

# 春季解冻期白浆土融雪侵蚀模拟研究

范昊明, 郭萍, 武敏, 周丽丽

(沈阳农业大学 水利学院, 辽宁 沈阳 110161)

**摘要:** 采用室内人工模拟融雪水冲刷试验, 研究了春季解冻期冻融温差、循环次数、土壤初始含水率、融雪水流量和解冻深度这 5 个控制因子对白浆土侵蚀的影响。结果表明, 影响土壤侵蚀的首要因素为融雪水流量。春季解冻期土壤发生侵蚀主要集中在前 15 次冻融循环过程中, 之后即使冻融循环次数增加, 侵蚀量增幅也不明显。土壤含水率变化与侵蚀量之间线型关系不明显, 初始含水率较小的土壤侵蚀量大于初始含水率较大的侵蚀量。在径流冲刷过程中, 融雪流量的大小和土壤冻层的存在, 共同影响解冻深度与侵蚀量大小之间的关系。当融雪流量较小时, 土壤解冻深度越小侵蚀量越大, 二者间呈负相关关系; 反之, 当融雪流量较大时, 土壤解冻深度与侵蚀量之间呈正相关关系。

**关键词:** 模拟融雪; 冻融作用; 侵蚀过程; 白浆土

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)06-0130-04

中图分类号: S157.1

## Simulated Snowmelt Runoff on Lessive in Spring Thawing Period

FAN Hao-ming, GUO Ping, WU Min, ZHOU Li-li

(College of Water Conservancy, Shenyang Agriculture University, Shenyang, Liaoning 110161, China)

**Abstract:** In order to research the impact of lessive soil erosion under the freeze-thaw condition in spring thaw period, freeze-thaw temperature, freeze-thaw cycles, initial water content, snowmelt water flow, thaw depth were selected to study the effects of these five factors on soil erosion by using indoor artificial simulated snowmelt experiment. The results showed that the primary factor was snowmelt water flow. The erosion was mainly happened in the first 15 freeze-thaw cycles in spring thaw period, even though the cycles increase after that, the erosion wasn't increase at all. There was not a significant linear relationship between soil moisture and erosion, but the erosion of relatively small initial soil moisture was greater than the larger amount of initial soil moisture. During the process of scouring runoff, the size of snowmelt water and the existence of soil frozen layer, which both affect the relations between the thaw depth and erosion. When the snowmelt water flow was smaller, the less depth of soil was thawed, the more amount of soil will be eroded, that appear a negative correlation between the two; however, when the snowmelt water flow was greater, that appeared a positive correlation.

**Keywords:** artificial simulated snowmelt; role of freeze-thaw; erosion process; lessive soil

在我国东北地区, 冻融作用常常同水力侵蚀、重力侵蚀复合起来造成水土流失, 对该地区坡面、沟道侵蚀的发生和发展起到了关键性的作用<sup>[1]</sup>。春季解冻期, 这种复合营力的侵蚀作用尤为明显, 一是由于气温回升、积雪迅速融化, 加之表层土壤下部未完全解冻层的阻水作用, 导致土壤表层具有较高的含水率, 为径流的产生提供了必要条件; 二是由于反复的冻融交替作用, 改变了土体的理化性质, 使得表层土壤松散多孔, 土壤抗蚀性大为降低。目前东北地区在

春季解冻期因冻融作用所引起的土壤退化, 土地生产力降低, 已经对该区人民的农业生产及粮食安全构成了极大的危害。由此可见, 东北地区春季解冻期冻融作用所带来的侵蚀形势相当严峻, 治理刻不容缓, 但目前该地区春季解冻期引发的土壤侵蚀研究还开展的较少, 这就给侵蚀量的定量预测及防治措施的合理配置带来了很大的困难。

本研究通过室内人工模拟试验, 研究春季解冻期冻融温差、冻融循环次数、土壤初始含水率、融雪水流

收稿日期: 2010-12-28

修回日期: 2011-03-29

资助项目: 国家自然科学基金项目“辽西褐土旱作农田区沟灌侵蚀机理与侵蚀过程研究”(41071183); 国家自然科学基金青年基金项目“东北旱地耕作土壤冻融作用机理与春季解冻期土壤侵蚀模拟”(40601054)

作者简介: 范昊明(1972—), 男(汉族), 吉林省白山市人, 博士, 副教授, 主要从事流域侵蚀、产沙与水土保持规划研究。E-mail: fanhaoming@163.com。

量、解冻深度这 5 个因子对土壤侵蚀的影响,以期为该时期定量预测土壤侵蚀量,合理配置水土保持措施提供理论支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验装置与材料

试验用土取自辽宁省清原县草市镇与吉林省梅河口市交界处,冻融循环仪器选用沈阳冷冻机有限公司生产的控制温差在  $-40\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  的冻融机。按试验设计配置的土样达到试验要求的冻融循环次数后,放置于径流装置上进行试验。径流装置主要由供水水箱,流量控制阀,稳流水槽,径流坡面,试验土壤和出口共 6 部分组成(图 1)。其中试验用土样长 50 cm,宽 20 cm,高 10 cm。

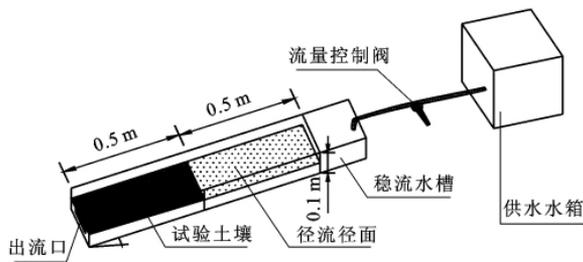


图 1 模拟融雪径流装置示意图

### 1.2 试验设计

试验设计为 5 因素 5 水平的正交试验,选用  $L_{25}(5^5)$  正交试验表作为本次试验设计用表(表 1)。

表 1 试验影响因子及其水平

试验水平	冻融温差/ $^{\circ}\text{C}$	循环次数/次	含水率/%	流量/ $(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	解冻深度/cm
1	$-30\sim 3$	5	20	1	1
2	$-25\sim 5$	10	25	2	2
3	$-10\sim 7$	15	30	3	3
4	$-5\sim 13$	20	35	4	4
5	$-3\sim 15$	30	40	5	5

### 1.3 试验步骤

将野外采集的土样过  $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$  筛网去除根系及其杂质,实测含水量后,若含水率低于设计要求,用喷壶均匀添加所需水分至设计含水率后用塑料布将试验用土盖好,覆盖 48 h 后使土壤含水率均匀;若实测含水率高于设计要求,将土样平铺于避光通风干燥处自然蒸发水分至设计要求,为土槽填土做好准备。装土时,根据原状土容重  $1.25\text{ g/cm}^3$  计算各层所需的装土量,按 1 cm 为一层分 10 层填筑,以确保均匀,每填完一层土应将表面打磨粗糙以保证各层间连接紧密。试验土填好后放于冷冻机中按冻融循环次数进行冻融试验,当试验土处于最后一次解冻状态

时,用测针每隔 5 min 从土表插入土体内直至未解冻层,此时土体内测针的长度即为解冻深度,当解冻深度达到试验要求后,即可进行模拟融雪水冲刷试验。每次冲刷前,按照正交试验设计,进行流量的率定。试验过程中,仔细观察径流冲刷过程,记录初始产流时间和细沟开始形成时间,用集流桶每分钟采集径流泥沙样一次。试验结束后,用量筒测量收集的径流泥沙混合样,然后静置混合样 24 h 使水沙完全分离,后倒掉上部清水用烘干法测量泥沙干重,进而计算分析径流小区的径流量、泥沙量及侵蚀过程。

## 2 结果与分析

### 2.1 分析方法

本研究采用直观分析法,分析各因素的主次和影响趋势。将试验所得的 25 组没有交互作用的冻融侵蚀量做直观分析(表 2)。

### 2.2 试验结果分析

由表 2 可以看出,流量的极差值最大,而其它 4 种因素的极差值均保持在较接近的水平。这说明流量是影响土壤侵蚀量的首要因素,这与非冻融土壤随着流量的增大侵蚀量增大的规律一致,而其它 4 种因素则分别以不同的程度影响着坡面冲刷的侵蚀量。冻融温差和冻融循环次数是在冻融过程中通过改变土壤的物理性质等进而影响土壤侵蚀量,初始含水率对土壤侵蚀的影响是在冲刷过程中其对解冻深度快慢的影响得以体现。

表 2 模拟融雪径流侵蚀试验直观分析

水平和极差	冻融温差(A)	循环次数(B)	含水率(C)	流量(D)	解冻深度(E)
I	1 613	2 089	2 027	782	1 561
II	1 435	1 942	2 064	1 564	1 869
III	1 957	1 979	1 905	1 648	2 051
IV	2 128	1 492	1 508	2 438	1 866
V	1 978	1 610	1 606	2 679	1 763
R	693	597	556	1897	490

注: I~V 表示各因素 1~5 水平的均值; R 表示极差(R 值大表示为主要影响因素,R 值小表示为次要影响因素)。

2.2.1 融雪流量对土壤侵蚀的影响 由表 2 和图 2 可以看出,当试验开始初期,随着流量增加,侵蚀量明显变大。当侵蚀至冻结层时,随着冻结层的不断融化,侵蚀量趋于稳定。总侵蚀量随流量增加而增加,这与非冻融土壤侵蚀量随着流量的增大而增大的规律相一致,但由于冻结层的影响,增大比例小于非冻融土。表现出:  $V_D > IV_D > III_D > II_D > I_D$ 。

流量是影响侵蚀的重要因子之一。表面土壤经过冻融循环后,改变了土壤性状,土壤变得疏松多孔,

产生大量可蚀物质。已有研究表明<sup>[2]</sup>,一定的流量与一定的侵蚀产沙和形态发育成正相关关系,即产流量越大产沙量也越大。由图 2 可以看出,随着流量的增大,侵蚀量也呈增加趋势,较大的流量对坡面侵蚀的影响更为显著。

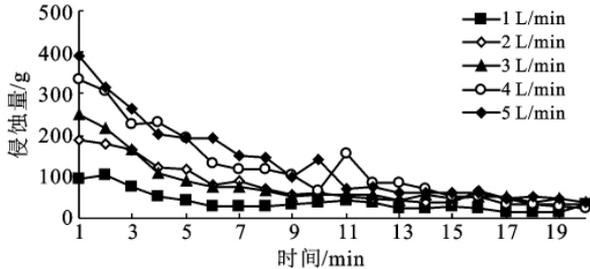


图 2 白浆土在不同融雪流量条件下侵蚀过程对比

2.2.2 冻融温差对土壤侵蚀的影响 由表 1—2 可以看出,当冻融温差为  $-30\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-25\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,冻融温差低的土壤侵蚀量也较小,而当冻融温差为  $-10\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-5\sim 13\text{ }^{\circ}\text{C}$  及  $-3\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,冻融温差高的土壤侵蚀量也较大。在相同解冻深度条件下,冻结温度偏低的土壤,其未完全解冻层厚且坚硬,故阻水作用强,径流侵蚀力弱,可携带的泥沙量少;相反,冻结温度相对高的土壤,其未完全解冻层薄且疏松,故阻水作用弱,径流侵蚀力强,可携带的泥沙量大。另外,  $-10\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-5\sim 13\text{ }^{\circ}\text{C}$  及  $-3\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$  这 3 个水平的温差均在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右反复变化,这种连续不断的冻透—化透—冻透的交替过程会使表层融化土壤容重变小,孔隙度增大,致使土壤变得疏松多孔,这也为融雪径流侵蚀提供了大量的可蚀物质<sup>[3-5]</sup>。

2.2.3 循环次数对土壤侵蚀的影响 分析表 2 可以看出,冻融循环次数为前 3 个水平 5, 10 和 15 次时,土壤侵蚀量均较大,尤其是前 5 次冻融循环造成的侵蚀量最大。这说明土壤发生侵蚀的主要时期集中在前 15 次冻融循环过程中,之后即使增加冻融循环次数,其土壤侵蚀量的增幅也不明显并且最终趋于平稳。这是因为反复的冻融循环会通过改变土壤容重、孔隙度等土壤物理性质而使土壤侵蚀加剧。已有研究显示<sup>[3]</sup>,当土壤含水率一定时,土壤的容重和孔隙度随着冻融循环次数的增加,前者呈缓慢减小、后者呈缓慢增大的趋势,并且二者都是在 5 次冻融循环以后,变化的幅度越来越小,最终趋于稳定。可见,循环次数对土壤侵蚀的影响是通过其对土壤物理性质的改变得以体现的,土壤在经历了一定时期的冻融次数后,其侵蚀量的多少与冻融循环次数之间没有必然联系。

2.2.4 土壤初始含水率对土壤侵蚀的影响 由表 2 中试验数据可以看出,侵蚀量与初始含水率没有明显的线性关系,而是初始含水率较小的侵蚀量大于初始

含水率较大的侵蚀量。已有研究表明初始含水率越大,冻结后土粒间含冰量越大,孔隙比例减少,入渗能力降低<sup>[6]</sup>,因而未完全解冻层解冻速率慢,只能依靠土层间热传导作用。故初始含水率为 35% 和 40% 的土壤由于解冻深度变化小,受未完全解冻层影响侵蚀量也小;初始含水率为 25% 的土壤解冻后含冰量少、孔隙多、入渗能力强,其受未完全解冻层的影响小,解冻速率快,故总侵蚀量最大。

2.2.5 解冻深度对土壤侵蚀的影响 由表 2 可以看出,初始解冻深度对侵蚀总量的影响并不随解冻深度的增减而增减,而是在中间值 3 cm 水平上侵蚀量最大,2 和 4 cm 水平次之,5 和 1 cm 水平上最小。初始解冻深度处于中间水平 3 cm 时,解冻深度大,径流可携带的泥沙量较多,并且细沟易于发育,所以泥沙侵蚀总量最大;初始解冻深度太小或太大都会影响侵蚀量多寡,当解冻深度为 1 cm 时,解冻深度较浅,径流可携带的泥沙量少,土壤侵蚀总量也少,当初始解冻深度为 5 cm 时,为使土壤达到饱和所需入渗量增加,径流相对较少,故携沙能力减弱。

由图 3 可以看出,在试验的 20 min 内,侵蚀量总体均呈现出不断减少的趋势,所不同的是解冻深度为 3 和 5 cm 时,侵蚀量在 2 min 内迅速增加到峰值,而后 5 cm 水平的迅速减少,并始终维持在较低的水平,3 cm 水平的则逐渐减少,并且侵蚀量始终保持较高的水平,这也为次解冻深度侵蚀总量最高奠定了基础。当初始解冻深度为 1 cm 时,坡面先以面蚀侵蚀为主,随后出现跌坎,当含水率较大时,还会出现细沟,但由于解冻层深度较浅,跌坎和细沟很快达到冻土层,在未完全解冻层的作用下,土壤侵蚀量有限。初始解冻深度为 3 cm 时,解冻深度较 1 cm 深,但冻结层对径流的阻挡作用依然明显,径流携带泥沙能力较强,所以该水平在侵蚀量到达峰值后虽有所减少,但其总量一直维持在较高的水平直到试验结束。初始解冻深度为 5 cm 时,坡面可侵蚀的泥沙量较其它水平最多,但解冻层为达到饱和含水率所用的时间和需水量也相应增加,并且初始含水率较小的土壤,这一现象更明显,故入渗量增加,径流量减少,总侵蚀量较小。

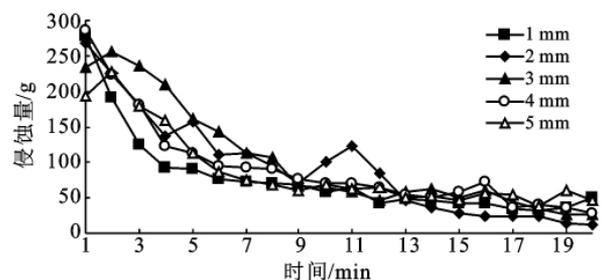
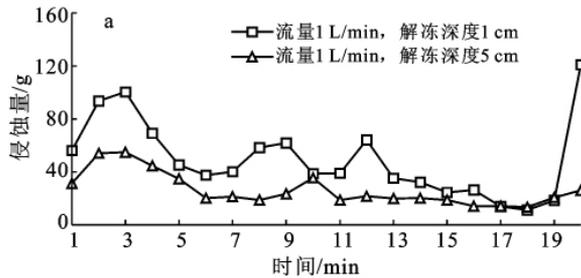


图 3 白浆土在不同解冻深度的侵蚀量变化

在相同流量条件下,分别以两组试验来分析解冻深度对侵蚀量大小影响。

从图4a可以看出,当流量为1 L/min时,解冻深度为1 cm时侵蚀量较大,这是因为当流量较小时,由于土壤下部冻层作用,解冻深度较小的冻层距土壤表面近,表面融化土层很快达到饱和含水率,入渗量少,径流量大,因此侵蚀量较大;相反解冻深度较大的冻层距离土壤表面远,表面土壤需更多的水达到饱和,



入渗量也随之增加,径流量相对较小,因此侵蚀量较小;从图4b可以看出,当流量为5 L/min时,解冻深度为3 cm时侵蚀量较大,这是因为当流量加大时,前期侵蚀量平稳增大,但随后细沟侧蚀出现会使侵蚀量急剧增大。另外,在试验的后期,随着细沟的逐渐加深,会有不可预测的小崩塌出现,崩塌的发生可使该时刻侵蚀量剧增,如图4a最后一分钟观测到的侵蚀量剧增,即为小崩塌发生所致。

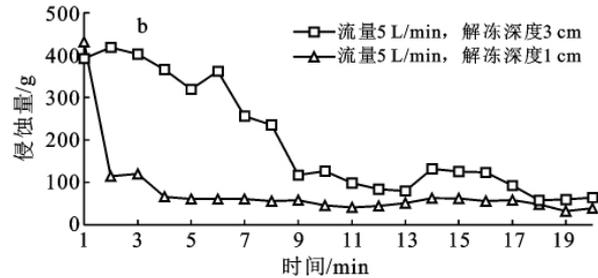


图4 白浆土在相同流量不同解冻深度条件下模拟融雪径流试验对比

径流冲刷过程中侵蚀量呈现出随时间的延长,先急剧增大而后波动减小的变化趋势。融雪流量的大小和土壤冻层的存在,共同影响解冻深度与侵蚀量大小之间的关系。当融雪流量小时,解冻深度较小的土壤,侵蚀量较大,即解冻深度与侵蚀量间呈负相关;反之,当融雪流量大时,解冻深度较大的土壤,侵蚀量也较大,即二者之间呈正相关关系。

### 3 结论

(1) 影响土壤侵蚀量的首要因素是融雪水流量,一定的流量与一定的侵蚀产沙和形态发育相一致,产流量大产沙量也大。其它4种因素为次要因素,分别以不同的程度影响着坡面冲刷的侵蚀量。

(2) 在相同解冻深度条件下,冻结温度偏低的土壤,侵蚀量较小;冻结温度相对高的土壤,侵蚀量较大。反复的冻融循环会通过改变土壤容重、孔隙度等物理性质而使土壤侵蚀加剧,一般而言土壤发生侵蚀的主要时期集中在前15次冻融循环过程中,之后即使增加冻融循环次数,其土壤侵蚀量的增幅也不明显并且最终趋于平稳。

(3) 初始含水率大,解冻后土层含冰量多,孔隙少,水分入渗能力弱,未完全解冻层解冻速率慢,只能靠土层间热传导作用;土壤初始含水率小,解冻后含冰量少,孔隙多,水分入渗能力强,土壤受未完全解冻层影响小,解冻速率快,侵蚀量大。土壤初始含水率较小的侵蚀量大于初始含水率较大的侵蚀量。

(4) 当初始解冻深度为1 cm时,由于解冻深度

浅,土壤侵蚀量有限,坡面侵蚀受未完全解冻层影响最大;初始解冻深度为2~4 cm时,未完全解冻层对径流的阻挡作用依然明显;初始解冻深度为5 cm时,未完全解冻层的阻水作用最小。

(5) 径流冲刷过程中,融雪流量的大小和土壤冻层的存在,共同影响解冻深度与侵蚀量大小之间的关系。当融雪流量较小时,土壤解冻深度与侵蚀量之间呈负相关关系;反之,当融雪流量较大时,土壤解冻深度与侵蚀量之间呈正相关关系。

#### [参考文献]

- [1] 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.
- [2] 王文龙,雷阿林,李占斌,等.黄土区不同地貌部位径流泥沙空间分布试验研究[J].农业工程学报,2003,19(4):40-43.
- [3] 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.
- [4] Kok H, McCool D K. Quantifying freeze/thaw-induced variability of soil strength [J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(2):501-506.
- [5] Sharratt B S, Lindstrom M J, Benoit G R. 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.
- [6] 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.