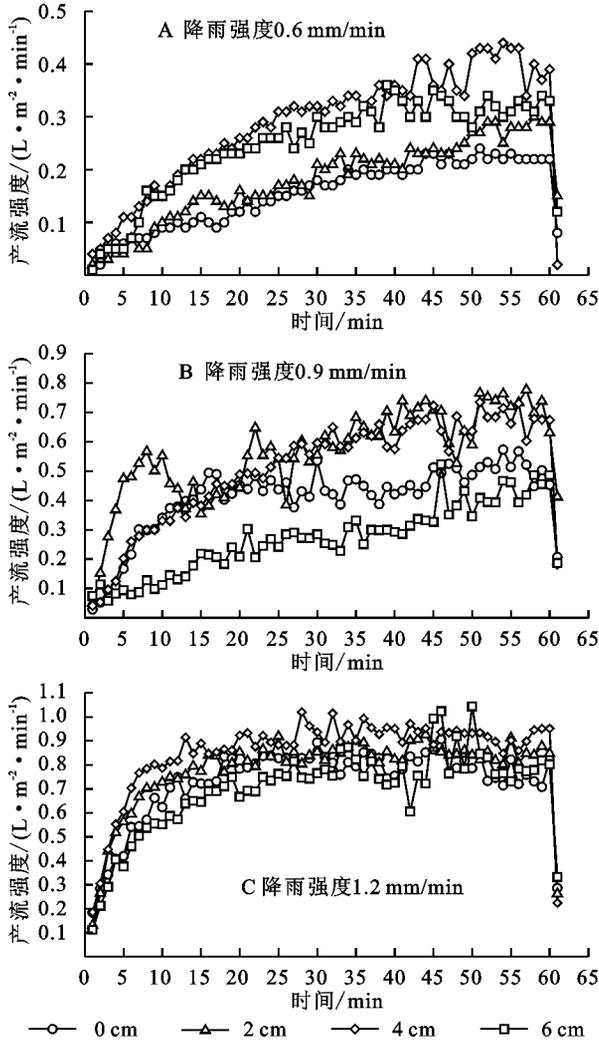
在相同降雨强度下,坡面产流量随初始解冻深度变化主要是以下两方面共同作用的结果:一方面,在坡面开始产流之前,初始解冻深度越大,坡面雨水下渗到冻土层所需时间越多,坡面表层土壤达到饱和的时间越长,产流时间延长;坡面产流前的表层土壤含水量增加为降雨过程中的坡面产流量增加奠定了基础;另一方面,坡面产流后,雨水入渗造成土壤的解冻速率加快,产流和入渗经历着彼此消长的过程,解冻期的土壤水分入渗与非冻结层土壤不同,由于解冻过程中地表有一定厚度的非冻结层而其下部存在未解冻的冻结层,在降雨初期,水分入渗过程类似于非冻结土壤,当入渗水分到达冻结层顶面后,非冻结层土壤达到饱和而产生径流,坡面产流量迅速递增;随着地表冻结层的继续解冻,入渗量增大而地表产流量减小。这也是在特定的雨强条件下坡面产流量的变化存在临界初始解冻深度,并没有随着初始解冻深度的增加而增加的原因。

表 1 坡面径流和侵蚀及主要时刻

降雨强度/ (mm·min <sup>-1</sup> )	初始解冻 深/cm	产流 时间/min	跌坎出现 时间/min	产流量/ mm	侵蚀量/ (kg·m <sup>-2</sup> )
0.60	0	10.13	15.60	9.43	3.49
	2	17.00	12.00	10.26	5.99
	4	18.80	15.00	17.63	14.63
	6	38.62	11.00	15.26	18.58
0.90	0	5.47	10.38	25.02	12.27
	2	12.83	7.50	33.80	27.21
	4	16.44	7.00	31.12	28.61
	6	31.38	11.00	16.46	22.53
1.20	0	2.58	7.25	42.33	17.91
	2	5.37	7.50	47.48	25.33
	4	6.75	7.00	52.45	26.04
	6	14.01	12.00	42.53	35.02

注:表中定义的跌坎出现时间指坡面产流后坡底出现跌坎长度约为 2 cm 时的时间。

4.22倍(表 1)。当雨强由 0.6 mm/min 增加到 1.2 mm/min 时,0,2,4,6 cm 初始解冻深度下坡面侵蚀量分别增加了 4.13,4.22,0.78,0.88 倍。而在 0.9 mm/min 雨强下,初始解冻深度为 2 cm 和 4 cm 时,侵蚀产沙量略大于 1.2 mm/min 雨强,表明降雨强度对坡面侵蚀的影响受初始解冻深度的影响较为复杂,这可能与坡面细沟侵蚀发育的状态有关。降雨过程中坡面产沙强度的波动变化主要受细沟侵蚀发育的影响。在降雨过程中,由于土壤下层冻结层的存在,径流在坡面汇集使坡面中下部近地表土壤含水量快速增大,在降雨初期(跌坎出现之前),坡面侵蚀量缓慢增加(图 3);随着降雨的持续进行,在坡面出口处逐渐形成跌坎,进而发生溯源侵蚀,细沟侵蚀产沙量迅速增加;随着降雨时间的延长,坡面细沟侵蚀的发育程度随着初始解冻深度和降雨强度的不同而不同,坡面侵蚀总量也表现出不同。



注:图中 0 cm,2 cm,4 cm,6 cm 表示初始解冻深度  $h=0,2,4,6$  cm,下同。

图 2 不同试验处理下的坡面径流强度随产流历时的变化过程

2.2 侵蚀过程

随着降雨强度的增加,坡面侵蚀量增加了 0.88~

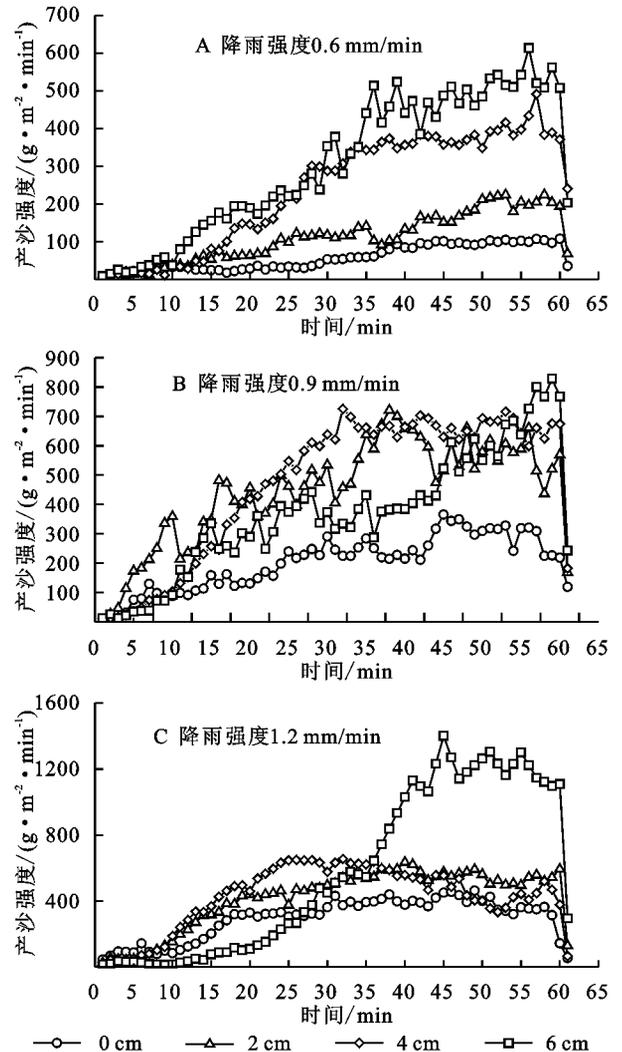


图 3 不同试验处理下的坡面产沙强度随产流历时的变化过程

3 种降雨强度下的坡面产沙过程表现不同,在 0.6 mm/min 雨强下,初始解冻深度为 0,2 cm 时,土壤冻结层距离地表较近,降雨对坡面冻结层的解冻速

率的影响有限,只能通过热传导作用缓慢融化冻土层,坡面表层可侵蚀物质较少,且侵蚀动力较小,所以坡面产沙强度较低;随着初始解冻深度的增加,冻结层以上的土壤水分增加,在细沟形成以后,坡面细沟的溯源、下切侵蚀明显加强,并伴随着大量的滑塌,从而导致坡面侵蚀强度增加迅速且波动幅度较大;在 0.9 mm/min 雨强条件下的坡面产沙过程与 0.6 mm/min 雨强下基本类似。在初始解冻深度为 6 cm 时,不同雨强下坡面产沙强度在降雨末期均发生很明显的崩塌现象,这也是其产沙强度急剧增大的原因(图 3)。在 1.2 mm/min 雨强条件下,除了初始解冻深度 6 cm 外,坡面产沙强度随产流历时的变化呈现先逐渐增大后渐趋稳定并减小趋势,这是因为雨强较大时初始产流时间短且坡面径流迅速冲走地表非冻结层的可蚀物质,从而导致在跌坎形成不久坡面侵蚀量迅速增加,而后因为坡面解冻速率较慢导致能够提供的坡面可蚀物质减小,从而造成坡面侵蚀量逐渐稳定并呈减小趋势。在降雨前期,不同初始解冻深度的坡面产沙强度表现为 6 cm > 4 cm > 2 cm > 0 cm,而在降雨后期,受水力条件的限制,0 cm, 2 cm, 4 cm 共 3 个初始解冻深度下的坡面侵蚀量逐渐接近,并趋于稳定,而初始解冻深度为 6 cm 的坡面,由于降雨后期坡面中下部发生崩塌造成侵蚀量迅速增大。因此在大雨强下,初始解冻深度越大,降雨前期的坡面侵蚀量越大。

### 2.3 降雨强度、初始解冻深度对坡面侵蚀的综合影响

为了分析降雨强度、初始解冻深度以及其相互作用对黄绵土坡面侵蚀的综合影响,分别对坡面初始产流时间、产流量、产流量以及降雨强度—初始解冻深度交互作用进行相关分析。

由表 2 可知,降雨强度与初始产流时间、跌坎出现时间呈显著负相关( $p < 0.01$ ),但与产流量和产沙量呈显著正相关( $p < 0.01$ ),且与坡面产流量的关系最密切;初始解冻深度对坡面产流量的影响与降雨强度大小有关。

表 2 坡面径流和侵蚀与降雨强度、解冻深度及其交互作用的相关系数

因素名称	初始产流 时间	跌坎出现 时间	产流量	产沙量
降雨强度 $I$	-0.529**	-0.627**	0.839**	0.694**
初始解冻深度 $h$	0.757**	0.102	0.038	0.575**
雨强×解冻深度 $I_h$	0.405*	-0.049	0.365	0.763**

注:\*表示  $p < 0.05$ ,\*\*表示  $p < 0.01$ 。

坡面产沙量与雨强—初始解冻深度的交互作用最为密切(相关系数 0.763),其次是降雨强度。降雨强度的增加,一方面增加了坡面水流的径流侵蚀力,

另一方面使得冻结层解冻速率加快,使得坡面可蚀物质增加。

根据 SPSS 软件中的回归分析模块,得到如下公式

$$W = 0.960I \quad (R^2 = 0.918, n = 24) \quad (1)$$

$$S = 0.593I + 0.421I_h \quad (R^2 = 0.955, n = 24) \quad (2)$$

式中:  $W$  为坡面径流量(mm);  $I$  为降雨强度(mm/min);  $S$  为坡面侵蚀量( $\text{kg}/\text{m}^2$ );  $I_h$  为降雨强度和解冻深度的交互作用。

拟合公式(1)和公式(2)的 F 检验均达到  $p < 0.01$  极显著水平。公式(1)为消除量纲影响后的坡面产流量与降雨强度的标准化方程,此回归方程表明降雨强度对坡面产流量起主导作用。公式(2)为消除量纲影响后的坡面产沙量与降雨强度以及降雨强度—初始解冻深度交互作用的标准化方程,该回归方程表明:在坡面产沙量变化过程中,降雨强度起到促进作用,而初始解冻深度对坡面产沙量的影响则与降雨强度有关。

## 3 讨论

黄绵土是在干燥气候条件下形成的一种疏松多孔,具有柱状节理的黄色粉性土,土壤属性接近黄土母质,其总孔隙度达到 50% 左右,其化学成分以  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  占优势,这种独特的矿物组成与化学成分导致黄绵土具有比热小,土温变化大等特性<sup>[16]</sup>。正是由于这种特性,导致黄绵土自身的入渗率较高,在黄绵土坡面发生冻结时,土壤自身所含的水以及外界水源补给水结晶导致土壤颗粒之间的大孔隙中会形成多种形式的冰体入侵<sup>[7]</sup>,导致坡面土体体积增加,冰体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<sup>[17]</sup>;当降雨雨水进入深处冻结层时,冻结的膨胀土体在降雨的作用下从冻结层表层开始迅速融化,而下层土体尚未融解,水分入渗能力降低导致表层水分很快达到饱和状态,抗剪强度和抗蚀能力降低<sup>[18]</sup>,产流时间较短,坡面径流侵蚀很快发生。随着降雨的继续,一方面,由于冻土坡面入渗能力较低,坡面径流较大,侵蚀搬运能力较大;另一方面,由于黄绵土坡面比热较小,坡面土体消融较快,在降雨作用下,不断加速解冻为侵蚀提供较多的可蚀性物质,从而导致解冻期坡面土壤侵蚀加剧。

## 4 结论

(1) 坡面初始产流时间随着降雨强度的增加和初始解冻深度的减小呈减小趋势,降雨强度对坡面初始产流时间的影响大于解冻深度。在试验设定的初始解冻深度条件下,雨强由 0.6 mm/min 增加到 1.2 mm/min 时,坡面产流量增加了 2.79~3.63 倍;

坡面产流量随着初始解冻深度的增加大致呈逐渐增加趋势。

(2) 降雨强度由 0.6 mm/min 增加到 1.2 mm/min 时,坡面产沙量增加了 0.78~4.22 倍;随着初始解冻深度的增加,不同雨强下的坡面产沙量变化规律不同,表明降雨强度、初始解冻深度对坡面产沙量的影响存在交互作用。

(3) 坡面产流量主要受降雨强度的影响,而坡面产沙量主要受降雨强度、降雨强度—初始解冻深度交互作用的影响。根据试验数据,建立了坡面产流量与雨强的经验关系式以及坡面产沙量与降雨强度、降雨强度—初始解冻深度交互作用的经验关系式。

(4) 本文研究了降雨强度和初始解冻深度对解冻期黄绵土坡面产流产沙的影响。考虑到黄土高原黄绵土区不同的地形特点以及解冻期坡面特点,今后仍需进一步分析不同坡长、坡度以及不同前期土壤含水量等对解冻期坡面产流产沙的影响。

#### 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(10):17-18.
- [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] 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.
- [4] 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.
- [5] Klaveren R W V, McCool D K. Erodibility and critical shear of a previously frozen soil[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(5):1315-1321.
- [6] Frame P A, Burney J R, Edwards L. Laboratory measurement of freeze thaw, compaction, residue and slope effects on rill erosion[J]. Canadian Agricultural Engineering, 1992, 34(2):143-149.
- [7] 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.
- [8] 冯大光, 范昊明, 王铁良. 基于最优回归子集的土壤解冻期降雨侵蚀模拟试验分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(1):124-128.
- [9] 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[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6):1-4.
- [10] 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[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3):5-8.
- [11] 周丽丽, 范昊明, 武敏, 等. 白浆土春季解冻期降雨侵蚀模拟[J]. 土壤学报, 2010, 47(3):574-578.
- [12] Jane C. Froese, Richard M. Cruse, Mohammadreza Ghaffarzadeh. 冻融侵蚀机理[J]. 水土保持科技情报, 2001(3):26-28.
- [13] 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 & Water Conservation, 2000, 55(4):487-494.
- [14] Oygarden L. Rill and gully development during extreme winter runoff event in Norway[J]. Catena, 2003, 50(2/4):217-242.
- [15] Ban Y, Lei T, Chen C, et al. Study on the facilities and procedures for meltwater erosion of thawed soil [J]. International Soil & Water Conservation Research, 2016, 4(2):142-147.
- [16] 朱显谟, 祝一志. 试论中国黄土高原土壤与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [17] 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[J]. 农业工程学报, 2000, 16(6):52-55.
- [18] 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[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(6):48-53.
- [14] 乐丽红, 朱安繁, 侯英杰, 等. 余干县耕地土壤养分时空变化特征研究[J]. 江西农业大学学报, 2016, 38(5):986-994.
- [15] 赵明松, 李德成, 张甘霖, 等. 江淮丘陵地区土壤养分空间变异特征:以安徽省定远县为例[J]. 土壤, 2016, 48(4):762-768.
- [16] 董立宽, 方斌, 施龙博, 等. 茶园土壤速效磷乡镇尺度下空间异质性对比分析:以江浙地区优质名茶种植区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(10):1576-1584.
- [17] 鲁如坤, 时正元, 施建平. 我国南方 6 省农田养分平衡现状评价和动态变化研究[J]. 中国农业科学, 2000, 33(2):63-67.
- [18] Harter T, Davis H, Mathews M C, et al. Shallow groundwater quality on dairy farms with irrigated forage crops[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2002, 55(3):287-315.
- [19] Erisman J W, Bleeker A, Galloway J N, et al. Reduced nitrogen in ecology and the environment [J]. Environmental Pollution, 2007, 150(1):140-149.
- [20] 庞凤, 李廷轩, 王永东, 等. 土壤速效氮、磷、钾含量空间变异特征及其影响因子[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1):114-120.
- [21] 江西省土地利用管理局, 江西省土壤普查办公室. 江西土壤[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1991.

(上接第 65 页)