

# 黑土区治理后侵蚀沟道融雪侵蚀观测研究

胡 伟<sup>1</sup>, 樊 华<sup>2</sup>, 李 浩<sup>1</sup>, 翟星雨<sup>3</sup>, 张兴义<sup>1</sup>

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 黑土区农业生态院重点实验室, 哈尔滨 150081;

2. 黑龙江省水土保持科学研究院, 哈尔滨 150070; 3. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 融雪侵蚀是季节性积雪区水土流失的重要组成部分, 融雪作用对侵蚀沟发育的影响对侵蚀沟防治有重要意义。通过野外实地监测和测量, 对东北黑土区治理后侵蚀沟融雪侵蚀过程及沟坡细沟形态特征进行分析, 探讨水土保持措施对融雪侵蚀的防控效果。结果表明: 除侵蚀沟 G2 未产流外, 侵蚀沟 G1 和 G3 在融雪中期径流率和泥沙含量明显高于融雪末期和融雪初期。融雪径流率和泥沙含量的日动态变化过程均呈先增加后下降的趋势。融雪期 3 条侵蚀沟沟坡细沟平均宽度变幅为 6.7~9.4 cm, 平均深度变幅为 3.3~4.3 cm。阳坡出现细沟的条数, 细沟密度, 细沟割裂度, 平均细沟复杂度和细沟侵蚀平均深度明显高于阴坡, 说明阳坡的破碎程度及细沟侵蚀程度大于阴坡。细沟主要以宽浅槽型为主, 宽深比为 1.91~2.18。水土保持措施在融雪期间作用明显, 侵蚀沟 G2 水土保持措施的拦水拦沙效果达到 100%, 侵蚀沟 G1 和 G3 大部分融雪侵蚀的泥沙也在沟道内沉积。

**关键词:** 融雪侵蚀; 冻融作用; 细沟侵蚀; 细沟形态; 东北黑土区

中图分类号: 157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0084-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.05.014

## Snowmelt Erosion Characteristics of Controlled Gully in Black Soil Region

HU Wei<sup>1</sup>, FAN Hua<sup>2</sup>, LI Hao<sup>1</sup>, ZHAI Xingyu<sup>3</sup>, ZHANG Xingyi<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology,

Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081; 2. Heilongjiang Institute of Soil and Water Conservation Science,

Harbin 150070; 3. School of Resources and Environmental Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030)

**Abstract:** Snowmelt erosion is an important part of soil and water loss in seasonal snow cover area. It is important for preventing and controlling erosion gully to understand the effect of snowmelt on gully development. Based on the field observation and measurement, snowmelt erosion processes and rill erosion morphology of gully slope were analyzed in the northeast black soil area, and the prevention and control effect of soil and water conservation measures on snowmelt erosion was investigated. The results showed that there was no runoff in G2, and the runoff rate and sediment concentration of G1 and G3 in middle stage of snowmelt period was greater than those in last stage and initial stage of snowmelt. The daily dynamic changes of runoff rate and sediment concentration were both increased first then decreased. During the snowmelt period, for the three gullies, mean rill width was ranged from 6.7 to 9.4 cm, mean rill depth was ranged from 3.3 to 4.3 cm. The number of rill, rill density, degree of rill dissection, rill tortuosity complexity and average rill erosion depth on sunny slope were all greater than those on shady slope, which indicated that the degree of rupture and rill erosion on sunny slope was greater than that on shady slope. The rill was dominated by type of wide-shallow, and the ratio of width to depth was ranged from 1.91 to 2.18. Effect of soil and water conservation measures was obvious during snowmelt period. The benefits of soil and water conservation measures on water and sediment blocking in erosion gully G2 was 100%, and for G1 and G3, most of the sediment eroded by snowmelt was also deposited in the gully.

**Keywords:** snowmelt erosion; freezing and thawing; rill erosion; rill morphology; black soil region of Northeast China

在季节性积雪地区,融雪侵蚀严重影响当地人民的生产、生活和地区经济发展<sup>[1]</sup>。融雪期,土壤侵蚀的外营力主要以冻融和融雪等为主<sup>[2]</sup>。融雪径流为土壤侵蚀提供了动力,通常以股流形式出现,冲刷力较强<sup>[3]</sup>。在冻融作用下土壤结构被破坏,土壤抗冲性减弱,表层解冻土壤为土壤侵蚀提供物质来源<sup>[4]</sup>。同时,土壤冻结层的存在阻碍了融雪水的下渗,而部分下渗水则增加了解冻土壤的含水量<sup>[5]</sup>。在融雪径流、冻融作用及未完全解冻层的共同作用下,坡面极易发生侵蚀,先形成细沟,随着汇流的增加,细沟极容易发育成浅沟和切沟<sup>[6]</sup>。

东北黑土区作为我国最大的商品粮生产基地<sup>[7]</sup>,经过近百年高强度和不合理的开发利用,水土流失现象非常严重。除面蚀外,东北黑土区已成为我国沟道侵蚀严重区之一,侵蚀沟的数量和密度逐年增加,侵蚀强度也在加强。现有大型侵蚀沟 29.6 万余条,大多发育在坡耕地上<sup>[7]</sup>。除夏季暴雨外,冬春季冻融和融雪等也是侵蚀沟发育的主要外营力<sup>[8]</sup>,主要表现为沟壁冻融坍塌和沟头溯源后退。因此,东北黑土区侵蚀沟治理刻不容缓,现已被《全国水土保持规划(2015—2030 年)》列为重点<sup>[3]</sup>。当前侵蚀沟治理多采用工程措施和植物措施相结合的方法,因地制宜地应用多种生态修复技术阻止沟头前进、沟底下切和沟岸扩张。

然而现有的东北黑土区水土保持措施减水减沙效益研究多集中在坡面尺度<sup>[9]</sup>,主要以坡面治理措施为主<sup>[10]</sup>,关于沟道治理措施减水减沙效益鲜见报道,

尤其是对融雪侵蚀的防控效益研究相对缺乏。细沟侵蚀作为面蚀向沟蚀发展的过渡阶段<sup>[11]</sup>,在融雪期的黑土坡面呈辫状分布<sup>[6]</sup>。现有研究多以坡耕地为主,对治理后侵蚀沟沟坡融雪期细沟侵蚀特征的定量研究还相对薄弱。因此,本研究以治理后的侵蚀沟为对象,研究融雪期侵蚀过程,量化沟坡细沟形态特征,以为沟道融雪侵蚀防治提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省绥棱农场 12 作业站(47°35′3.48″ N,127°28′37.19″ E),海拔 225~245 m。属中温带大陆性季风气候,多年平均降水量 631 mm,多年平均气温 0.9 ℃,多年有效积温( $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 2 383 ℃,年平均日照时间 1 964 h,多年平均无霜期 116 d。最大冻土深 2.2 m。多年平均风速 3.8 m/s,地貌类型为漫川漫岗,土壤主要有黑土和草甸土。黑土主要分布在岗坡地,草甸土主要分布在漫岗的中下部及平缓的岗坡地。植被区划属松嫩平原羊草草原区。作物主要以玉米大豆轮作为主。

观测对象选取 2017 年实施水土保持措施治理的 3 条侵蚀沟,分别标记为 G1,G2,G3。侵蚀沟 G1 位于东西向农田路北侧,为典型的路边排水沟,汇水主要来源于上游东北侧山上林地经环山截流沟导入的汇水。侵蚀沟 G2 为东西向,汇水主要来源于上游的农田和北侧农田,沟尾与 G3 垂直交汇,流入 G3。侵蚀沟 G3 为北南向,北高南低,东侧为长约 400 m 东高西低顺坡垄作。治理后的侵蚀沟参数见表 1。

表 1 侵蚀沟参数

侵蚀沟 编号	沟长/ m	上口宽/ m	下口宽/ m	平均深/ m	沟坡平均 长度/m	坡角/ ( $^{\circ}$ )	汇水 面积/hm <sup>2</sup>	占地面积/ hm <sup>2</sup>	沟底 比降
G1	131	6.14	1.83	1.47	2.61	35.0	32.17	0.06	6.41
G2	140	16.06	2.91	3.19	7.31	33.7	70.24	0.13	2.30
G3	146	14.41	4.50	2.53	5.56	35.0	57.39	0.18	1.38

侵蚀沟水土保持措施于 2017 年 10 月初布设完成。具体布设情况为:(1)侵蚀沟 G1,沟道采取直线修坡整形,在侵蚀沟上游开挖围山截流沟,并布设排水沟,截流沟和排水沟结合处根据比降布设 4 处浆砌石跌水。在沟尾处设有涵洞和量水堰。营造沟坡防蚀林和沟底防冲林。(2)侵蚀沟 G2,沟头布设钢筋混凝土二级跌水。沟坡采用阶梯式修坡整形,在沟坡沟底坡降改变处采用铺草皮措施。沟中修建石笼干砌石谷坊,量水堰和蜂巢护坡结合处,采用混凝土护砌,沟尾处设涵洞。营造沟坡防蚀林和沟底防冲林。(3)侵蚀沟 G3,沟头结合 G2 涵洞出口,修建雷诺沟

头防护,加设微型溢洪口—导水沟。沟道采取直线修坡整形,沟边原有侧蚀采用填沟措施,与侵蚀沟结合处修建两处混凝土挡墙,并设沟边导水土墙。营造沟坡防蚀林和沟底防冲林。

### 1.2 试验方法

1.2.1 融雪侵蚀过程观测 3 条侵蚀沟的融雪观测试验在 2018 年 3 月 24—28 日进行,共 5 天。融雪径流泥沙通过标准量水堰进行收集,侵蚀沟 G1 量水堰为“V”形宽顶堰,G2 和 G3 量水堰为锐缘矩形宽顶堰。根据径流量大小每隔 0.5~1.5 h 取样观测 1 次,详细记录采样时间。融雪试验结束后,将径流泥

沙样品烘干称重,计算其泥沙含量。

1.2.2 细沟形态测量 融雪观测完全结束后,采用卷尺和直尺测量各侵蚀沟两侧沟坡土壤裸露处发育的细沟形态。具体方法是沿着沟缘线在沟坡每隔 20~30 cm 详细测量细沟的位置坐标( $x, y$ )及细沟的宽度和深度,直线处测距稍大,转弯处加密测量。细沟侵蚀量采用容积法进行计算<sup>[12]</sup>。

### 1.3 数据处理

1.3.1 融雪径流计算 依据过堰流量推算融雪径流量<sup>[13]</sup>。根据堰槽测流规范<sup>[14]</sup>,"V"形宽顶堰流量计算公式为:

$$Q = \left(\frac{4}{5}\right)^{5/2} \sqrt{0.5g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) C_D C_V C_f h^{5/2} \quad (1)$$

式中: $Q$ 为过堰流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ); $\theta$ 为堰顶角( $^\circ$ ); $C_D$ 为流量系数; $C_V$ 为行近流速系数; $C_f$ 为淹没系数; $h$ 为水位( $\text{m}$ ); $g$ 为重力加速度( $9.82 \text{ m/s}^2$ )。其中, $C_D$ 、 $C_V$ 和  $C_f$  可查表获取相关参数<sup>[14]</sup>。

锐缘矩形宽顶堰<sup>[14]</sup>流量计算公式为:

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \sqrt{g} C b h^{3/2} \quad (2)$$

式中: $Q$ 为过堰流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ); $b$ 为堰顶宽( $\text{m}$ ); $C$ 为流量组合系数,查表获取<sup>[14]</sup>。

1.3.2 细沟形态特征计算 借鉴已有研究<sup>[11-12, 15-16]</sup>成果,选取细沟倾斜度、细沟密度、细沟割裂度、细沟复杂度、细沟宽深比和细沟侵蚀平均深度表征各侵蚀沟沟坡细沟形态特征。

细沟密度( $\rho$ )<sup>[12]</sup>是指侵蚀沟沟坡所有细沟的总长度与沟坡面积的比值( $\text{m}/\text{m}^2$ ),计算公式为:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{A} \quad (3)$$

式中: $L_i$ 为侵蚀沟沟坡上第  $i$  条细沟及其分叉的总长度( $\text{m}$ ); $A$ 为侵蚀沟沟坡的表面积( $\text{m}^2$ )。

细沟割裂度( $D$ )<sup>[15]</sup>是指侵蚀沟沟坡所有细沟平面面积与沟坡面积的比值,计算公式为:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{A} \quad (4)$$

式中: $A_i$ 为侵蚀沟沟坡上第  $i$  条细沟的平面面积( $\text{m}^2$ )。

细沟复杂度( $c$ )<sup>[11]</sup>是指侵蚀沟沟坡上一条细沟及其分叉的总长度与相应的垂直有效长度的比值,计算公式为:

$$c = \frac{L_i}{L_{ij}} \quad (5)$$

式中: $L_{ij}$ 为侵蚀沟沟坡第  $i$  条细沟的垂直有效长度( $\text{m}$ )。

细沟宽深比( $R_{WD}$ )<sup>[12]</sup>是指侵蚀沟沟坡细沟宽度与对应深度的比值,计算公式为:

$$R_{WD} = \frac{\sum_{k=1}^n W_k}{\sum_{k=1}^n D_k} \quad (6)$$

式中: $W_k$ 和  $D_k$  为侵蚀沟沟坡第  $k$  个测点处的细沟宽度( $\text{cm}$ )和深度( $\text{cm}$ )。

细沟侵蚀平均深度( $\bar{d}$ )<sup>[16]</sup>是指细沟对侵蚀沟沟坡土壤剥蚀的平均深度( $\text{mm}$ ),计算公式为:

$$\bar{d} = \frac{V}{A} \quad (7)$$

式中: $V$ 为细沟侵蚀总体积( $\text{m}^3$ ),用容积法计算<sup>[16]</sup>。

利用 Excel 2003 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 观测期气温和土壤温度变化

观测期内,气温呈波浪状变化(图 1)。日平均气温和日最高温最大值均出现在 3 月 27 日,分别为  $10.2, 10.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ,之后均在 3 月 29 日降到最低值,分别为  $2.6, 3.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。表层 0—10 cm 土壤平均地温变化与气温变化规律相似,但每日最低地温变化趋势较为平缓,说明表层土壤均存在日冻融循环。

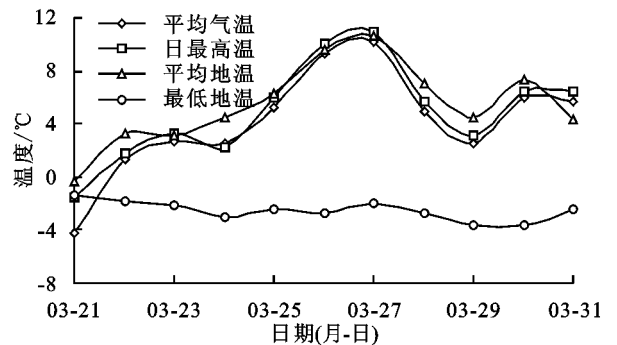


图 1 观测期内气温和地温变化

### 2.2 融雪侵蚀过程

2.2.1 融雪径流变化过程 融雪径流主要受气温和地温的影响。根据径流量大小将观测期划分为融雪初期(3 月 24 日)、融雪中期(3 月 25—26 日)和融雪末期(3 月 27—28 日)。融雪中期的径流量明显高于初期和末期(图 2)。观测期间,除侵蚀沟 G2 未产流外,侵蚀沟 G1 和 G3 在昼夜温差的影响下径流量在午间出现高峰夜间出现断流。融雪初期,侵蚀沟 G1 和 G3 径流率明显有别于其他两个阶段,均在下午 14:00 左右首次产流。G1 径流率呈缓慢增加—稳定—下降的趋势。G3 径流率呈先增加后急剧降低的趋势。G3 日平均径流率是 G1 日平均径流率的 12.5 倍。在融雪中期和末期,径流率变化过程基本相似,

冰封融化开始产流后,径流率呈急剧增加—峰值—迅速降低的趋势。G1 日径流率峰值和日平均径流率最大值出现在 3 月 25 日,分别为 1.3、0.6 L/s。G3 日径流率峰值和日平均径流率最大值出现在 3 月 26 日,分别为 5.2、2.8 L/s。

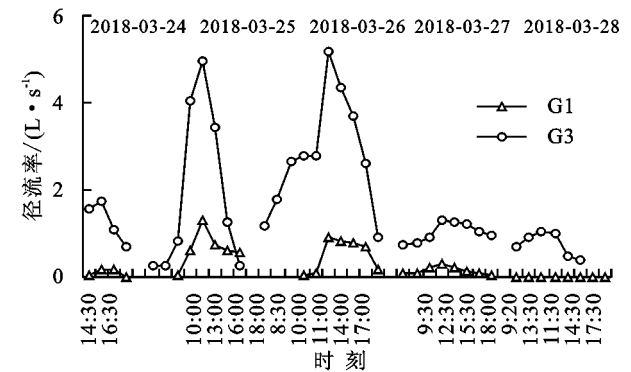


图 2 融雪期间径流率随时间的变化过程

2.2.2 融雪泥沙含量变化过程 融雪泥沙含量主要受融雪径流、冻融作用及未完全解冻层的影响。融雪中期的泥沙含量明显高于融雪初期和融雪末期(图 3)。融雪初期,侵蚀沟 G1 和 G3 泥沙含量均呈缓慢增加—下降的趋势,G3 泥沙含量的增/减幅明显大于 G1。融雪中期和末期,侵蚀沟 G1 和 G3 泥沙含量变化过程基本一致,表现为急剧增加—峰值—迅速降低

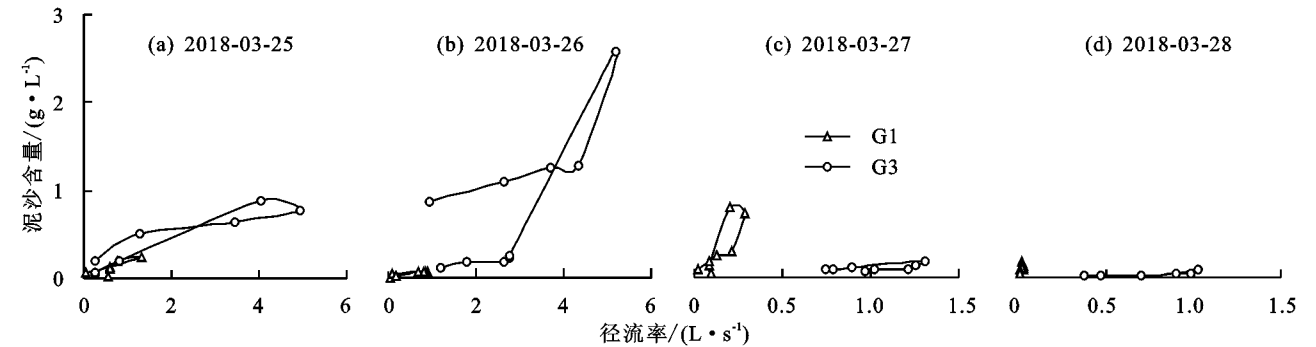


图 4 融雪径流与泥沙含量关系

2.3 沟坡细沟侵蚀

融雪过程中,在沟坡自身融雪径流和邻近农田融雪径流的共同作用下,沟坡出现了不同程度的细沟侵蚀。

2.3.1 细沟几何形态 3 条侵蚀沟沟坡细沟累积长度变幅为 42.2~137.9 m,细沟平均宽度变幅为 6.7~9.4 cm,细沟平均深度变幅为 3.3~4.3 cm(表 2)。对沟坡实测的细沟宽度进行频率统计,发现绝大多数细沟宽度均小于 30 cm(图 5a)。其中,侵蚀沟 G1、G2 和 G3 沟坡上宽度≤10 cm 的细沟分别占 60.0%, 86.7%,73.8%。说明各侵蚀沟沟坡细沟侵蚀主要以沟宽≤10 cm 的细沟为主。对沟坡细沟深度进行频率统计,发现绝大多数细沟深度均小于 20 cm(图

的趋势。其中,G1 日泥沙含量峰值和日平均泥沙含量最大值出现在 3 月 27 日,分别为 0.8、0.3 g/L。G3 日泥沙含量峰值和日平均泥沙含量最大值出现在 3 月 26 日,分别为 2.5、0.8 g/L。

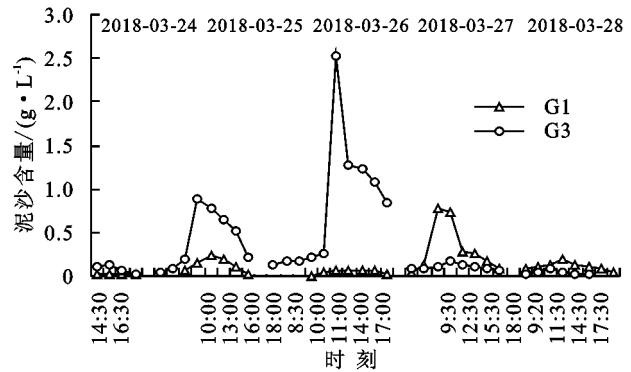


图 3 融雪期间泥沙含量随时间的变化过程

2.2.3 融雪径流与泥沙含量关系 由于融雪初期径流历时较短,故选取融雪中期和末期数据采用 Williams 的方法分析径流与泥沙含量关系<sup>[4]</sup>。由图 4 可知,在日尺度,融雪中期,侵蚀沟 G1 和 G3 融雪径流与泥沙含量关系均呈“8”字循环滞后。在融雪末期,侵蚀沟 G1 融雪径流与泥沙含量关系呈“8”字循环滞后—顺时针滞后,而侵蚀沟 G3 融雪径流与泥沙含量关系则呈顺时针滞后—“8”字循环滞后。

5b)。其中,侵蚀沟 G1、G2 和 G3 沟坡上深度≤5 cm 的细沟分别占了 73.3%,78.6%,88.1%。说明各侵蚀沟沟坡细沟侵蚀主要以沟深≤5 cm 的细沟为主。

表 2 各侵蚀沟细沟累积长度、平均宽度和平均深度

侵蚀沟 编号	样本数	细沟累积 长度/m	平均 宽度/cm	平均 深度/cm
G1	41	42.2	9.4	4.3
G2	98	137.9	6.7	3.3
G3	51	89.6	9.2	3.8

2.3.2 细沟形态特征指标 细沟密度、细沟割裂度和细沟侵蚀平均深度能够反映坡面的破碎程度和细沟侵蚀强度<sup>[12,16]</sup>。细沟宽深比反映细沟沟槽形状的变化,细沟复杂度能够反映细沟网的丰富度<sup>[11,15]</sup>。

对比 3 条侵蚀沟沟坡不同坡向的细沟形态特征指标发现,阳坡出现细沟侵蚀的条数明显多于阴坡(表 3),G1 和 G3 尤为明显。阳坡的细沟密度、细沟割裂

度、平均细沟复杂度和细沟宽深比明显高于阴坡各细沟形态特征。说明阳坡的破碎程度及细沟侵蚀程度大于阴坡。

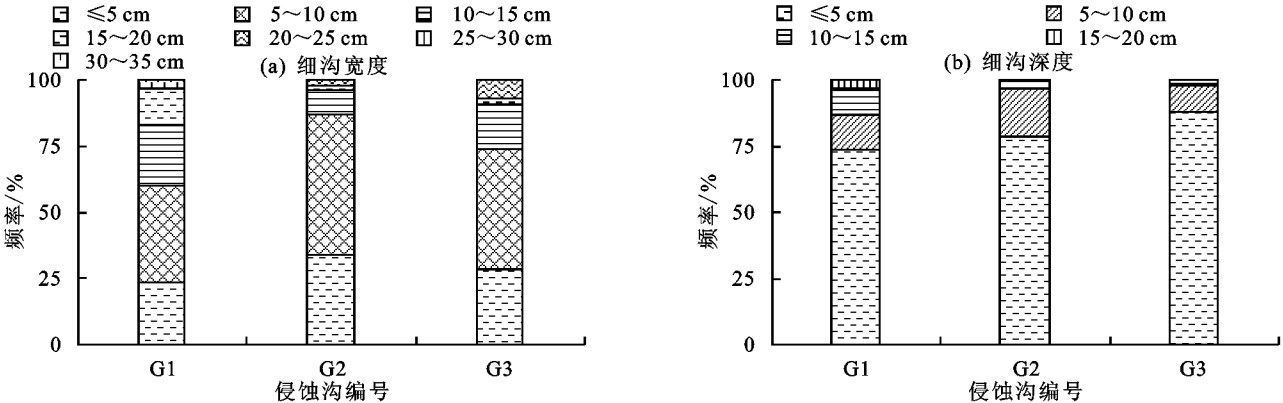


图 5 细沟宽度和深度的频率统计

表 3 不同坡向细沟形态特征指标

侵蚀沟 编号	坡向	样本数	细沟密度/ ( $\text{m} \cdot \text{m}^{-2}$ )	细沟 割裂度	平均细沟 复杂度	宽深比	细沟侵蚀 平均深度/mm
G1	阳坡	30	0.151	0.0155	1.06	2.18	1.05
	阴坡	11	0.043	0.0032	1.04	2.06	0.12
G2	阳坡	55	0.072	0.0046	1.02	2.09	0.18
	阴坡	43	0.051	0.0036	1.03	1.95	0.14
G3	阳坡	42	0.157	0.0163	1.02	2.41	0.85
	阴坡	9	0.031	0.0017	1.02	1.91	0.06

2.3.3 细沟侵蚀量 根据容积法计算细沟侵蚀量<sup>[16]</sup>。在沟道水土保持措施(工程和植物)的作用下各侵蚀沟的输沙量小于两侧沟坡细沟侵蚀量。侵蚀沟 G2 虽然存在细沟侵蚀但是无输沙量(图 6),说明沟坡的细沟侵蚀全部在沟道内沉积,水土保持措施的拦沙效果达到 100%。侵蚀沟 G1 和 G3 沟坡细沟侵蚀量大于侵蚀沟输沙量,沟坡细沟侵蚀量分别达到了侵蚀沟输沙量的42.57,3.08 倍。说明侵蚀沟融雪径流仅携带出少量的泥沙,大部分融雪侵蚀的泥沙被沟道内实施的水土保持措施拦截,在沟道内发生沉积。由此可见,沟道内布设的水土保持措施(工程和植物)的拦沙效果非常明显。

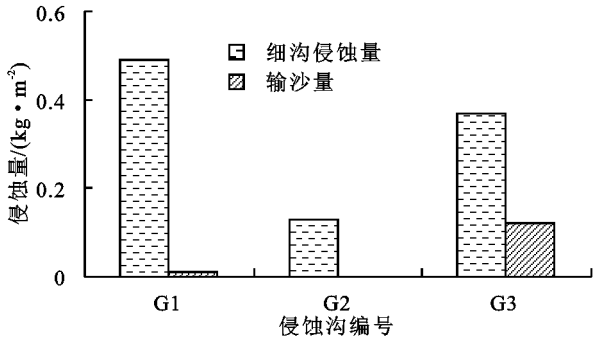


图 6 各侵蚀沟细沟侵蚀量和输沙量

### 3 讨论

融雪期土壤主要受融雪径流、冻融作用及未完全解冻层的影响<sup>[3,6]</sup>。融雪初期,日最高温出现在下午 14:00 左右,径流来源于少量融化的雪水<sup>[4]</sup>,随温度下降,融雪水和土壤冻结速度加快,径流可搬运的松散物质减少,泥沙含量降低。当温度低于 0℃,径流因冻结出现断流。融雪中期,气温和地温分别较初期平均增加 4.7,5.7℃。上午随着温度升高,阳坡全部积雪和阴坡的大部分积雪进入融化高峰期,下渗融雪水量随土壤解冻深度增加而增大,表层土壤含水量增加,土壤抗冲性减弱<sup>[3]</sup>,加之未完全解冻层的存在,径流可搬运的松散物质增多,径流和泥沙含量迅速增加,在中午达到峰值;之后随温度降低,土壤冻结加快,径流量和泥沙含量降低<sup>[4]</sup>。该阶段,两侧沟坡融雪水向沟底低洼处汇集,洼地附近的径流泥沙首先通过水堰,径流—泥沙关系出现顺时针滞后。随土壤解冻深度与含水量的增加,更多的松散物质被径流带走,出现逆时针滞后。随径流的减少,径流和泥沙源以靠近沟底的沟坡和沟底为主。融雪末期,径流量和泥沙含量日变化过程跟融雪中期一致。径流来源于

阴坡少量未融雪,融雪中期径流在夜间冻结部分和土壤解冻产生的液态水,因此产生少量的地表径流<sup>[4]</sup>。沟底松散物质随土壤抗冲性的减弱而增加,但径流搬运能力有限,泥沙含量明显低于融雪中期。该阶段,侵蚀沟 G1 径流—泥沙关系顺时针滞后的出现,说明径流和泥沙源是在沟底或量水堰附近。而侵蚀沟 G3 径流—泥沙关系由顺时针滞后—“8”字循环滞后,可能跟大量外源融雪径流泥沙的输入有关。侵蚀沟 G1 泥沙含量峰值和日平均泥沙含量最大值相对径流率均滞后了 1 天,可能是因为前期融雪径流剥蚀的土壤颗粒为后期径流的搬运提供了物质来源。本研究中,径流—泥沙关系有别于黑土坡耕地<sup>[4]</sup>的观测结果,可能跟水土保持措施的拦蓄以及外源径流泥沙的输入有关。

融雪期间,沟坡细沟侵蚀受沟坡坡度、坡长、坡形、坡向、汇水面积以及地表植被覆盖程度等的影响。3 条侵蚀沟沟坡均属于易发生细沟侵蚀的斜坡,细沟密度和细沟割裂度均较垄作黑土坡面偏大<sup>[17]</sup>,这主要因为坡度越大,融雪径流更容易形成股流,细沟内流速也越大,冲刷力增强,溯源侵蚀强度增加,坡面的破碎程度及细沟侵蚀强度增加。坡长主要影响细沟长度的变化。侵蚀沟 G2 沟坡细沟累积长度分别为 G1 和 G3 的 3.3,1.5 倍,这主要是因为随坡长的增加,跌水、细沟出现的时间和坡面流能量的汇集时间缩短,更容易发生细沟侵蚀。坡形对细沟的几何形态影响较大。与黑土横垄坡面相比,本研究中细沟的平均宽度较大而平均深度较小。可能是因为横垄垄台在阻碍融雪径流对沟壁的扩张的同时增加了径流对沟底的下切。融雪期间,坡向不同,所接受的太阳辐射不同。阳坡出现细沟的条数和各细沟形态特征指标明显高于阴坡。这主要是因为阳坡裸露部位较多,受太阳辐射影响最明显,积雪融化速率快,加之邻近农田融雪径流的汇入,单位时间内融雪径流量较大,融雪侵蚀破碎程度和细沟侵蚀强度增强<sup>[6]</sup>,细沟网的丰富度增加。汇水面积直接影响侵蚀沟的发育程度。汇水面积最大的侵蚀沟 G2 在布设水土保持措施之后,汇流路径改变,汇流量减小,细沟侵蚀平均深度和细沟侵蚀量明显低于其他 2 条侵蚀沟。地表植被覆盖程度对细沟侵蚀的影响不容忽视。融雪期,细沟多出现在土壤裸露部位,这主要是因为受冻融和融雪径流等的影响,裸地抗蚀性较弱。凋萎杂草覆盖部位,融雪初期受积雪和杂草的保护,不发生土壤侵

蚀<sup>[10]</sup>;后期积雪全部融化,在杂草及根系的拦截作用下,仅发生片蚀<sup>[5]</sup>。侵蚀外营力和土壤可蚀性也是影响细沟侵蚀的重要因素。本研究中融雪侵蚀形成的细沟宽度分布规律与黄土坡耕地相似<sup>[12]</sup>,而细沟深度较黄土坡耕地窄<sup>[18]</sup>。可能的原因是冻结层阻碍了径流的下切,加之解冻期土壤抗蚀性较弱,以股流为主的融雪径流冲刷力较强,加快了细沟溯源侵蚀的发展和沟壁的扩张<sup>[19]</sup>。受融雪径流流路单一的影响,径流来不及分散即流出坡面,细沟复杂度明显低于黄土坡耕地<sup>[11-12]</sup>,形成的细沟较黄土坡面简单<sup>[16-17]</sup>,主要以呈宽浅槽型的细沟为主,这与刘雨佳等<sup>[6]</sup>的观测结果一致。

水土保持措施能够有效地拦蓄径流和泥沙,措施不同减水减沙差异明显。在融雪期,工程措施的水土保持作用主要是对融雪径流的拦蓄和消能<sup>[9-10]</sup>,诸如侵蚀沟 G1 布设的截流沟和浆砌石跌水,侵蚀沟 G2 布设的钢筋混凝土二级跌水、沟坡阶梯台面和石笼干砌石谷坊,侵蚀沟 G3 布设的雷诺沟头防护和混凝土挡墙等均能实现逐级拦蓄融雪径流和消减上游来水能量。植被措施的水土保持作用主要是增加地表粗糙度,减缓径流流速,增加入渗量,削弱径流侵蚀能力<sup>[9]</sup>。3 条侵蚀沟均布设有沟坡防蚀林和沟底防冲林,自然生长的草本植被也比较茂盛。在工程措施和植物措施的综合作用下,大部分侵蚀物质被拦截,沉积在沟内。侵蚀沟 G2 的拦蓄效果最佳,一方面跟水土保持措施布设有关;另一方面跟汇流路径改变有关。侵蚀沟 G3 输沙量最大,跟 3 处外源融雪径流和泥沙的输入有关,分别是:(1)G2 上游来水汇流路径改变汇集形成新侵蚀沟,并通过 G2 沟尾处的涵洞汇入 G3;(2)沟头上游顺坡垄作农田和道路融雪径流通过微型溢洪口—导水沟汇入沟内;(3)沟中部顺坡垄作农田的融雪径流经修建的两座挡墙汇入沟内。而谭娟等<sup>[10]</sup>在径流小区的研究结果指出,生物措施(生态修复和灌木埂)对融雪侵蚀的防控效果优于工程措施(水平坑),这可能跟工程措施的选取以及研究尺度的不同有关系。说明水土保持工程措施在侵蚀沟治理中的蓄水拦沙效应优于在坡面的应用。东北黑土区侵蚀沟多处于发展阶段,在构建集沟头、沟坡、沟底、沟边侵蚀沟稳固工程防护体系,配置高效植被恢复生态群落的同时,应当充分考虑融雪侵蚀这一降雨侵蚀的物质来源,在兼顾降雨和融雪两种侵蚀类型的

情况下,形成适用于东北黑土区的侵蚀沟生态修复治理模式。

## 4 结论

(1)侵蚀沟融雪侵蚀过程历时 5 天。融雪中期径流率和泥沙含量明显高于融雪末期和融雪初期。受昼夜温差的影响,径流率和泥沙含量的日动态变化规律均呈先增加后下降的趋势,夜间出现断流现象。

(2)融雪期侵蚀沟沟坡细沟累积长度变幅为 42.2~137.9 m,平均宽度变幅为 6.7~9.4 cm,平均深度变幅为 3.3~4.3 cm。阳坡出现细沟的条数、细沟密度、细沟割裂度,平均细沟复杂度和细沟侵蚀平均深度明显高于阴坡,说明阳坡的破碎程度及细沟侵蚀程度大于阴坡。细沟主要以宽浅槽型为主,宽深比为 1.91~2.18。

(3)水土保持措施在融雪期间作用明显,侵蚀沟 G2 沟坡的细沟侵蚀全部在沟道内沉积,水土保持措施的拦沙效果达到 100%。侵蚀沟 G1 和 G3 沟坡细沟侵蚀量分别是侵蚀沟输沙量的 42.57,3.08 倍。说明侵蚀沟融雪径流仅携带出少量的泥沙,大部分融雪侵蚀的泥沙被水土保持措施拦截,在沟道内发生沉积。

### 参考文献:

- [1] 王平,李浩,陈强,等.典型黑土区不同尺度观测场地融雪径流[J].水土保持通报,2014,34(5):244-247,253.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 华文杏,范昊明,许秀泉,等.东北坡耕地春季融雪侵蚀观测研究[J].水土保持学报,2017,31(2):92-96,110.
- [5] 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.

- [6] 刘雨佳,许秀泉,范昊明,等.东北黑土区横垄坡面融雪期细沟侵蚀特征研究[J].土壤通报,2017,48(3):701-706.
- [7] 张兴义,隋跃宇,宋春雨.农田黑土退化过程[J].土壤与作物,2013,2(1):1-6.
- [8] Liu H Y, Yang Y, Zhang K L, et al. Soil erosion as affected by freeze-thaw regime and initial soil moisture content [J]. Soil Science Society of America Journal, 2017, 81(3): 459-467.
- [9] 范建荣,王念忠,陈光,等.东北地区水土保持措施因子研究[J].中国水土保持科学,2011,9(3):75-78,92.
- [10] 谭娟,范昊明,许秀泉,等.融雪与降雨侵蚀条件下水土保持措施因子值对比研究[J].水土保持研究,2017,24(3):29-32,38.
- [11] 郭明明,王文龙,李建明,等.野外模拟降雨条件下矿区土质道路径流产沙及细沟发育研究[J].农业工程学报,2016,32(24):155-163.
- [12] Shen H O, Zheng F L, Wen L L, et al. An experimental study of rill erosion and morphology [J]. Geomorphology, 2015, 231: 193-201.
- [13] 刘琳,屈丽琴,雷廷武,等.径流小区产流过程量水堰自动测量系统[J].农业工程学报,2011,27(12):79-83.
- [14] 中华人民共和国水利部.水工建筑物与堰槽测流规范 SL 537-2011[S].北京:中国水利水电出版社,2011:6-9.
- [15] 徐锡蒙,郑粉莉,武敏.雨强和坡度对黄土陡坡地浅沟形态特征影响的定量研究[J].农业工程学报,2017,33(11):124-132.
- [16] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.黄土坡面细沟侵蚀形态试验[J].生态学报,2014,34(19):5514-5521.
- [17] 刘雨佳.春季融雪期黑土和白浆土坡面细沟侵蚀研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2017.
- [18] 沈海鸥.黄土坡面细沟发育与形态特征研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [19] 郑粉莉,徐锡蒙,覃超.沟蚀过程研究进展[J].农业机械学报,2016,47(8):48-59,116.