

东北黑土区不同坡长条件下融雪侵蚀中的水沙迁移过程

宋子豪^{1,2}, 韩玉国^{1,2}, 王晓学³

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083; 2.北京林业大学山西吉县森林生态系统国家野外
科学观测研究站,北京 100083; 3.中国国际工程咨询有限公司,北京 100048)

摘要: [目的] 为研究东北黑土区横垄坡耕地的融雪侵蚀特征及其影响因素,通过选择黑龙江省牡丹江市麻花沟小流域内相同坡度不同坡长坡耕地进行融雪过程观测,探讨不同坡长径流小区融雪侵蚀特征及变化规律。[方法] 在春季融雪期间,研究 3 种坡长(5、20、100 m)横垄坡耕地的融雪侵蚀过程,分析融雪期间雪深、径流率、含沙量,以及径流总量和泥沙量的变化过程。[结果] 1)积雪深度在融雪期间呈现明显的下降趋势,在融雪中后期下降较快,在融雪初期与融雪末期下降相对缓慢,5、20、100 m 坡长完全融化时间分别为 5、6、6 d。2)融雪过程中,100 m 坡长每日在 9:30 左右开始产流,17:30 左右停止产流;5、20 m 坡长产流时间较晚 1 h 左右,产流结束时间提前 1 h 左右。5、20、100 m 坡长累计产流时间分别为 5、6、7 d。各坡长径流率和含沙量呈先增大后减小的趋势,径流率和含沙量随着坡长的增加而增加,且含沙量峰值相对于径流率滞后约 0~2.0 h。3)在融雪过程中,日径流总量和泥沙量大小为 100 m>20 m>5 m,各小区径流总量和泥沙量变化呈先增大后减小的趋势。[结论] 在融雪过程中,不同坡长条件下积雪深度、产流产沙过程变化规律相似。产流时间、坡面径流率、含沙量、径流总量和泥沙量均随着坡长的增加而增加。对不同坡长条件下横垄坡耕地融雪侵蚀过程的研究,可为东北黑土区坡耕地水土流失的治理提供一定的理论依据。

关键词: 融雪过程; 产流时间; 融雪速率; 泥沙量; 东北黑土区

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2025)03-0034-07

Water and Sediment Transport Processes in Snowmelt Erosion under Different Slope Lengths in the Black Soil Region of Northeast China

SONG Zihao^{1,2}, HAN Yuguo^{1,2}, WANG Xiaoxue³

(1.College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2.National Field Scientific Observation and Research Station of Forest Ecosystem in Jixian County, Shanxi Province, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3.China International Engineering Consulting Corporation, Beijing 100048, China)

Abstract: [Objective] In order to explore the characteristics and influencing factors of snowmelt erosion on contour-ridge farmland in the black soil region of northeast China, a study was carried out to monitor the snowmelt process on farmlands with the same slope gradient but different slope lengths in the Mahuagou small watershed in Mudanjiang City, Heilongjiang Province. The aim was to explore the patterns and dynamics of such erosion process. [Methods] During the spring snowmelt season, the snowmelt erosion process was investigated on contour-ridge farmlands with three distinct slope lengths (5, 20 and 100 m). The changes in snow depth, runoff rates, sediment concentration, total runoff, and sediment yield were analyzed. [Results] 1) Snow depth showed a significant downward trend during the snowmelt period, with a faster decrease in the mid-melt phase, and a relatively slow decrease in the initial and final phases. The complete melting times for slopes of 5, 20 and 100 m length were 5, 6 and 6 days, respectively. 2) During the snowmelt process, the 100 m slope started to produce

收稿日期:2024-11-14

修回日期:2025-01-07

录用日期:2025-01-16

网络首发日期(www.cnki.net):2025-04-02

资助项目:国家自然科学基金项目(52379034)

第一作者:宋子豪(2002—),男,硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail:songzihao2002@126.com

通信作者:韩玉国(1979—),男,博士,教授,主要从事水土流失与面源污染。E-mail:yghan@bjfu.edu.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

runoff around 9:30 every day and stopped around 17:30; the runoff generation times for the 5-m and 20-m slopes were about an hour later, and the runoff generation ended about an hour earlier. The cumulative runoff durations for the 5, 20 and 100 m slopes were 5, 6 and 7 days, respectively. The runoff rate and sediment concentration both initially increased and then decreased, and both increased with increasing slope length, with the peak sediment concentration lagging behind the peak runoff rate by approximately 0 to 2.0 hours. 3) During the snowmelt process, the daily total runoff and sediment yield followed the order of 100 m slope > 20 m slope > 5 m slope, and they both initially increased and then decreased on all slopes. [Conclusion] During the snowmelt process, the patterns of change in snow depth, runoff, and sediment production exhibit similarities across various slope lengths. As slope length increases, there is a corresponding increase in runoff duration, runoff rate, sediment concentration, total runoff, and sediment yield. Investigating the snowmelt erosion process on contour-ridge sloping farmlands with different slope lengths offers valuable theoretical insights for mitigating soil and water loss on sloping farmland in the black soil region of northeast China.

Keywords: snowmelt process; runoff production time; snowmelt rate; sediment yield; black soil region of northeast China

Received: 2024-11-14

Revised: 2025-01-07

Accepted: 2025-01-16

Online(www.cnki.net): 2025-04-02

东北黑土区在保障我国粮食安全和生态保护方面发挥着至关重要的作用,但由于土壤侵蚀和过度开发等原因,导致黑土厚度减少,土壤逐渐沙化,对农业可持续发展造成严重的影响^[1]。东北地区是我国降雪量较大的区域之一^[2],也是积雪覆盖最广泛的农田区域^[3],其坡耕地占耕地总面积的60%左右,坡度通常为3°~5°^[4]。春季的融雪侵蚀是东北黑土区主要的侵蚀方式之一^[5],其主要驱动因素是融雪径流^[6]。融雪过程受到多种条件的影响,比较复杂,涉及积雪的累积和分布,融雪量及融雪速率等因素^[7]。融雪径流通常发生在春季,其水量通常较大且持续时间较长,从而侵蚀搬运土壤和岩石;而降雨的敏感期不固定,与气候条件和地形相关,可能是短暂而强烈的,也可能是持续而温和的,通过雨滴冲击土壤,形成集水和地表流动导致水土流失。目前我国针对春季融雪产流产沙的研究相对较少^[8],特别是在东北地区,然而现有的水文站观测数据尚不足以全面反映融雪过程中的实际情况^[9]。关于不同坡长坡耕地研究主要集中于我国黄土高原地区^[10],且主要是降雨侵蚀。刘祥辉^[11]通过研究东北黑土区不同垄向坡耕地的融雪过程发现,各垄向农田的接收辐射、融雪速率、径流量、解冻深度变化规律相似,横垄径流量峰值相对于其他垄向较晚;谭娟^[6]通过研究不同水土保持措施的融雪试验后发现,地表覆盖度较高的生物措施具有明显的融雪侵蚀防治效果,耕作措施的防治效果最低;而东北黑土区坡长条件对融雪侵蚀特征的影响研究还鲜有报道。坡长不仅涉及地形特

征,还在水土保持、作物栽培、土壤管理及生态保护等多个领域发挥着重要作用,坡度越缓且坡长越长的坡耕地更容易发生水土流失^[12-13]。不同坡长导致坡面径流的汇流时间和汇流面积存在差异,坡长越长,水流在坡面上移动的距离和时间越长,重力作用增强,径流流速加快,从而导致径流量增加,进而对土壤的冲刷能力存在差异,导致径流的泥沙搬运能力和剪切能力不同^[14]。在东北黑土区,现有的土壤侵蚀研究主要聚焦于坡长不超过30 m且采取水土保持措施的黑土坡耕地;而对于该地区超长坡垄作条件下坡面侵蚀过程的研究相对匮乏^[15]。为此,本试验选择小流域内3种不同坡长坡耕地进行试验研究,探讨不同坡长条件对融雪侵蚀过程的影响,并分析不同汇水坡长的产流产沙规律,为东北黑土区不同坡长的融雪侵蚀防治提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省牡丹江市北安乡麻花沟小流域水利科学研究院试验站(44°38′01″~44°38′35″N, 129°35′50″~129°36′03″E)。土壤主要为黑土和草甸土^[16]。气候属于典型温带大陆性气候,该地区多年平均最大积雪深度为24.5 mm,春季融雪期通常为3—4月。

东北地区多为长缓坡地形,坡长较长,坡度较缓,因此基于小流域内垄作方式,选取试验站内平均坡度为4°的3种坡长,分别是5 m短坡长、20 m标准坡长、100 m长坡长的横垄坡耕地作为研究对象。研

究开始前一年秋天,选取阳坡坡面,当地农民收割完玉米后,玉米留茬,在3个不同坡面上从耕地坡顶开始向下布设3种不同处理分别为2 m×5 m、2 m×20 m和2 m×100 m的融雪径流场,每种处理分别布设3次重复;各小区内垄宽42 cm,垄高15 cm,横垄间距为20 cm。布设小区时,在坡耕地沿直线挖出1条深0.2 m、宽0.1 m的细沟,用高为0.4 m的聚乙烯板插入细沟中,围成径流小区,板与板之间连接处紧密相贴,在集流槽的出水处接1个铁管,确保融雪径流产生后能收集到更多的径流。

1.2 试验方法

1.2.1 坡面融雪侵蚀过程观测 本试验在2024年3月初开始进行,气温最高为8℃。在解冻期间,将9个带有刻度的塑料桶(直径0.25 m)放入集水坑中,根据融雪径流的流速来选择每隔1.0或0.5 h收集径流,同时记录产流起始和结束时间。每次收集3 min径流,测量桶内的径流量并计算径流率。产流后将桶内收集的水沙混合样充分搅拌后,用取样瓶装取500 mL统一带回到实验室,静置沉淀24 h,采用烘干法计算其径流含沙量,计算公式为:

C_s = \frac{W_f}{W_o} \tag{1}

式中:C_s为径流含沙量,kg/m³;W_o为水沙混合样的初始重量,kg;W_f为烘干后泥沙样品的重量,kg。

1.2.2 坡面积雪观测 为分析积雪对融雪侵蚀过程的影响,本试验对积雪深度和密度进行观测,观测时间为2024年3月9日—15日。试验步骤具体为:

1)在试验小区内按坡上,坡中和坡下位置上沿等高横垄均匀布设分别选取3个采样点进行观测,融雪期间每日9:00和17:00利用钢尺对雪深进行测量,并记录数据。

2)采用楔形量雪器法计算积雪密度和雪水当量。在融雪过程中,每日上午在小区坡上、坡中、坡下位置沿等高横垄分别选取3个位置采用楔形雪量器(雪铲)进行称重测量。取样前,先将楔形量雪器置于室外冷却,随后在电子秤上称重,读取空盒质量;之后将雪铲沿积雪剖面垂直插入,待雪铲完全插入后停止,再将盖子沿着雪铲长边完全插入积雪中,再将楔形盒和盖子一同取出,称取雪铲和雪样的质量,并计算积雪密度和雪水当量,计算公式为:

\rho = \frac{m_{\text{总}} - m_{\text{空}}}{V} \tag{2}

式中:ρ为积雪密度,g/cm³;m_总为雪铲与雪样的总重,g;m_空为雪铲的质量,g;V为雪铲的体积,cm³。

1.3 数据处理

采用Microsoft Excel 2024软件及Origin 2021软件对试验数据处理分析、表格绘制和绘图,SPSS 18.0软件选用单因素方差分析检验数据显著性。

2 结果与分析

2.1 不同坡长融雪雪深变化特征

积雪融化过程受多种因素的影响,包括温度、地形、土壤类型、周围环境条件及前期的融雪等。本试验融雪过程共历时7 d,各坡长径流小区雪深及其气温随时间变化见表1和图1。各小区雪深变化规律相似,积雪深度在融雪期间呈现明显下降趋势,在融雪中期下降较快,在融雪初期与融雪末期下降相对缓慢。不同坡长小区在3月10日积雪深度变化最大,平均积雪消融深度分别为3.94、5.00、4.90 cm。3月11日各坡长径流率达到最大值,5 m坡长小区雪深变化明显小于100 m坡长,日平均积雪消融深度分别为3.08、3.43、4.43 cm。各坡长积雪完全融化时间也不相同,结果表明,20、100 m积雪第6 d完全融化,5 m坡长第5 d完全融化。通过单因素方差分析结果显示,各坡长之间的融雪深度差异不显著。

表1 融雪期间日气温变化

Table 1 Changes in daily temperature during the snowmelt period

时间	最高气温/℃	最低气温/℃
3月9日	3	−17
3月10日	4	−14
3月11日	7	−8
3月12日	4	−8
3月13日	7	−7
3月14日	8	−3
3月15日	7	−3

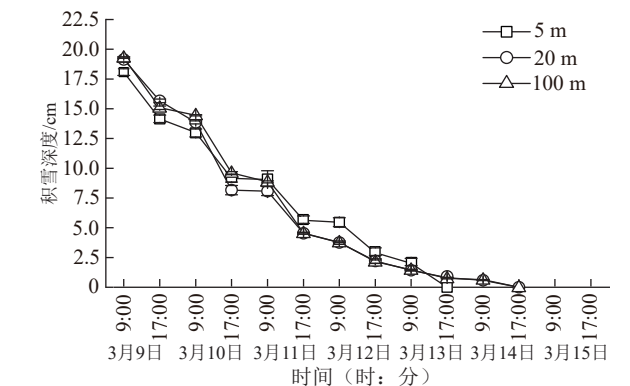


图1 不同坡长平均雪深与气温变化

Fig. 1 Changes in average snow depth and temperature for different slope lengths

2.2 不同坡长对融雪产流过程的影响

不同坡长的坡面产流起始时间和产流结束时间具有差异性,3种坡长每日产流起始时间表现为100 m坡长最早,一般在9:30,日产流结束时间在17:30;5、20 m坡长产流起始时间较晚1 h,产流结束时间提前1 h。5 m坡长坡面累计产流时间最短只有5 d,20、100 m坡长的累计产流时间分别为6、7 d。不同坡长径流率均呈现先增大后减小趋势,且都在中午达到峰值,含沙量峰值滞后于径流率峰值。随着坡长的增加产流时间提前,产流结束时间延长,径流量和含沙量也增加。

通过分析雪水当量变化,将每日的融雪过程分为3个时间段:上午(9:00—12:00)、中午(12:00—15:00)和下午(15:00—18:00)。由图2可知,3月9日上午5、20、100 m开始产流,中午达到峰值,分别为 34.04×10^{-3} 、 131.85×10^{-3} 、 $217.66 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$;下午径流率显著下降,此时100 m坡长含沙量相对于20、5 m坡长来说较大,且变化率也相对较大,5 m坡长含沙量在下午达到峰值0.64 g/L,相对于其径流率峰值滞后1.5 h,20、100 m在中午达到峰值分别为1.20、2.44 g/L,相对滞后1.5、2.0 h。10日各坡面上午开始产流且相对于9日较早,径流率和含沙量峰值也相对较高,并

在中午达到峰值,100 m含沙量峰值相对于径流率峰值滞后1.5 h。11日各小区上午开始产流且产流时间相对延长,径流率急剧增加,在中午达到最大峰值,分别为 45.80×10^{-3} 、 181.70×10^{-3} 、 $678.83 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$,含沙量峰值与径流率峰值同步分别为2.33、2.45、3.75 g/L。随着气温的回升和雪水当量的增加使得融雪过程进入最活跃的阶段,径流逐渐渗透超出土壤的持水能力,导致融雪径流无法继续渗入土壤中,从而产生大量的融雪径流。12日各小区径流率与含沙量峰值同步,径流量峰值相对于前几日降低,含沙量峰值均提高,5 m含沙量于中午达到融雪期峰值4.21 g/L。13日5 m小区开始产流量较小,含沙量大幅度减小,累计产流时间缩短,20 m径流率在含沙量最大的13日相对中期大幅度减小,含沙量在中午达到峰值3.62 g/L,而5、20 m小区含沙量峰值相对于径流率峰值分别滞后1.0、1.5 h,100 m径流率与含沙量峰值同步。14日5 m小区停止产流,20、100 m小区开始产流量较小,径流率中午达到峰值,20 m含沙量峰值滞后1.5 h,100 m含沙量达到最大峰值6.42 g/L。15日只有100 m小区产生少量径流,累计产流时间约4 h,径流率与含沙量中午达到峰值,含沙量滞后约2.0 h。

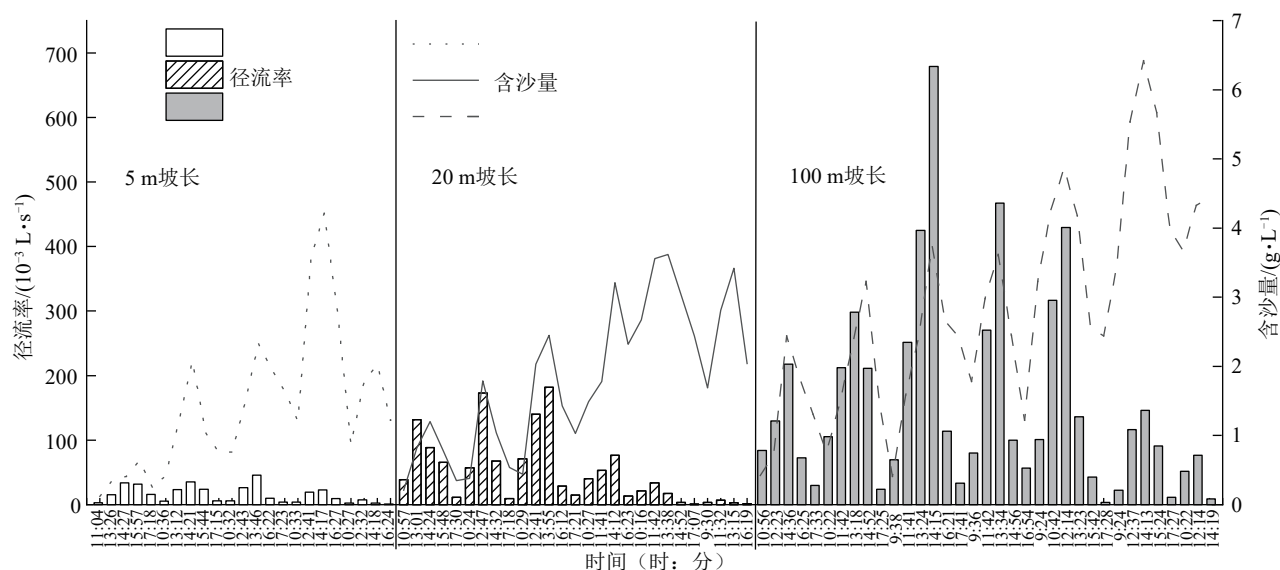


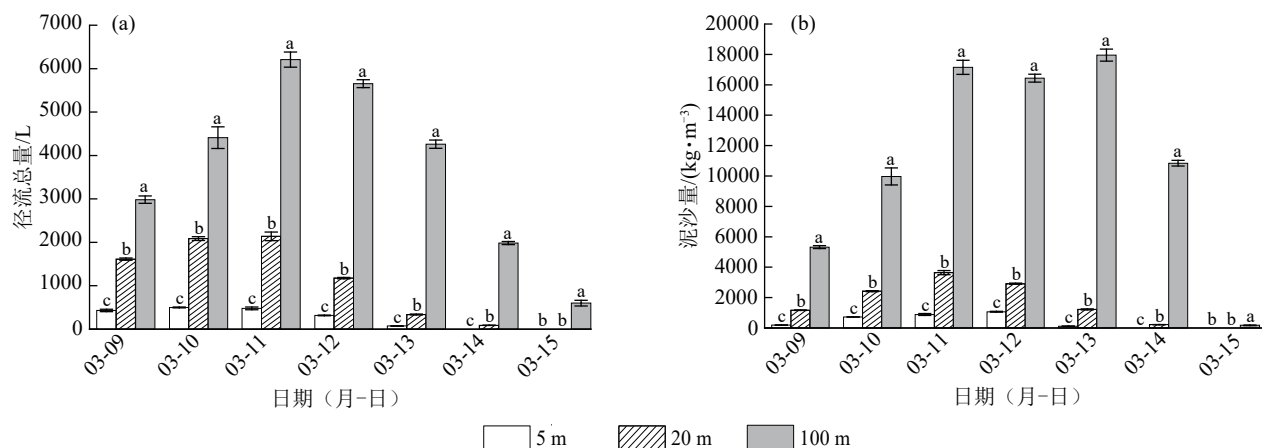
图2 不同坡长融雪侵蚀各阶段变化

Fig. 2 Changes in snowmelt erosion at different stages with different slope lengths

2.3 不同坡长对融雪径流总量和泥沙量的影响

融雪径流总量是指在春季气温升高时,积雪融化所产生的累计产流总量。由图3可知,融雪期间,不同坡长条件下径流总量均呈先增大后减小趋势,且坡长越长,径流总量越大,融雪中期的径流总量最大。泥沙量是衡量坡面土壤流失程度最直观的数

据,其中最主要的影响因素是径流量,各坡长的泥沙量变化呈先增加后减少趋势,且坡长越长,泥沙量越大。泥沙量峰值相对于径流总量峰值滞后,5、100 m坡长均滞后2 d。根据统计分析,5、20、100 m坡长在融雪过程中径流总量和泥沙量之间达到极显著性差异水平。



注:图柱上方不同小写字母表示不同坡长间差异显著($p < 0.05$)。

图3 不同坡长径流总量和泥沙量各阶段变化

Fig. 3 Variations of total runoff and sediment yield at different stages under different slope lengths

3 讨论

3.1 不同坡长平均雪深变化

积雪是融雪侵蚀发生的重要因素,本试验表明,不同坡长的积雪消融规律相似,均在融雪期第2 d达到最大值,之后积雪深度变化逐渐减缓。黄坤琳等^[17]研究表明,积雪在融雪过程中通常先缓慢下降,然后再急速下降,最后逐渐平缓,与本文中不同坡位平均雪深变化规律相似。从宏观尺度看,积雪量主要受气候和海拔高度等地理特征的影响,而坡度、坡向、土地利用、风力、植被性质等因素在较小的空间尺度上均对积雪造成影响^[7]。本研究表明,随着坡长的增加,积雪完全消融时间延长,可能是因为坡长短的区域面积小,阳光直射更集中;长坡上的土壤可能在融雪过程会更快达到饱和状态,导致水分渗透变慢,进而影响积雪融化速率。

3.2 不同坡长对融雪侵蚀过程的影响

坡长是影响融雪速率的关键因素之一,邱璧迎等^[18]研究表明,径流小区内从上坡到下坡的距离是影响融雪速率的重要因素,并且随着坡长的增加,融雪速率相应提高;郭新亚等^[19]研究5种不同坡长条件下土壤侵蚀发现,随着坡长增加坡面产沙量也增加;范昊明等^[20]研究表明,影响土壤侵蚀程度的主要因素是融雪水流量,产流量越大产沙量也越大。目前关于坡长的坡面侵蚀研究^[14]表明,侵蚀强度随着坡长的增加而增强,且随着融雪时间增加,在较大的径流条件下,径流含沙量增加地更快^[21-22]。坡长越长,上坡与下坡位置的距离也越长,汇流时间和汇流面积越大,从而导致上坡融雪径流携带的能量更大,融雪径流具有的势能逐渐增加,所以在融雪过程中形成较大

的径流,该情况容易冲毁垄台形成侵蚀沟,并快速形成新的水流路径,从而使得径流总量增加,因此坡长巨大差异导致的汇流面积差异对产流过程有影响,但东北黑土区多以百米以上长度的缓坡地形为主^[23-24],长坡融雪侵蚀过程更能体现东北黑土区特色。

随着融雪期间气温逐渐升高,土壤解冻深度逐渐增加,在融雪末期达到最大,此时土壤结构更容易被破坏,但流速达到一定程度时才开始引发土壤颗粒的剥蚀和搬运,使得径流能够冲刷携带更多的泥沙,导致融雪末期含沙量和泥沙量增加^[25]。有研究^[26]发现,融雪径流随着昼夜温差发生冻融交替现象。昼融后的水流加上夜间的冻结,可能造成土壤结构的破坏,导致泥沙的流动和侵蚀,进而影响上下坡位的土壤稳定性和水土保持能力。在融雪末期,土壤含水率已经达到饱和,水流在垄沟积聚,延长水流在坡面上的停留时间,白天融化后的液态水可能从侵蚀沟继续向下流动,因此横垄的作用可能被削弱,从而导致径流产生并延长产流时间。本试验仅在1种坡度,1个自然降雪量,3个坡长有限条件下做出研究,尚有不足,需要进一步完善不同坡长的侵蚀规律。

4 结论

1)积雪深度在融雪期间呈明显下降趋势,在融雪中后期下降较快,在融雪初期与融雪末期下降相对缓慢,积雪完全消融时间随着坡长的增加而增加。

2)融雪产流时间受坡长变化影响,汇流面积和汇流时间随着坡长的增加而增加,从而使得径流携带的能量更大,导致产流起始时间提前,累积产流时间延长,不同坡长条件下累积产流时间表现为100 m(7 d) > 20 m(6 d) > 5 m(5 d)。各坡长的径

流率和含沙量规律变化相似,均表现为先增加后减小趋势。各坡在融雪中期主要产流,融雪末期主要产沙,含沙量高峰滞后于径流率高峰0~2.0 h。

3)融雪过程中,不同坡长小区径流总量和泥沙量随时间变化均呈先增大后减小趋势,其中100 m坡长的径流总量和泥沙量最大,5 m最小。泥沙量峰值相对于径流总量峰值出现滞后现象。

参考文献:

- [1] 高燕,谢云,谢凯旋,等.东北黑土区坡耕地界定及坡度分级探索[J].中国水土保持,2024,(9):46-50.
GAO Y, XIE Y, XIE K X, et al. Definition and grading of slope farmland in the black soil area of northeast China [J]. Soil and Water Conservation in China, 2024 (9): 46-50.
- [2] 张淑兰,肖洋,张海军,等.丰林自然保护区3种典型森林类型对降雪、积融雪过程的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):37-41.
ZHANG S L, XIAO Y, ZHANG H J, et al. Influence of three typical forest types on processes of snowfall, snow cover and snow melting in Fenglin national nature reserve[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29 (4): 37-41.
- [3] 陈秀雪,李晓峰,卫颜霖,等.2017—2020年东北典型农田区积雪水热效应数据集[J].中国科学数据(中英文网络版),2022,7(3):106-119.
CHEN X X, LI X F, WEI Y L, et al. A dataset of hydrothermal effect of snow cover in typical farmland of northeast China from 2017 to 2020[J]. Chinese Scientific Data (Online Version in Chinese and English), 2022, 7 (3): 106-119.
- [4] 杨文文,张学培,王洪英.东北黑土区坡耕地水土流失及防治技术研究进展[J].水土保持研究,2005,12(5):232-236.
YANG W W, ZHANG X P, WANG H Y. Study on soil and water loss and prevention technology of sloping land in blackland in the northeast[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(5): 232-236.
- [5] 魏星,陈晓飞,范昊明,等.东北主要旱地耕作土壤冻融环境分析[J].水土保持研究,2009,16(1):39-42.
WEI X, CHEN X F, FAN H M, et al. Freezing-thawing condition of main dryland farming soil areas in northeast China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(1): 39-42.
- [6] 谭娟.东北低山区不同水保措施坡面融雪侵蚀研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2017.
TAN J. Study on snowmelt erosion of slopes on soil and water conservation measures in low mountain area of northeast China [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.
- [7] 范昊明,武敏,周丽丽,等.融雪侵蚀研究进展[J].水科学进展,2013,24(1):146-152.
FAN H M, WU M, ZHOU L L, et al. Review on the snowmelt erosion[J]. Progress in Water Science, 2013, 24 (1): 146-152.
- [8] WU Y Q, ZHENG Q H, ZHANG Y G, et al. Development of gullies and sediment production in the black soil region of northeastern China [J]. Geomorphology, 2008, 101(4): 683-691.
- [9] 焦剑,谢云,林燕,等.东北地区融雪期径流及产沙特征分析[J].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 [J]. Geographical Research, 2009, 28(2): 333-344.
- [10] 贺小容,何丙辉,秦伟,等.不同坡长条件下扰动地表对土壤养分的影响[J].水土保持学报,2013,27(5):154-158.
HE X R, HE B H, QIN W, et al. Effect of disturbance surface on soil nutrient under different slope length [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27 (5): 154-158.
- [11] 刘祥辉.季节性冻融区不同垄向农田融雪过程及融雪径流化学特征研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2019.
LIU X H. Study on snow melting process and chemical characteristics of snow melting runoff in different ridge directions in seasonal freeze-thaw zone [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
- [12] 崔明,蔡强国,范昊明.东北黑土区土壤侵蚀研究进展[J].水土保持研究,2007,14(5):28-32.
CUI M, CAI G Q, FAN H M. Research progress on the soil erosion in black soil region of northeast China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14 (5): 28-32.
- [13] 范昊明,蔡强国,陈光,等.世界三大黑土区水土流失与防治比较分析[J].自然资源学报,2005,20(3):387-393.
FAN H M, CAI G Q, CHEN G, et al. Comparative study of the soil erosion and control in the three major black soil regions in the world [J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(3): 387-393.
- [14] 李虎军.坡长和植被对坡面水土养分流失特征的影响研究[D].西安:西安理工大学,2018.
LI H J. Influence of slope length and vegetation on soil and water loss characteristics of slope surface [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [15] 温云浩,刘铁军,马林芊,等.东北黑土区横垄坡耕地的产流产沙过程[J].水土保持通报,2021,41(6):63-70.

- WEN Y H, LIU T J, MA L Q, et al. Process of flow and sand production at cross-ridge slope land in black soil area of northeast China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 63-70.
- [16] 刘侃. 牡丹江市麻花沟水土保持生态工程优化设计研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2003.
- LIU K. Research of the best effect on soil and water conservation and environment build in Mahua valley of Mudanjiang City [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2003.
- [17] 黄坤琳, 吴国周, 徐维新, 等. 呼伦贝尔东部农田区动态融雪过程及其影响因子 [J]. 干旱区研究, 2024, 41(9): 1514-1526.
- HUANG K L, WU G Z, XU W X, et al. Dynamic snowmelt process and its influencing factors in the eastern farmland region of Hulun Buir [J]. Research on arid regions, 2024, 41(9): 1514-1526.
- [18] 邱璧迎, 范昊明, 武敏, 等. 上坡融雪径流对下坡融雪影响的模拟试验 [J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(5): 72-76.
- QIU B Y, FAN H M, WU M, et al. Simulated slope snowmelt process of the priority runoff from uphill [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2014, 12(5): 72-76.
- [19] 郭新亚, 张兴奇, 顾礼彬, 等. 坡长对黔西北地区坡面产流产沙的影响 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 40-44.
- GUO X Y, ZHANG X Q, GU L B, et al. Impacts of slope length on runoff and sediment in northwest Guizhou [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(2): 40-44.
- [20] 范昊明, 郭萍, 武敏, 等. 春季解冻期白浆土融雪侵蚀模拟研究 [J]. 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 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(6): 130-133.
- [21] SHEN H O, WEN L L, HE Y F, et al. Rainfall and inflow effects on soil erosion for hillslopes dominated by sheet erosion or rill erosion in the Chinese mollisol region [J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(10): 2182-2191.
- [22] 李阳, 张建军, 于洋, 等. 晋西黄土区径流含沙量随坡长变化的试验研究 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(8): 148-155.
- LI Y, ZHANG J J, YU Y, et al. Experimental study on the variation characteristics of runoff sediment concentration with slope length in the loess region of western Shanxi Province of northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(8): 148-155.
- [23] CUI M, CAI G Q, ZHU A X, et al. Soil erosion along a long slope in the gentle hilly areas of blacksoil region in northeast China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2007, 17(3): 375-383.
- [24] XU X Z, XU Y, CHEN S C, et al. Soil loss and conservation in the black soil region of northeast China: A retrospective study [J]. Environmental Science and Policy, 2010, 13(8): 793-800.
- [25] 华文杏. 辉发河流域坡面与流域尺度融雪侵蚀研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- HUA W X. Study on snowmelt erosion of hillslope and watershed scale at Huifa River basin [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.
- [26] 孙海宁, 孙颖娜, 姜宇. 融雪水入渗规律分析及模拟 [J]. 水利科学与寒区工程, 2018, 1(10): 23-28.
- SUN H N, SUN Y N, JIANG Y. Analysis and simulation of infiltration law of snowmelt water [J]. Water Conservancy Science and Cold Region Engineering, 2018, 1(10): 23-28.