

壤中流和土壤解冻深度对黑土坡面融雪侵蚀的影响

王 伦¹ 郑粉莉^{1,2*} 师宏强¹ 赵录友² 莫帅豪¹ 秦琪珊¹ 耿华杰¹ 赵娅君¹

(¹西北农林科技大学水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西杨凌 712100; ²中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌 712100)

摘 要 融雪侵蚀是东北黑土区土壤流失的一种重要形式,而目前有关壤中流和土壤解冻深度对融雪径流侵蚀的影响研究较少。本研究采用室内模拟试验,设计两个融雪径流量(1和4 L·min⁻¹)和两个土壤解冻深度(5和10 cm),以及有、无壤中流处理,分析壤中流和土壤解冻深度对黑土区坡面融雪侵蚀的影响。结果表明:1)壤中流处理下坡面融雪径流深度和侵蚀量分别是无壤中流处理的1.1~1.2倍和1.3~1.9倍。两个融雪径流量下,当土壤解冻深度由5 cm增加到10 cm时,无壤中流处理下坡面融雪径流深度和侵蚀量分别增加10.0%~13.5%和15.4%~37.1%;而有壤中流处理下坡面融雪径流深度增加6.5%~8.5%,融雪侵蚀量则无显著变化。2)坡面细沟发育受壤中流、土壤解冻深度和融雪径流量的综合影响,各处理下细沟侵蚀量占坡面融雪侵蚀量的72%以上。3)壤中流发生使坡面径流流速和径流剪切力分别增加20.3%~23.2%和37.0%~51.3%,Darcy-Weisbach阻力系数减少9.0%~21.4%,从而增加了坡面融雪侵蚀量;且壤中流发生促进了坡面细沟发育,其细沟侵蚀量较无壤中流处理增加43.6%~69.9%,也导致坡面融雪侵蚀量增加。无壤中流条件下,土壤解冻深度加剧坡面融雪侵蚀的主要原因是随着土壤解冻深度的增加,坡面径流侵蚀能力和可蚀性物质来源增加,导致融雪径流侵蚀量增加。此外,土壤解冻深度对壤中流条件下细沟形态发育也有明显的影响,土壤解冻深度为5 cm时,细沟横向加宽作用显著;而土壤解冻深度为10 cm时,细沟下切侵蚀作用更显著。本研究加深了对黑土区融雪侵蚀机理的认识,可为水蚀模型的研发提供理论指导。

关键词 壤中流;土壤解冻深度;融雪径流;细沟侵蚀

Impacts of seepage flow and soil thaw depth on hillslope snowmelt erosion in Chinese Mollisol region. WANG Lun¹, ZHENG Fen-li^{1,2*}, SHI Hong-qiang¹, ZHAO Lu-you², MO Shuai-hao¹, QIN Qi-shan¹, GENG Hua-jie¹, ZHAO Ya-jun¹ (¹State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China).

Abstract: Snowmelt erosion is an important way of soil loss in Chinese Mollisol region. However, little is known about the effects of seepage flow and soil thaw depth on hillslope snowmelt runoff erosion. An indoor simulated experiment was conducted to analyze the impacts of seepage flow and soil thaw depth on hillslope snowmelt erosion. There were two snowmelt flow rates (1 and 4 L·min⁻¹), two soil thaw depths (5 and 10 cm), and two near-surface hydrological conditions (with and without seepage flow). The results showed that hillslope runoff depth and soil erosion amount in the treatment with seepage flow were 1.1 to 1.2 times and 1.3 to 1.9 times of those in the treatment without seepage flow, respectively. Under two snowmelt flow rates, when soil thaw depth increased from

本文由国家重点研发计划项目(2016YFE0202900)和中国科学院战略性先导科技专项(XDA23060502)资助 This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFE0202900) and the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA23060502).

2021-06-24 Received, 2021-10-02 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: flzh@ms.iswc.cn

5 cm to 10 cm, hillslope runoff depth and soil erosion amount increased by 10.0% to 13.5% and 15.4% to 37.1% in the treatment without seepage flow, respectively. In the treatment with seepage flow, when soil thaw depth shifted from 5 cm to 10 cm, hillslope runoff depth increased by 6.5% to 8.5%, and soil erosion amount remained stable. Moreover, hillslope rill development was comprehensively influenced by seepage flow, soil thaw depth, and snowmelt flow rate, with rill erosion amount occupying more than 72% of hillslope snowmelt erosion amount. Compared with the treatment without seepage flow, flow velocity and shear stress under the treatment with seepage flow increased by 20.3% to 23.2% and 37.0% to 51.3%, respectively; but Darcy-Weisbach friction coefficient reduced by 9.0% to 21.4%, which caused an increase of hillslope snowmelt erosion. In addition, seepage flow enhanced rill development, which caused rill erosion amount to increase by 43.6% to 69.9% compared with the treatment without seepage flow, and it further resulted in the increase of hillslope snowmelt erosion amount. The main reason for soil thaw depth enhancing hillslope snowmelt erosion amount under the treatment without seepage flow was that both sloping runoff erosivity and erodible materials increased with increasing soil thaw depth. Furthermore, soil thaw depth had a significant impact on hillslope rill morphology development under the treatment with seepage flow. Rill widening process was dominated when soil thaw depth was 5 cm, whereas rill incision process was dominant when soil thaw depth was 10 cm. This study could improve the understanding of hillslope snowmelt erosion mechanism in Chinese Mollisol region and provide theoretical guidance for the development of water erosion model.

Key words: seepage flow; soil thaw depth; snowmelt runoff; rill erosion.

黑土是全人类共同的宝贵资源^[1]。由于其肥力高、适宜耕作等特点,全球四大黑土区皆是粮食生产的重要基地^[2]。然而,当前世界黑土出现严重退化和生产力下降等共性生态环境问题,严重威胁全球粮食战略安全^[3]。我国东北黑土区由于独特的地理环境,冻融作用影响强烈,加剧了黑土层流失速度^[4]。东北黑土区早春季节,气温回升,积雪迅速融化,在长缓坡地形和冻-融界面不透水层作用下,融雪径流在坡面易形成较大径流量,导致严重的融雪侵蚀发生^[5-6]。融雪侵蚀过程中,土壤剖面解冻层是侵蚀的物质来源^[7],而壤中流发生是加剧融雪径流侵蚀的重要原因。解冻过程中土壤剖面出现上融下冻现象,产生了一个相对不透水层,导致在冻-融界面形成壤中流。相关研究表明,壤中流发生极大地降低了土壤颗粒间的黏结力,增加土壤可蚀性,加剧坡面土壤侵蚀^[8-10]。

目前,我国黑土区融雪侵蚀研究主要集中在融雪侵蚀监测^[11-15]、融雪侵蚀影响因素^[5,16]及融雪期细沟侵蚀特征^[17]等方面,而土壤解冻深度对融雪侵蚀的影响研究,尤其是壤中流与土壤解冻深度共同作用对坡面融雪侵蚀过程的影响研究较少。因此,本研究基于室内模拟试验,分析东北黑土区融雪期间壤中流和土壤解冻深度对坡面土壤侵蚀过程的影响,以期加深对融雪侵蚀过程机理的认识,为水蚀预报过程模型的研发提供理论指导,为黑土坡面侵蚀防治提供重要的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

室内模拟试验于2020年11月—2021年3月在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅进行。试验设备包括:试验土槽、冷冻设备、制冰机、壤中流供水装置和融雪径流供水装置。试验土槽为100 cm(长)×50 cm(宽)×20 cm(深)的可升降式钢槽,其坡度可调节范围为0~20°,试验土槽侧方留有供水口,以便根据土壤解冻深度形成不同水头的壤中流。冷冻设备是能够稳定维持-15℃的新容声BD/BC-1780冰柜,可将试验土槽整体冷冻。制冰机是可以制造细小颗粒状雪花碎冰的雪科IMS-50全自动雪花制冰机,制冰量为2 kg·h⁻¹,储冰量可达15 kg。壤中流供水装置为马氏瓶,通过内径8 mm、外径12 mm的软管与试验土槽侧方供水口相连。融雪径流供水装置由恒压水箱、稳流槽、供水箱、蠕动泵和连接水管组成,可调节融雪径流量变化范围为0.5~5 L·min⁻¹。

供试土壤取自黑龙江省克山县(47°50′51″—48°33′47″ N, 125°10′57″—126°08′18″ E)玉米地0~20 cm耕层土。该区属于典型厚层黑土区(黑土层厚度>60 cm),土壤黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和砂粒(0.05~2 mm)的含量分别为40.6%、48.7%和10.7%,属粉砂质黏土(USDA);土壤有机质含量约23.8 g·kg⁻¹,pH为5.9左右。该

区属于温带大陆性季风气候, 年均降水量 510 mm, 年均温 1.0 °C, 年温差 45 °C 左右, 冻结期 180 d, 为季节性冻土区^[18], 早春季节冻融侵蚀严重。

1.2 试验设计

本试验设计两个融雪径流量(1 和 4 L · min⁻¹)、两个土壤解冻深度(5 和 10 cm) 及有、无壤中流试验条件, 每个试验处理重复 2 次(表 1)。各试验参数设计依据如下: 1) 土壤解冻深度是影响融雪径流侵蚀的关键因子^[19]。野外调查发现, 坡面侵蚀主要发生在土壤表层 10 cm 范围内, 故试验设计两个土壤解冻深度, 分别为 5 和 10 cm。2) 融雪径流量由融雪径流系数、降雪量和汇水面积决定。基于中国科学院东北地理与农业生态研究所海伦水土保持监测研究站的观测数据^[15], 设计降雪量为 40 mm, 融雪径流系数为 0.4, 故设计 1 和 4 L · min⁻¹ 作为上方面积分别为 25 和 100 m² 的融雪融化形成的融雪径流量。3) 壤中流常在土壤冻-融界面发生, 故试验设计两个与土壤解冻深度一致的壤中流深度, 即二者分别位于试验土槽土壤表层以下 5 和 10 cm 处, 设计的壤中流流量为 15.6~18.0 mm · h⁻¹。野外实测降雪密度为 0.28 g · cm⁻³, 故在试验土壤表面均匀铺设 70 cm(长) × 50 cm(宽) × 5 cm(深) 的碎冰, 总铺冰量为 5 kg。4) 黑土区坡耕地坡度大多介于 3~7°, 故取均值 5° 作为试验坡度。由于壤中流发生的条件是土壤水分达到饱和^[20-21], 故试验设计土壤含水量为饱和含水量。基于研究区冬季气温变化和实际冻融条件, 设定土壤冻结温度为 -15 °C, 冻结时间为 39 h, 室温下进行解冻。

1.3 试验步骤

1.3.1 装填土槽 野外采集的供试黑土风干后剔除

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design scheme

试验处理 Treatment	融雪径流量 Snowmelt flow (L · min ⁻¹)	土壤解冻深度 Soil thaw depth (cm)
WS	Q ₁ -D ₅	5
	Q ₁ -D ₁₀	10
	Q ₄ -D ₅	5
	Q ₄ -D ₁₀	10
S	Q ₁ -D ₅	5
	Q ₁ -D ₁₀	10
	Q ₄ -D ₅	5
	Q ₄ -D ₁₀	10

WS: 无壤中流 Without seepage flow; S: 有壤中流 With seepage flow; Q₁: 1 L · min⁻¹ 融雪径流量 1 L · min⁻¹ snowmelt flow rate; Q₄: 4 L · min⁻¹ 融雪径流量 4 L · min⁻¹ snowmelt flow rate; D₅: 5 cm 土壤解冻深度 5 cm soil thaw depth; D₁₀: 10 cm 土壤解冻深度 10 cm soil thaw depth. 下同 The same below.

杂物, 将大土块顺其自然节理掰成小土块, 整个过程中对土样不研磨、不过筛, 以保持原有结构。填土前, 先测定试验土壤含水量, 按田间测定的耕层土壤容重(1.20 g · cm⁻³) 计算每层土层所需的土壤质量。为使试验土壤水分充分均匀, 先将试验用土加水至含水量达到 16.5%, 静置 12 h 后再填入试验土槽中。采用分层填土法填土, 先在土槽底部装填 3 cm 的沙层透水层, 并在其上铺上纱布; 在沙层的基础上, 每 4 cm 为一层装填试供土壤, 为防止土层之间出现分层现象, 每装完一层后用铁耙抓毛下层土壤表面再继续填装下一层, 保证填土的均匀性和整体性。在填土过程中将试验土槽四周边界压实。试验土壤装填好后, 计算土壤达到饱和所需的水量, 用喷水壶缓慢均匀地喷洒在试验土壤上, 最后用保鲜膜密封试验土槽并静置 24 h。

1.3.2 预试验 进行了为期 40 d 的预试验, 保证试验参数误差小于 7%。确定的试验参数如下: 在冻结温度为 -15 °C 时, 试验土槽完全冻结需要 39 h; 在室温为 3~5 °C 时, 土壤解冻 5 cm 需要历时 8~9 h, 土壤解冻 10 cm 需要历时 15~16 h。此外, 整个试验过程中监测的恒压水箱内水温始终维持在 1~4 °C。

1.3.3 融雪径流试验 将静置后的土槽放入冰柜冷冻, 冻结后将其取出置于避光处解冻。解冻过程中使用五点法测量土壤解冻深度。当土壤解冻深度达到设计目标土壤解冻深度的一半时, 开始在试验土壤表面均匀地铺设碎冰。当土壤初始解冻深度达到试验要求后即可进行模拟融雪径流侵蚀试验。其中, 融雪径流装置的供水箱中装满冰水混合物, 通过蠕动泵将冰水输入到恒压水箱中, 再由恒压水箱输送设定流量的水进入稳流槽内。对于有壤中流的试验处理, 为保证壤中流出流速率达到试验要求, 每次试验之前需对马氏瓶进行率定, 当试验土槽土壤达到解冻深度后开始进行壤中流+融雪径流试验。此外, 试验开始后, 观察坡面产流和侵蚀情况, 记录初始产流时间、细沟发生时间。产流后接取第一个径流泥沙样, 随后按 3 min 间隔采集径流样, 并用高锰酸钾染色法测定坡面径流流速^[22]。当坡面产生细沟后, 沿着细沟沟槽每隔 5 或 10 cm 测量细沟位置及细沟的长、宽和深度。坡面产流后用秒表记录试验历时, 试验共持续 40 min。试验结束后称量各径流泥沙样的质量, 之后放入 105 °C 的烘箱烘干称重(精确到 0.01 g)。

1.4 数据处理

试验过程中采用高锰酸钾染色法测定坡面最大

流速,坡面径流平均流速为坡面最大流速乘以修正系数^[22],计算公式为:

$$V = kV_m \quad (1)$$

式中: V 为坡面径流平均流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); V_m 为坡面径流最大流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); k 为修正系数(层流和过渡流取值为 0.67,紊流为 0.8),本研究中 $k=0.8$ 。

选取参数 Darcy-Weisbach 阻力系数(f)、径流剪切力(τ)研究融雪径流侵蚀过程中的水动力学参数特征。水动力学参数的计算公式^[23-24]为:

$$f = 8g \cdot R \cdot J / V^2 \quad (2)$$

$$R = B \cdot h / (B + 2h) \quad (3)$$

$$\tau = \gamma \cdot R \cdot J \quad (4)$$

式中: f 为 Darcy-Weisbach 阻力系数; R 为水力半径 (m); J 为水力坡度 ($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$),近似为坡度的正切值^[25]; g 为重力加速度,取 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; V 为径流平均流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); B 为径流宽度 (cm); h 为流深 (cm); τ 为径流剪切力 (Pa); γ 为水的重度 ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)。

采用 Excel 2019 和 SPSS 26.0 软件对数据进行统计分析,采用单因素 (one-way ANOVA) 和 LSD 法进行方差分析和多重比较 ($\alpha = 0.05$),利用 Origin 2021 软件作图。图表中数据为平均值 \pm 标准差。

2 结果与分析

2.1 壤中流和土壤解冻深度对坡面融雪径流和侵蚀量的影响

试验过程中,壤中流强度为 $15.6 \sim 18.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,仅壤中流条件下坡面无侵蚀发生;当坡面有融雪径流发生时,壤中流形成对坡面融雪侵蚀的影响显著。由表 2 可知,在 1 和 $4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 融雪径流条件下,壤中流发生导致坡面融雪径流深度分别增加 $14.6\% \sim 19.9\%$ 和 $17.7\% \sim 21.6\%$,坡面融雪侵蚀量分别增加 $27.1\% \sim 88.6\%$ 和 $40.8\% \sim 66.3\%$ 。这表明壤中流发生对坡面融雪侵蚀起到了促进作用,且其对侵蚀量的影响较对径流深度的影响更显著。

对比两个土壤解冻深度发现,无论是否有壤中流处理,坡面融雪径流深度均随土壤解冻深度的增加而显著增加,当土壤解冻深度由 5 cm 增加到 10 cm 时,坡面融雪径流深度增加 $6.5\% \sim 13.5\%$ 。而土壤解冻深度对坡面融雪侵蚀量的影响则较为复杂,在无壤中流条件下,土壤解冻深度为 10 cm 的坡面融雪侵蚀量是土壤解冻深度为 5 cm 的 $1.2 \sim 1.4$ 倍;而在壤中流条件下,两个土壤解冻深度对应的坡面融雪侵蚀量无显著差异。可见,壤中流和土壤解冻深度对坡面融雪侵蚀量的影响存在互馈作用。此外,融雪径流量也是影响坡面融雪侵蚀的关键因素,当融雪径流量由 $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 增加到 $4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,坡面融雪径流深度和侵蚀量增幅为 $235.5\% \sim 454.1\%$ 。

2.2 壤中流和土壤解冻深度对坡面融雪径流和侵蚀过程的影响

坡面径流速率反映了径流侵蚀能力,其大小直接影响到坡面侵蚀过程。由图 1 可知,坡面融雪径流速率随试验历时的变化总体上呈先增大后趋于稳定的趋势,且在融雪产流 20 min 后基本稳定。此外,壤中流处理下的坡面融雪径流速率均大于无壤中流处理,增幅在 16.4% 以上。

土壤解冻深度和融雪径流量是影响坡面融雪侵蚀过程的重要因子。当土壤解冻深度由 5 cm 增加到 10 cm 时,坡面平均融雪径流速率增加 $3.9\% \sim 10.4\%$;当融雪径流量从 $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 增加到 $4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,各试验处理下坡面融雪径流速率随融雪径流量的增加成倍增大,其增幅在 $218.7\% \sim 233.0\%$ 。

坡面融雪侵蚀速率随试验历时呈“急剧增大—迅速减小—趋于稳定”的变化趋势。坡面融雪产流初期,坡面侵蚀方式以片蚀为主,随着坡面小跌坎的出现和小跌坎不断发育连通形成细沟,坡面融雪侵蚀速率迅速增大;之后,随着坡面细沟发育变慢和解

表 2 壤中流和土壤解冻深度对融雪径流深度和侵蚀量的影响

Table 2 Effects of seepage flow and soil thaw depth on snowmelt runoff depth and soil erosion amount

处理 Treatment	径流深度 Runoff depth (mm)		侵蚀量 Soil erosion amount ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	
	无壤中流 Without seepage flow	有壤中流 With seepage flow	无壤中流 Without seepage flow	有壤中流 With seepage flow
Q_1 -D ₅	72.5 \pm 1.6dA	86.9 \pm 1.1dB	0.35 \pm 0.03dB	0.66 \pm 0.05bA
Q_1 -D ₁₀	82.3 \pm 1.8cA	94.3 \pm 2.2cB	0.48 \pm 0.03cB	0.61 \pm 0.03bA
Q_4 -D ₅	251.1 \pm 12.7bA	305.3 \pm 4.3bB	2.08 \pm 0.07bB	3.46 \pm 0.08aA
Q_4 -D ₁₀	276.1 \pm 21.6aA	325.0 \pm 3.8aB	2.40 \pm 0.11aB	3.38 \pm 0.10aA

同列不同小写字母表示土壤解冻深度和融雪径流量处理之间存在显著差异 ($P < 0.05$),同行不同大写字母表示有、无壤中流处理之间存在显著差异 ($P < 0.05$) Different lowercase letters in the same column meant significant difference among treatments with different soil thaw depths and snowmelt flow rates at 0.05 level, and different capital letters in the same row meant significant difference between treatments with and without seepage flow at 0.05 level.

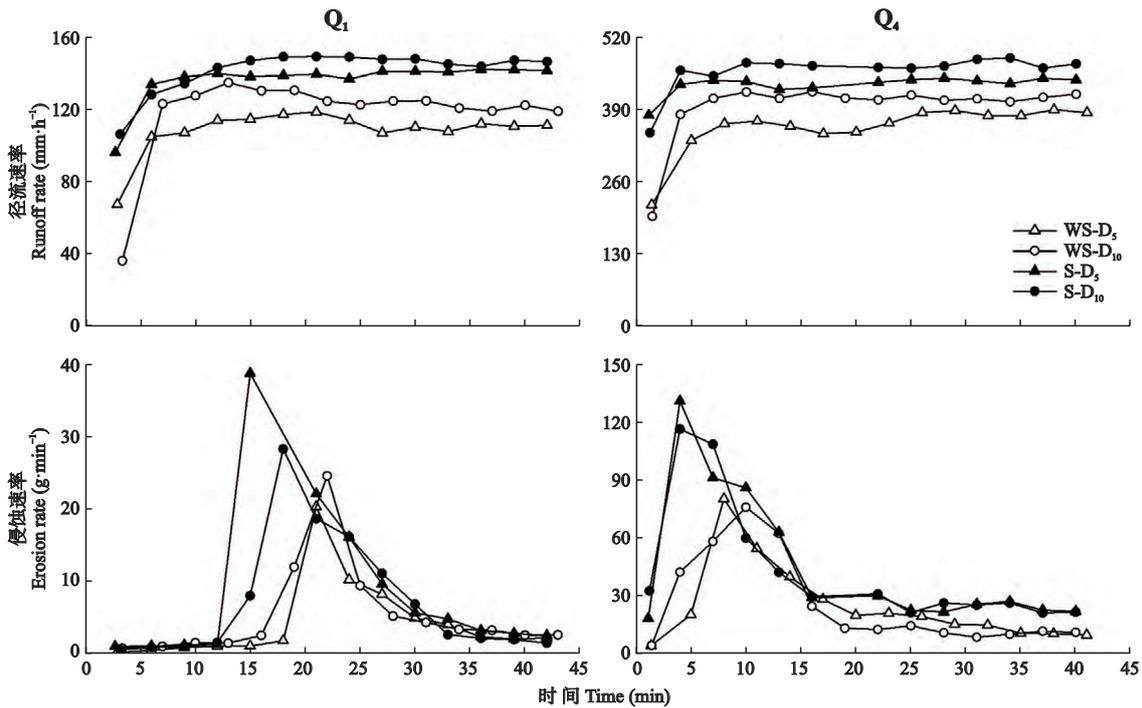


图 1 坡面融雪径流速率和侵蚀速率随时间的变化

Fig.1 Changes of sloping snowmelt runoff rate and erosion rate with experimental duration.

WS: 无壤中流 Without seepage flow; S: 有壤中流 With seepage flow; Q₁: 1 L · min⁻¹ 融雪径流量 1 L · min⁻¹ snowmelt flow rate; Q₄: 4 L · min⁻¹ 融雪径流量 4 L · min⁻¹ snowmelt flow rate; D₅: 5 cm 土壤解冻深度 5 cm soil thaw depth; D₁₀: 10 cm 土壤解冻深度 10 cm soil thaw depth. 下同 The same below.

冻的松散物质被剥蚀,坡面融雪侵蚀速率开始下降;当坡面细沟发育趋于稳定后,坡面融雪侵蚀速率也随之趋于稳定。总体上,在 1 L · min⁻¹ 融雪径流量处理下,坡面融雪侵蚀速率在产流 33 min 后基本稳定;在 4 L · min⁻¹ 融雪径流量处理下,坡面融雪侵蚀速率在产流 20 min 后基本达到稳定(图 1)。

坡面平均融雪侵蚀速率变化范围为 4.3~45.1 g · min⁻¹,随壤中流发生和融雪径流量的增加,坡面平均融雪侵蚀速率成倍增大。坡面融雪径流量为 4 L · min⁻¹、土壤解冻深度为 5 和 10 cm 时,壤中流处理下的坡面平均融雪侵蚀速率分别为 43.0 和 45.1 g · min⁻¹,较无壤中流处理分别增加 1.8 和 1.7 倍。当融雪径流量由 1 L · min⁻¹ 增加至 4 L · min⁻¹ 时,各试验处理下坡面平均融雪侵蚀速率增大 4.8~6.0 倍。

2.3 融雪径流侵蚀过程中坡面细沟侵蚀特征

由表 3 可知,坡面融雪径流产流时间和细沟发生时间随壤中流发生和融雪径流量的增加而缩短,壤中流处理下的坡面融雪径流产流时间和细沟发生时间比无壤中流处理提前 0.18~0.26 min 和 0.66~1.43 min;当融雪径流量从 1 L · min⁻¹ 增加至 4 L · min⁻¹ 时,坡面融雪径流产流时间提前 1.50~1.92 min,细沟发生时间缩短 2.81~3.29 min,表明壤中流

形成和融雪径流量增加均促进了坡面细沟发育。

坡面细沟发育直接影响细沟侵蚀的强烈程度^[26],坡面细沟发生时间提前,导致坡面侵蚀加剧(图 2)。融雪径流量为 1 和 4 L · min⁻¹ 时,壤中流处理下的坡面细沟侵蚀量较无壤中流处理坡面分别增加 40.0%~88.9% 和 43.6%~69.9%;当融雪径流量由 1 L · min⁻¹ 增加到 4 L · min⁻¹ 时,各试验处理下的坡面细沟侵蚀量增加 4.2~5.0 倍。

无论是否有壤中流发生,坡面细沟发生时间随土壤解冻深度的增加而提前(表 3),但土壤解冻深度对细沟侵蚀量的影响较为复杂(图 2)。土壤解冻深度由 5 cm 增加到 10 cm 时,坡面细沟发生时间缩

表 3 不同处理下坡面融雪径流产流和细沟发生时间 Table 3 Time for sloping snowmelt runoff and rill occurrences under different treatments (min)

处理 Treatment	无壤中流 Without seepage flow		有壤中流 With seepage flow	
	融雪产流时间 Time of runoff occurrence	细沟发生时间 Time of rill occurrence	融雪产流时间 Time of runoff occurrence	细沟发生时间 Time of rill occurrence
	Q ₁ -D ₅	2.88	8.00	2.70
Q ₁ -D ₁₀	3.35	7.17	3.13	6.51
Q ₄ -D ₅	1.38	5.00	1.12	3.57
Q ₄ -D ₁₀	1.43	4.36	1.23	3.22

短 0.35~0.83 min;无壤中流处理下坡面细沟侵蚀量增加 11.0%~29.6%,而壤中流条件下两个土壤解冻深度间的细沟侵蚀量无显著差异。

细沟侵蚀对坡面融雪侵蚀有重要作用,细沟侵蚀量占坡面融雪侵蚀量的 72%以上(图 2)。此外,以融雪径流量为 $4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 为例,绘制细沟侵蚀量与坡面融雪侵蚀量随试验历时的变化曲线(图 3),发现两者均呈先迅速增大后趋于稳定的变化趋势,且其增幅趋势一致,即细沟迅速发育的同时坡面融

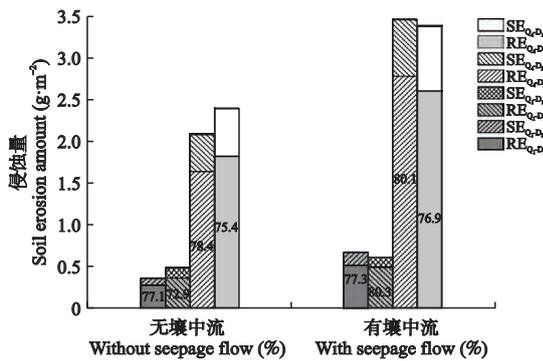


图 2 不同处理下坡面融雪侵蚀量和细沟侵蚀量

Fig. 2 Hillslope snowmelt erosion amount and rill erosion amount under different treatments.

SE: 融雪侵蚀量 Snowmelt erosion amount; RE: 细沟侵蚀量 Rill erosion amount.

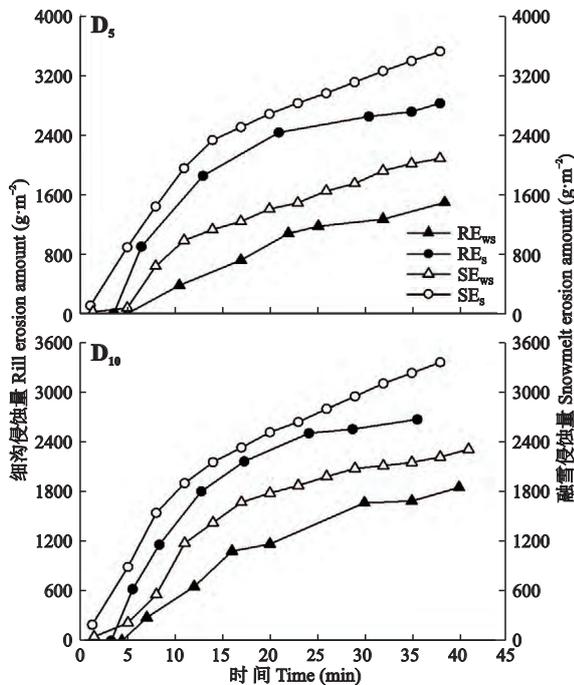


图 3 融雪径流量为 $4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时各处理的细沟侵蚀量和坡面融雪侵蚀量随时间变化

Fig. 3 Changes of rill erosion amount and hillslope snowmelt erosion amount with experimental duration at different treatments under $4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ snowmelt flow rate.

雪侵蚀量的增幅也较大。试验前 20 min,细沟侵蚀速率变化范围为 $48.9 \sim 124.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$,坡面融雪侵蚀速率变化范围为 $70.1 \sim 134.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$;试验后 20 min,坡面细沟侵蚀速率明显下降,坡面融雪侵蚀速率也随之降低,此时,细沟侵蚀速率在 $23.2 \sim 34.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$,坡面融雪侵蚀速率介于 $24.2 \sim 46.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ 之间。

3 讨论

坡面融雪径流侵蚀过程及细沟形态发育在很大程度上受到径流能量的影响^[27],而水力学和水动力学特征是反映径流能量变化的重要指标^[28]。本研究选取坡面水力学和水动力学常用指标径流流速、径流剪切力和 Darcy-Weisbach 阻力系数^[29-30],以细沟发育比较典型的融雪径流量为 $4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的试验为例,分析壤中流和土壤解冻深度影响坡面融雪侵蚀的原因。

3.1 壤中流发生对坡面融雪侵蚀的影响

本研究结果表明,壤中流发生显著增大坡面融雪径流量和侵蚀量。这与前人研究的壤中流发生增加降雨侵蚀的结果一致^[31-33]。与无壤中流试验处理相比,壤中流发生使坡面径流流速和径流剪切力分别增加 20.3%~23.2%和 37.0%~51.3%,而使 Darcy-Weisbach 阻力系数减少 9.0%~21.4%(图 4)。这表明壤中流发生一方面增大了坡面径流侵蚀能力,减小了坡面径流阻力;另一方面,壤中流发生在土壤剖面形成一个向上的托举力^[34],削弱土壤颗粒间的粘结力,增加了坡面径流对土壤颗粒的分散能力,增强了坡面径流侵蚀能力,从而导致坡面融雪侵蚀量增加。此外,壤中流发生也促进了坡面细沟发育,导致细沟侵蚀量增加 43.6%~69.9%,从而加剧了坡面融雪侵蚀。

3.2 土壤解冻深度对坡面融雪侵蚀的影响

对于无壤中流试验处理,当融雪径流量为 $4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 、土壤解冻深度为 10 cm 时,坡面径流流速和径流剪切力较 5 cm 土壤解冻深度分别增加 5.3%和 38.7%,说明随着土壤解冻深度的增加,坡面径流侵蚀能力增强。这可能是无壤中流处理下坡面融雪侵蚀量随土壤解冻深度的增加而增加的直接原因。而范昊明等^[5]研究表明,坡面侵蚀量并不随土壤解冻深度的增加而增加。造成研究结果差异的主要原因是:范昊明等^[5]设计的试验土壤含水量为非饱和含水量,当土壤解冻深度较大时,大量的融雪水入渗到土壤中,从而减少了坡面融雪径流和径流侵蚀能

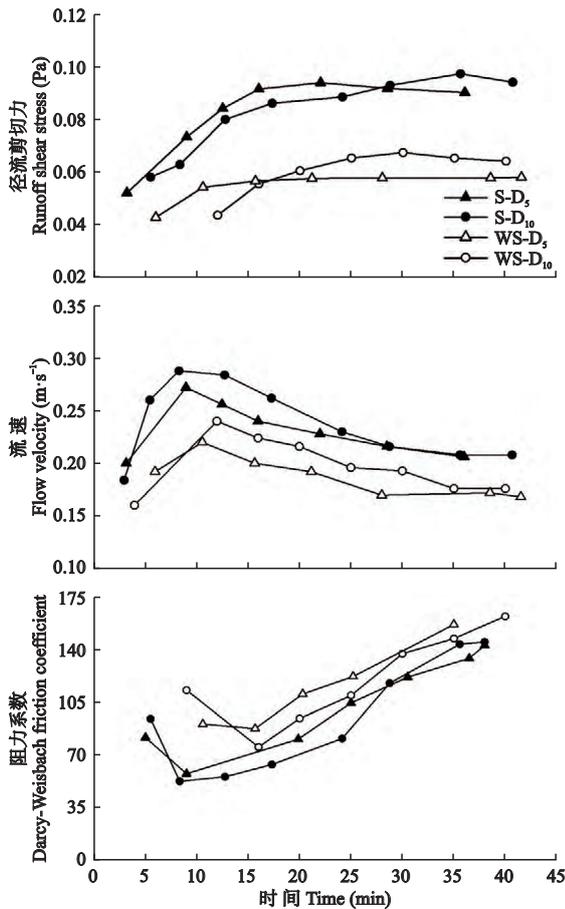


图 4 融雪径流量为 $4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时坡面水流水力学和水动力学参数随时间的变化

Fig.4 Changes of sloping flow hydraulic and hydrodynamic parameters with experimental duration under $4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ snowmelt flow rate.

力;而本试验试供土壤含水量为饱和含水量,随着土壤解冻深度的增加,坡面可蚀性物质增多,因此使坡面融雪侵蚀量增加。

壤中流处理下土壤解冻深度对坡面融雪侵蚀无显著影响的原因可能是:随着土壤解冻深度的增加,坡面径流流速和剪切力无明显差异,从而使 5 和 10 cm 土壤解冻深度下的坡面径流侵蚀能力无显著差异。如融雪径流量为 $4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 、土壤解冻深度为 5 和 10 cm 时,坡面平均径流流速分别为 0.24 和 $0.23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均径流剪切力均为 0.08 Pa。但土壤解冻深度对细沟形态特征有显著影响:壤中流处理下,土壤解冻深度为 5 cm 时,细沟宽深比为 1.3,而土壤解冻深度为 10 cm 时,细沟宽深比为 0.9(表 4)。造成这种差异的原因可能是土壤解冻深度的影响。已有研究表明,下层冻结的不透水层直接影响融雪侵蚀过程^[34-35],当土壤解冻深度较浅时,细

表 4 融雪径流量为 $4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时坡面细沟形态特征

Table 4 Hillslope rill morphology characteristics under $4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ snowmelt flow rate

	土壤解冻深度 Soil thaw depth (cm)	平均沟宽 Average rill width (cm)	平均沟深 Average rill depth (cm)	平均宽深比 Average width-depth ratio
无壤中流 Without seepage flow	5	2.5	2.1	1.3
有壤中流 With seepage flow	10	2.6	2.4	1.1
有壤中流 With seepage flow	5	4.3	3.2	1.3
有壤中流 With seepage flow	10	3.6	4.0	0.9

沟横向加宽作用显著,导致细沟宽深比相对较大;而当土壤解冻深度较大时,细沟下切加深发育的空间增大,导致细沟下切侵蚀作用显著,从而造成细沟宽深比相对较小。

本研究仅探究了壤中流和土壤解冻深度对黑土坡面融雪侵蚀过程的影响,后续将进一步研究土壤解冻深度、壤中流与侵蚀之间的限制关系。

4 结 论

壤中流发生导致坡面融雪径流深度和侵蚀量增加 1.1~1.2 倍和 1.3~1.9 倍,其主要原因是壤中流发生一方面增强了坡面径流侵蚀能力,削弱了径流阻力,从而使坡面融雪侵蚀量增加,如壤中流处理下坡面径流流速和径流剪切力分别增大 20.3%~23.2% 和 37.0%~51.3%,而 Darcy-Weisbach 阻力系数减少 9.0%~21.4%;另一方面,壤中流发生促进坡面细沟发育,导致坡面融雪侵蚀量增加。

无论是否有壤中流处理,当土壤解冻深度由 5 cm 增加到 10 cm 时,坡面融雪径流深度增加 6.5%~13.5%,但坡面融雪侵蚀量的变化存在较大差异,无壤中流处理下坡面融雪侵蚀量增加 15.4%~37.1%,而壤中流处理下坡面融雪侵蚀量无显著变化。随着土壤解冻深度的增加,无壤中流处理下坡面径流侵蚀能力和可蚀性物质来源增加,从而加剧了坡面融雪侵蚀。此外,土壤解冻深度对壤中流处理下细沟形态发育有显著影响,土壤解冻深度为 5 cm 时,细沟横向加宽作用显著;而土壤解冻深度为 10 cm 时,细沟下切侵蚀作用更显著。

坡面细沟发育受壤中流、土壤解冻深度和融雪径流量的综合影响,随壤中流形成、土壤解冻深度和融雪径流量的增加,坡面细沟发生时间缩短。在坡面融雪侵蚀过程中,细沟侵蚀占有重要地位,各处理下细沟侵蚀量占坡面融雪侵蚀量的 72.9%~80.3%。

参考文献

- [1] 张晓平, 梁爱珍, 申艳, 等. 东北黑土水土流失特点. 地理科学, 2006, **26**(6): 687-692 [Zhang X-P, Liang A-Z, Shen Y, *et al.* Erosion characteristics of black soil in northeast China. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, **26**(6): 687-692]
- [2] 韩晓增, 李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望. 地理科学, 2018, **38**(7): 1032-1041 [Han X-Z, Li N. Research progress of black soil in northeast China. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, **38**(7): 1032-1041]
- [3] 景国臣, 任宪平, 刘丙友, 等. 黑龙江省冻融侵蚀形式及其危害. 中国水土保持科学, 2003, **1**(3): 97-102 [Jing G-C, Ren X-P, Liu B-Y, *et al.* Freeze-thaw erosion and harm in Heilongjiang Province. *Science of Soil and Water Conservation*, 2003, **1**(3): 97-102]
- [4] 水利部, 中国科学院, 中国工程院. 中国水土流失防治与生态安全: 东北黑土区卷. 北京: 科学出版社, 2010 [Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Engineering. The Control of Water Losses and Soil Erosion and Ecological Security of China: Mollisols Region of Northeast. Beijing: Science Press, 2010]
- [5] 范昊明, 郭萍, 武敏, 等. 春季解冻期白浆土融雪侵蚀模拟研究. 水土保持通报, 2011, **31**(6): 130-133 [Fan H-M, Guo P, Wu M, *et al.* Simulated snowmelt runoff on Lessive in spring thawing period. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, **31**(6): 130-133]
- [6] Zuzel JF, Allmaras RR, Greenwalt R. Runoff and erosion on frozen soils in northeastern Oregon. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1982, **37**: 351-354
- [7] 侯云晴. 东北黑土漫岗区坡耕地融雪侵蚀特征研究. 硕士学位论文. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019 [Hou Y-Q. Study on Snowmelt Erosion of Hillslope in Snowmelt Period at Black Soil Region of Northeast China. Master Thesis. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019]
- [8] Howard AD, McLane CF. Erosion of cohesionless sediment by groundwater seepage. *Water Resources Research*, 1988, **24**: 1659-1674
- [9] 安娟, 郑粉莉, 李桂芳, 等. 不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对黑土坡面养分流失的影响. 生态学报, 2011, **31**(24): 7579-7590 [An J, Zheng F-L, Li G-F, *et al.* Effect of raindrop impact on nutrient losses under different near-surface soil hydraulic conditions on black soil slope. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(24): 7579-7590]
- [10] 郑粉莉, 张加琼, 刘刚, 等. 东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特征与多营力复合侵蚀的研究重点. 水土保持通报, 2019, **39**(4): 314-319 [Zheng F-L, Zhang J-Q, Liu G, *et al.* Characteristics of soil erosion on sloping farmlands and key fields for studying compound soil erosion caused by multi-forces in mollisol region of Northeast China. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, **39**(4): 314-319]
- [11] 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. 干旱区资源与环境, 2009, **23**(6): 48-53 [Fan H-M, Zhang R-F, Zhou L-L, *et al.* Impact of climate change on freeze-thaw function and freeze-thaw erosion in black soil region of northeast China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, **23**(6): 48-53]
- [12] 焦剑, 谢云, 林燕, 等. 东北地区融雪期径流及产沙特征分析. 地理研究, 2009, **28**(2): 333-344 [Jiao J, Xie Y, Lin Y, *et al.* Study on snowmelt runoff and sediment yields in northeast China. *Geographical Research*, 2009, **28**(2): 333-344]
- [13] 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. 水土保持学报, 2017, **31**(2): 92-96 [Hua W-X, Fan H-M, Xu X-Q, *et al.* Observation on the spring snowmelt erosion of sloping farmland in Northeast China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, **31**(2): 92-96]
- [14] 范昊明, 武敏, 周丽丽, 等. 融雪侵蚀研究进展. 水科学进展, 2013, **24**(1): 146-152 [Fan H-M, Wu M, Zhou L-L, *et al.* Review on snowmelt erosion. *Advances in Water Science*, 2013, **24**(1): 146-152]
- [15] 王平, 李浩, 陈强, 等. 典型黑土区不同尺度观测场地融雪径流. 水土保持通报, 2014, **34**(5): 244-247 [Wang P, Li H, Chen Q, *et al.* Different scale observation sites of snow melt runoff in typical black soil area. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, **34**(5): 244-247]
- [16] Ban YY, Lei TW, Chen C, *et al.* Meltwater erosion process of frozen soil as affected by thawed depth under concentrated flow in high altitude and cold regions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, **42**: 2139-2146
- [17] 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. 土壤通报, 2017, **48**(3): 701-706 [Liu Y-J, Xu X-Q, Fan H-M, *et al.* Rill erosion characteristics on slope farmland of horizontal ridge tillage during snow-melting period in black soil region of northeast China. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, **48**(3): 701-706]
- [18] 闫业超, 张树文, 岳书平. 克拜东部黑土区侵蚀沟遥感分类与空间格局分析. 地理科学, 2007, **27**(2): 193-199 [Yan Y-C, Zhang S-W, Yue S-P. Classification of erosion gullies by remote sensing and spatial pattern analysis in black soil region of eastern Kebai. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, **27**(2): 193-199]
- [19] 范昊明, 武敏, 周丽丽, 等. 草甸土近地表解冻深度对融雪侵蚀影响模拟研究. 水土保持学报, 2010, **24**(6): 28-31 [Fan H-M, Wu M, Zhou L-L, *et al.* Study on sloping land snowmelt erosion affected by thaw depth of near-surface meadow soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **24**(6): 28-31]
- [20] Huang CH, Laften JM. Seepage and soil erosion for a clay loam soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, **60**: 408-416
- [21] Zheng FL, Huang CH, Norton LD. Effects of near-surface hydraulic gradients on nitrate and phosphorus losses in surface runoff. *Journal of Environmental Quality*, 2004, **33**: 2174-2182

- [22] Li G, Abrahams AD, Atkinson JF. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, **21**: 509-515
- [23] Peng XD, Shi DM, Jiang D, *et al.* Runoff erosion process on different underlying surfaces from disturbed soils in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Catena*, 2014, **123**: 215-224
- [24] Foster GR, Huggins LF, Meyer LD. A laboratory study of rill hydraulics. II. Shear stress relationships. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1984, **27**: 797-804
- [25] Zhu JC, Gantzer CJ, Peyton RL, *et al.* Simulated small-channel bed scour and head cut erosion rates compared. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, **59**: 211-218
- [26] 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. *农业工程学报*, 2018, **34**(11): 136-142 [Zhang Y, Zhang H, Li Z-B, *et al.* Process of runoff and sediment yield and relationship between water and sand of frozen soil slope in loess area under different rainfall intensities. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, **34**(11): 136-142]
- [27] 王龙生, 蔡强国, 蔡崇法, 等. 黄土坡面细沟形态变化及其与流速之间的关系. *农业工程学报*, 2014, **30**(11): 110-117 [Wang L-S, Cai Q-G, Cai C-F, *et al.* Morphological changes of rill on loess slope and its relationship with flow velocity. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, **30**(11): 110-117]
- [28] 肖培青, 姚文艺, 申震洲, 等. 草被覆盖下坡面径流入渗过程及水力学参数特征试验研究. *水土保持学报*, 2009, **23**(4): 50-53 [Xiao P-Q, Yao W-Y, Shen Z-Z, *et al.* Study on runoff and infiltration process and hydraulic parameters characteristics with grass coverage. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, **23**(4): 50-53]
- [29] 王瑄, 李占斌, 尚佰晓, 等. 坡面土壤剥蚀率与水蚀因子关系室内模拟试验. *农业工程学报*, 2008, **24**(9): 22-26 [Wang X, Li Z-B, Shang B-X, *et al.* Indoor simulation experiment of the relationship between soil detachment rate and water erosion factor. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, **24**(9): 22-26]
- [30] 丁文斌, 史东梅, 何文健, 等. 放水冲刷条件下工程堆积体边坡径流侵蚀水动力学特性. *农业工程学报*, 2016, **32**(18): 153-161 [Ding W-B, Shi D-M, He W-J, *et al.* Hydrodynamic characteristics of engineering accumulation erosion under side slope runoff erosion process in field scouring experiment. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(18): 153-161]
- [31] Liu G, Zheng FL, Lu J, *et al.* Interactive effects of raindrop impact and groundwater seepage on soil erosion. *Journal of Hydrology*, 2019, **578**: 124066, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124066
- [32] Huang CH. Sediment regimes under different slope and surface hydrologic conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, **62**: 423-430
- [33] Howard AD, McLane CF. Erosion of cohesionless sediment by groundwater seepage. *Water Resources Research*, 1988, **24**: 1659-1674
- [34] 张科利, 刘宏远. 东北黑土区冻融侵蚀研究进展与展望. *中国水土保持科学*, 2018, **16**(1): 17-24 [Zhang K-L, Liu H-Y. Research progresses and prospects on freeze-thaw erosion in the black soil region of Northeast China. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, **16**(1): 17-24]
- [35] McCool DK, Williams JD. Freeze/thaw effects on rill and gully erosion in the northwestern wheat and range region. *International Journal of Sediment Research*, 2005, **20**(3): 202

作者简介 王 伦, 女, 1999 年生, 硕士研究生。主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail: wanglun@nwafu.edu.cn

责任编辑 张科利

责任编辑 张凤丽

王伦, 郑粉莉, 师宏强, 等. 壤中流和土壤解冻深度对黑土坡面融雪侵蚀的影响. *应用生态学报*, 2021, **32**(12): 4177-4185
Wang L, Zheng F-L, Shi H-Q, *et al.* Impacts of seepage flow and soil thaw depth on hillslope snowmelt erosion in Chinese Mollisol region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(12): 4177-4185