

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.04.003

赵娅君, 郑粉莉, 毋冰龙, 等. 冻融作用对黑土坡面融雪、风力和降雨侵蚀的影响研究[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 63-71.

ZHAO Yajun, ZHENG Fenli, WU Binglong, et al. Effects of freeze-thaw action on snowmelt, wind and rainfall erosion in Chinese typical Mollisol Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 63-71.

冻融作用对黑土坡面融雪、风力和降雨侵蚀的影响研究

赵娅君¹, 郑粉莉^{1,2}, 毋冰龙², 潘勋成¹, 郑润禾¹, 赵录友², 王雪松¹, 莫帅豪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: [目的] 研究冻融作用对东北黑土区坡面土壤侵蚀的影响, 可加深对黑土坡面侵蚀过程机理的认识, 并为区域侵蚀治理提供重要科学依据。[方法] 以东北黑土区单一侵蚀营力驱动的融雪、风力和降雨侵蚀为对照, 通过设计冻融-融雪、冻融-风力、冻融-降雨双侵蚀营力叠加的模拟试验, 分析冻融作用对坡面融雪、风力和降雨侵蚀的影响。试验处理包括 1 次冻融作用、2 个融雪径流量(1, 2 L/min)、1 个风速(12 m/s)、1 个降雨强度(100 mm/h)和 1 个坡度(3°)。[结果] (1) 冻融作用显著增加坡面融雪、风力和降雨侵蚀量($p < 0.05$)。与无冻融作用相比, 1 次冻融作用使坡面融雪侵蚀在 1, 2 L/min 融雪径流下分别增加 2 042.9% 和 777.9%, 使风蚀量和降雨侵蚀量分别增加 118.0% 和 74.9%。(2) 冻融作用对坡面水蚀(融雪和降雨侵蚀)过程的影响大于对径流过程的影响, 且加剧坡面侵蚀过程, 使坡面侵蚀活跃期历时增长和侵蚀强度增加; 冻融作用也使风力侵蚀的输沙高度增加 30%, 各高度风蚀输沙量均增加 50% 以上。(3) 冻融作用降低土壤抗侵蚀能力, 其使表层土壤密度、土壤抗剪强度、土壤硬度分别显著减小 2.5%, 22.6%, 15.0%。同时, 冻融作用使水蚀过程中的坡面水流流速平均增加 13.6%~25.0%, 水流剪切力平均增加 2.3%~81.9%, 而阻力系数减小 1.6%~20.6%, 进而加剧坡面侵蚀过程。[结论] 冻融作用改变侵蚀动力与阻力关系, 加剧坡面融雪、风力和降雨侵蚀过程。

关键词: 冻融作用; 融雪侵蚀; 风力侵蚀; 降雨侵蚀; 东北黑土区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0063-09

Effects of Freeze-thaw Action on Snowmelt, Wind and Rainfall Erosion in Chinese Typical Mollisol Region

ZHAO Yajun¹, ZHENG Fenli^{1,2}, WU Binglong², PAN Xuncheng¹, ZHENG Runhe¹,

ZHAO Luyou², WANG Xuesong¹, MO Shuaihao¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming in Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Researches on the effects of freeze-thaw action on slope soil erosion in the Chinese typical Mollisol Region can deepen the understanding of the mechanism of slope erosion process and provide important scientific basis for slope erosion control. [Methods] Using snowmelt, wind and rainfall erosion driven by a single erosion forces as controls, the effects of freeze-thaw on snowmelt, wind and rainfall erosion were analyzed by designing simulation experiments of freeze-thaw-snowmelt, freeze-thaw-wind and freeze-thaw-rainfall in the typical Mollisol Region of China. The experiment treatment consisted one freeze-thaw action, two snowmelt runoff flows (1 and 2 L/min), one wind velocity (12 m/s), one rainfall intensity (100 mm/h) and one slope (3°). [Results] (1) The freeze-thaw effect significantly increased the amount of slope snow melt, wind and rainfall erosion ($p < 0.05$). Compared with no freeze-thaw action, the snowmelt

收稿日期: 2023-12-18

修回日期: 2024-01-14

录用日期: 2024-01-20

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-04-11

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA28010201); 国家自然科学基金项目(42177326)

第一作者: 赵娅君(1998—), 女, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: zhaoyajun19@163.com

通信作者: 郑粉莉(1960—), 女, 教授, 博士, 主要从事土壤侵蚀过程、预报和侵蚀环境效应评价研究。E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

erosion under 1,2 L/min snowmelt runoff increased by 2 042.9% and 777.9%, and the wind and rainfall erosion increased by 118.0% and 74.9%, respectively. (2) The effect of freeze-thaw on the process of water erosion (snowmelt and rainfall erosion) was greater than that on the process of runoff, and the process of slope erosion is aggravated, which increased the duration of active period and the intensity of slope erosion. The freeze-thaw action also increased the sediment transport height of wind erosion by 30%, and the sediment transport amount of wind erosion at each height increased by more than 50%. (3) The freeze-thaw action reduced soil erosion resistance, which significantly reduced surface soil bulk density, soil shear strength and soil hardness by 2.5%, 22.6% and 15.0%, respectively. At the same time, the freeze-thaw effect increased the average flow velocity 13.6%~25.0%, the shear force by 2.3%~81.9%, and the resistance coefficient by 1.6%~20.6%, thus aggravating the slope erosion process. [Conclusion] Freeze-thaw action changed the relationship between erosive dynamics and resistance, and intensified the process of snowmelt, wind and rainfall erosion on slope.

Keywords: freeze-thaw action; snowmelt erosion; wind erosion; rainfall erosion; the Chinese Mollisol region

Received: 2023-12-18

Revised: 2024-01-14

Accepted: 2024-01-20

Online(www.cnki.net): 2024-04-11

东北黑土区每年冬春季节土壤发生强烈的冻融交替作用^[1],土壤的冻融作用伴随着水分的相变,破坏土壤结构和土壤力学性质,进而减弱土壤抗侵蚀能力^[2-3]。已有研究^[4-5]表明,冻融作用主要通过改变土壤可蚀性和地表侵蚀条件影响风蚀和水蚀过程。目前冻融作用对土壤侵蚀的影响研究主要集中在 2 个方面:一是冻融作用对土壤物理力学性质的影响^[6-7],如冻融交替作用导致土壤团聚体的破碎,随冻融循环次数的增加其对土壤结构的破坏能力也随之增大^[8-9];二是冻融作用对坡面土壤侵蚀的影响^[10-11],如冻融作用可显著增加坡面侵蚀量,且侵蚀量随着土壤解冻深度的增加而增加^[12];同时冻融循环也导致土壤风蚀量增加,地表风蚀输沙率增加 1.4 倍^[13]。

众所周知,东北黑土区从南到北每年 3—4 月土壤冻融作用和融雪径流侵蚀同时发生^[14],每年融雪侵蚀后,黑土区风速较大,且此时农田地面裸露和土壤冻融作用尚未完全结束,此条件引起农地风蚀严重^[15-16];近 10 多年随着极端气候事件的增加,黑土区冻融侵蚀后的侵蚀性降雨事件和沙尘事件时有发生^[17-18]。在我国东北黑土区,冻融作用对土壤侵蚀的影响研究也取得明显进展,但目前研究^[19-20]主要集中在冻融作用对坡面降雨侵蚀和土壤风蚀的影响,冻融作用对坡面融雪侵蚀过程的影响研究还鲜有报道,同时目前有关冻融作用影响降雨侵蚀,尤其是风蚀、融雪侵蚀的机理研究仍较薄弱^[14],由此在一定程度上影响农地土壤侵蚀治理的效果。为此,本研究依据东北黑土区冻融作用后可能发生融雪、风蚀、降雨侵蚀的实际情况^[21-23],设计冻融—融雪、冻融—风力、冻融—降雨双侵蚀营力的模拟试验,量化冻融作用对坡面融雪、风力和降雨侵蚀的影响,其研究结果将加深黑

土区复合土壤侵蚀机理的认识,并为坡面土壤侵蚀的精准防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与设备

供试土壤于 2021 年 4 月取自黑龙江省齐齐哈尔市克山县(125°10'57"E—126°08'18",47°50'51"—48°33'47"N)坡耕地 0—20 cm 耕层土壤。吸管法测定的土壤机械组成为黏粒($<2\ \mu\text{m}$)40.6%、粉粒(2~50 μm)48.7%与砂粒(50~2 000 μm)10.7%,重铬酸钾—外加加热法测定有机质含量为 37.0 g/kg,水浸提法测定 pH 为 5.9 左右^[24]。

室内模拟试验于 2022 年 4—8 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中进行。所需试验设备包括试验土槽、冻融设备、融雪汇流装置、风洞设备和降雨设备^[25]。试验所用土槽为自制的多用途试验土槽,长 100 cm、宽 50 cm、深 15 cm,土槽两侧上层 5 cm 钢板可翻折,上端稳流槽和下端集流口可拆卸,根据试验需要拆卸和组装,可同时满足融雪、风力和降雨模拟试验的要求。冻融设备大小为 310 cm(长)×90 cm(宽)×98 cm(深)的大型冰柜,可同时放置 2 个本试验土槽进行冻融试验。融雪设备可供应水温为 0~5 °C 的融雪水,并可调节流量变化范围为 0.5~5 L/min;试验所用的融雪水为冰块融化水,以模拟野外实际的融雪径流^[10]。风洞设备试验段所装皮托管测定风速,土槽下方放置电子天平测定风蚀量;试验土槽后方安装集沙仪,测定 0~60 cm 高度的风蚀输沙量。降雨装置为下喷式单喷头的降雨机,降雨量采用一组侧喷式降雨机,雨滴降落高度为 6.5 m,可使 90% 以上的雨滴达到终点速度。

1.2 试验设计

为模拟东北黑土区冻融作用后可能发生融雪、风蚀及降雨侵蚀情况,本研究以无冻融作用下的融雪、风力和降雨侵蚀作为对照,设计冻融—融雪、冻融—风力、冻融—降雨双侵蚀营力的模拟试验,量化冻融作用对坡面融雪侵蚀、风蚀和降雨侵蚀的影响。具体试验设计包括1次冻融作用、2个融雪流量(1,2 L/min)、1个风速(12 m/s)和1个降雨强度(100 mm/h)和1个坡度(3°),每个试验处理重复2次(表1)。

表1 试验设计

Table 1 The experimental design					
试验处理	侵蚀营力	融雪流量/ (L·min ⁻¹)	风速/ (m·s ⁻¹)	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	试验处理/ (mm·h ⁻¹)
无冻融作用 (对照)	融雪	1,2	—	—	—
	风力	—	12	—	—
	降雨	—	—	100	100
1次冻融 作用	冻融—融雪	1,2	—	—	—
	冻融—风力	—	12	—	—
	冻融—降雨	—	—	100	100

土壤采样区农地耕层的土壤密度为0.91~1.32 g/m³^[26],故试验设计的土壤密度为1.20 g/m³;东北黑土区坡耕地坡度为1°~7°,大多数坡度<5°^[27],故设计的试验坡度为3°。对于冻融模拟试验,根据研究区土壤剖面水分变化情况^[28],东北黑土区春季土壤表层的含水量在20%~30%,故设计冻结前的初始土壤含水量为25.0%,冻结温度为-15℃,冻结历时为36 h,确保试验土槽土壤完全冻结,随后完全冻结的试验土槽在室温下避光解冻。对于融雪侵蚀模拟试验,根据该区近10年平均融雪径流深11.9 mm,1,2 L/min 2个融雪径流量,试验历时60 min^[29]。对于风蚀试验,基于研究区春季风速数据^[30],东北地区的临界起沙风速为8 m/s,本研究设计风速为12 m/s,试验历时为20 min。对于降雨侵蚀试验,基于东北黑土区侵蚀性降雨标准中5 min瞬时雨强为 $I_5=80.4$ mm/h,实测短历时瞬时降雨强度最大值为103 mm/h,本研究设计的降雨强度为100 mm/h,降雨历时60 min^[31]。

1.3 试验步骤

1.3.1 装填土槽 将野外采集的供试土壤去除根系残落物、秸秆等,并将大土块按照其自然节理掰成较小的土块后风干备用。装填试验土槽前,先测定试验土壤含水量,然后根据设计的土壤密度和实测的土壤含水量计算各土层所需要土壤质量;随后对土壤分层喷水,逐步搅拌均匀后静置12 h,最终控制含水量在

25%左右。在装填试验土槽时,采取边填土边压实方法,并每装填4 cm的土层后,用50 cm长的刮板对土层进行刮平,用1 cm长的毛刷抓毛土层表面后再继续填装上1层,防止土层之间出现分层现象,以保证填土的均匀性和整体性。所有试验处理均按此步骤装填土槽。

1.3.2 融雪、风力和降雨单营力侵蚀的模拟试验

(1) 融雪侵蚀模拟试验

为保证融雪侵蚀试验前期土壤含水量条件一致,试验前喷洒雾状水(水温为0~5℃)直至坡面产流,随后将坡度调整为3°,开始融雪侵蚀试验。试验开始后观察坡面径流和侵蚀情况,待坡面产流后记录产流时间并接取首个径流泥沙样,随后每隔3 min收集径流泥沙样。试验期间使用高锰酸钾染色剂法测定坡面水流流速,并用测针测量水深。融雪侵蚀试验历时为60 min。试验结束后将径流泥沙样静置24 h,烘干称重后计算坡面侵蚀量。

(2) 风力侵蚀模拟试验

风蚀模拟试验前,先将装好的试验土槽在室内进行风干处理,风干后表层含水量约为6%,方可进行风蚀试验。风蚀模拟试验前,使用风洞内9根皮托管(距试验土槽表面高度1,3,5,8,10,12,16,20,60 cm)先对风洞内部的风速轮廓线进行率定,使风洞风速与自然近地表条件一致。试验风速以60 cm处皮托管风速为准,当率定风速与设计风速(12 m/s)的误差<5%时即满足要求。试验时将试验土槽放置在试验段,土槽表面与风洞表面相平开始试验,每场风蚀试验历时20 min。风蚀试验前后使用精度0.1 g的风蚀天平称重获取土壤风蚀量。试验段后方设有集沙仪,集沙仪以距地面2 cm为一间隔分别收集0~60 cm不同高度范围内的风蚀颗粒,并称重计算风蚀输沙量。同时使用链条法测定风蚀前后地表粗糙度。

(3) 降雨侵蚀模拟试验

正式降雨试验前,使用30 mm/h雨强进行预降雨至坡面水分饱和,目的是在小雨强下尽可能不破坏土壤坡面土壤结构的同时,保证试验前试验土槽的土壤水分状况一致。预降雨结束后,将降雨强度调整至目标雨强100 mm/h(绝对误差在5%),随后试验土槽坡度调整为3°后开始降雨侵蚀试验。降雨试验开始后观察坡面径流和侵蚀情况,待坡面产流后记录产流时间并接取首个径流泥沙样,随后每隔3 min收集径流泥沙样。试验期间使用高锰酸钾染色剂法测定坡面水流流速,并用测针测量水深和流宽。试验结束后将径流泥沙样静置24 h,烘干称重后计算坡面侵蚀量。

1.3.3 冻融—融雪、冻融—风力、冻融—降雨双营力叠加侵蚀的模拟试验 冻融模拟试验在大型冰柜(310 cm 长、90 cm 宽、98 cm 深)中进行。将装好试验土壤的土槽整体置入冰柜,保持冰柜内部温度-15℃,冻结时间为 36 h,确保试验土壤完全冻结。冻结完成后将土槽放置在室温下避光解冻,解冻历时为 24 h 左右,确保试验土槽完全融化,即为 1 次冻融作用。待试验土槽经历 1 次冻融作用后,依据无冻融作用时的融雪、风力和降雨侵蚀模拟试验,分别进行冻融—融雪、冻融—风力、冻融—降雨双营力叠加的模拟试验,具体试验步骤依次与上述融雪侵蚀、风力侵蚀和降雨模拟试验相同。

1.3.4 土壤物理性质的测定 冻融作用前后测定表层 0—5 cm 土壤密度、0—2 cm 土壤抗剪强度和 0—10 cm 土壤硬度。风蚀前后测定表层粗糙度,风蚀后测定风蚀物质的团聚体组成。土壤密度采用环刀法测定;土壤抗剪强度采用 GEONOR7189 便携式十字板剪切仪测定;土壤硬度采用为 Spectrum SC-900 数显土壤紧实度仪测定^[32];地表粗糙度采用链条法测定;团聚体组成采用干筛法测定,套筛孔径为 5,2,1,0.5,0.25 mm^[33]。

1.4 数据分析

在融雪侵蚀和降雨侵蚀过程中采用染色剂法测定的坡面表面水流流速,然后乘以修正系数获得坡面径流平均流速,计算公式为:

$$V=kV_m \tag{1}$$

式中: V 为坡面径流平均流速(m/s); k 为修正系数,本研究中 k 取 0.75; V_m 为坡面径流最大流速(m/s)。

选取 Darcy—Weisbach 阻力系数(f)、径流剪切力(τ)研究融雪和降雨侵蚀过程的水动力学参数特征^[10],计算公式为:

$$f=\frac{8gRJ}{V^2} \tag{2}$$

$$\tau=\gamma RJ \tag{3}$$

式中: f 为 Darcy—Weisbach 阻力系数; g 为重力加速度,取 9.8 m/s; R 为水力半径(m); J 为水面坡度,用坡面比降近似代替; V 为坡面径流平均流速(m/s); τ 为径流剪切力(N/m²); γ 为水的重度(N/m³); R 为水力半径(m); J 为水面坡度,用坡面比降近似代替。

地表粗糙度测定采用链条法^[32],计算公式为:

$$C_r=\frac{L_1-L_2}{L_2}\times 100 \tag{4}$$

式中: C_r 为地表粗糙度; L_1 为原始链条的长度(mm); L_2 为链条置于坡面后的垂直投影长度(mm)。

2 结果与分析

2.1 冻融作用对坡面融雪、风力和降雨侵蚀量的影响

无冻融作用下坡面融雪、风力和降雨侵蚀量存在明显差异(表 2)。其中,2 L/min 融雪流量下坡面融雪侵蚀量最大,风蚀量和降雨侵蚀量次之,1 L/min 流量下融雪侵蚀的侵蚀量最小。就坡面水蚀(融雪侵蚀和降雨侵蚀)的径流量和侵蚀量对比,1 L/min 融雪产生的坡面径流量与 100 mm/h 降雨产生的下坡面径流量相近,但 1 L/min 融雪产生的坡面侵蚀量远小于 100 mm/h 降雨产生的坡面侵蚀量;而 2 L/min 融雪产生的坡面径流量和侵蚀量分别是 100 mm/h 降雨产生坡面径流量和侵蚀量的 1.5、1.3 倍。

冻融作用显著加剧坡面融雪侵蚀、风蚀和降雨侵蚀($p<0.05$)。冻融作用使 1,2 L/min 流量下的融雪侵蚀量分别增加 2 042.9%和 777.9%,使风蚀量和降雨侵蚀量分别增加 118.0%和 74.9%。此外,对于坡面融雪和降雨侵蚀,冻融作用对坡面水蚀的影响大于对坡面径流的影响,冻融作用使 1,2 L/min 融雪流量下的坡面径流量分别增加 18.0%和 6.7%,使降雨侵蚀的径流量仅增加 2.1%,但冻融作用使融雪侵蚀增加 7 倍以上,使降雨侵蚀增加 74.9%。

表 2 冻融作用对坡面融雪侵蚀、风蚀和降雨侵蚀量的影响

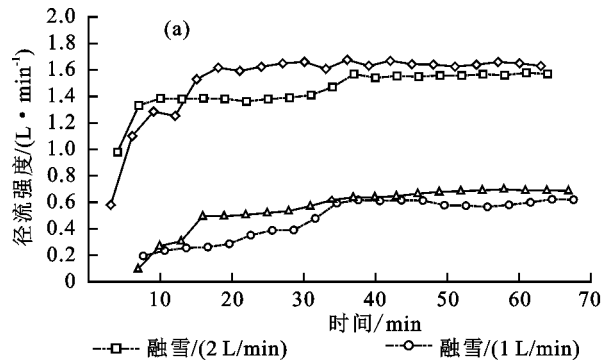
Table 2 Effects of freeze-thaw action on snowmelt, wind, and rainfall erosion amount on slope

侵蚀营力	融雪流量/(L·min ⁻¹)	径流量/(L·min ⁻¹)	径流量增加百分比/%	侵蚀量/(g·m ⁻²)	侵蚀量增加百分比/%
融雪	1	0.50±0.03a	—	11.92±3.99b	—
	2	1.52±0.17a	—	115.44±18.83b	—
风力	—	—	—	79.00±10.06b	—
降雨	—	0.47±0.06a	—	86.11±7.40b	—
冻融—融雪	1	0.59±0.13a	18.0	255.01±23.16a	2 039.3
	2	1.60±0.28a	6.7	1 013.13±123.35a	777.6
冻融—风力	—	—	—	172.19±14.53a	118.0
冻融—降雨	—	0.48±0.75a	2.1	151.14±6.04a	75.5

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示同列未冻融与冻融处理(融雪与冻融—融雪、风力与冻融—风力、降雨与冻融—降雨)间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.2 冻融作用对坡面融雪侵蚀过程的影响

坡面冻融作用对融雪侵蚀过程的影响大于对径流过程的影响(图1)。有、无冻融作用下坡面融雪径流过程基本一致,总体呈现先增加后趋于稳定的趋势。相比1 L/min流量下的融雪径流过程,2 L/min融雪流量下坡面径流增加过程更快,坡面径流到达稳定阶段所需要的时间更短。而有、无冻融作用下融雪



侵蚀过程明显不同。相比于无冻融作用试验处理,冻融作用使坡面融雪侵蚀过程的侵蚀强度均明显增大,达到侵蚀高峰期和产生细沟的时间也明显缩短,2 L/min融雪流量下冻融-融雪侵蚀在汇流初期即表现出较大的侵蚀速率。另外,在有、无冻融作用,融雪流量的增加均增加坡面侵蚀量,而冻融作用导致坡面在较短时间内出现细沟侵蚀,加剧坡面侵蚀过程。

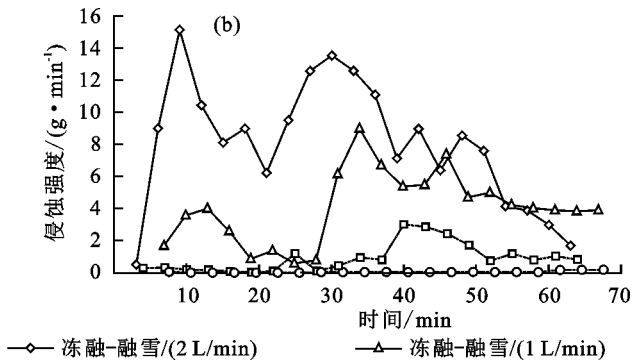


图1 冻融作用对融雪坡面径流过程和侵蚀过程的影响

Fig. 1 Effects of freeze-thaw action on runoff and erosion processes of snowmelt slope

2.3 冻融作用对土壤风蚀过程的影响

与无冻融作用相比,冻融作用显著增加土壤风蚀量和风蚀输沙高度(图2)。无冻融作用下,风力作用下土壤风蚀的最大输沙高度为20 cm,风蚀输沙量多集中在地表0~4 cm高度,其占总风蚀量的64.9%。拟合关系表明仅风力作用下风蚀输沙量(Q)随地表高度(h)增加呈指数减小的趋势,拟合公式为 $Q = 66.24e^{-0.592h}$, $R^2 = 0.9881$ 。与无冻融作用相比,冻融作用使土壤风蚀量增加118.0%,输沙高度从20 cm增加到26 cm,且各高度的输沙量均有所增加,风蚀输沙量与地表高度仍表现出较好的指数关系($Q = 96.20e^{-0.425h}$, $R^2 = 0.9932$)。此外,风蚀作用使得地表粗糙度明显增大,而冻融作用与风力侵蚀叠加作用对地表形态的影响更大,冻融-风蚀后使地表粗糙度较仅风蚀增加12.1%(表3)。

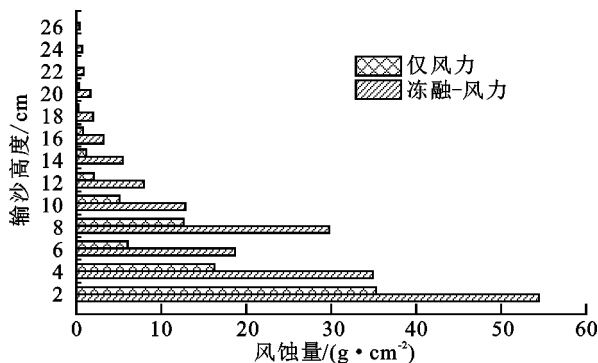


图2 冻融作用对坡面风蚀输沙量的影响

Fig. 2 Effects of freeze-thaw action on sediment transport by wind erosion

2.4 冻融作用对坡面降雨侵蚀过程的影响

与融雪侵蚀相似,冻融作用对降雨侵蚀过程的影响大于对径流过程的影响(图3)。有、无冻融作用下

降雨侵蚀的坡面径流过程基本一致,均呈现先增大后稳定波动的趋势,在降雨30 min左右进入相对稳定阶段。有、无冻融作用下坡面降雨侵蚀过程随降雨历时的增加呈逐渐增加后减小的趋势而冻融作用使降雨侵蚀的侵蚀强度更大,进入产沙活跃期的时间更短,其基本在产流25 min后产沙进入活跃期。

另外,与融雪侵蚀过程相比(图2),降雨侵蚀过程为缓慢增加后减小,融雪侵蚀过程为迅速增加后逐渐减小。融雪侵蚀侵蚀进程快于降雨侵蚀,这可能是因为降雨的侵蚀形式为溅蚀和片蚀,随着雨滴的不断汇集形成固定流路,当细沟形成时侵蚀进入产沙高峰期,而融雪过程是上方薄层水流的快速汇集,自产流开始便观察到细沟发育,细沟发育的时间和过程均有所提前。

表3 有、无冻融作用下风蚀前后地表粗糙度变化

Table 3 Variation of surface roughness before and after wind erosion with and without freeze-thaw action

侵蚀营力	地表粗糙度		
	风蚀前	风蚀后	增加百分比/%
风力	2.11±0.12a	2.52±0.23a	19.4
冻融-风力	1.90±0.15b	2.51±0.17a	31.5

3 讨论

3.1 冻融作用对土壤抗侵蚀能力的影响

冻融作用对土壤物理性质的改变是影响坡面土壤侵蚀过程的重要原因。由表4可知,冻融作用减少土壤密度、土壤抗剪强度和土壤硬度及大团聚体含量($p < 0.05$)。这主要是由于土壤在冻结和融化的过程中水分相态发生变化,导致紧实的土壤变得疏松,土壤大团聚体破碎成为微团聚体,使土壤抗剪强度减小^[34]。这些土壤物理性质的改变降低土壤抗侵蚀能力,进而可能加剧坡面侵蚀过程。

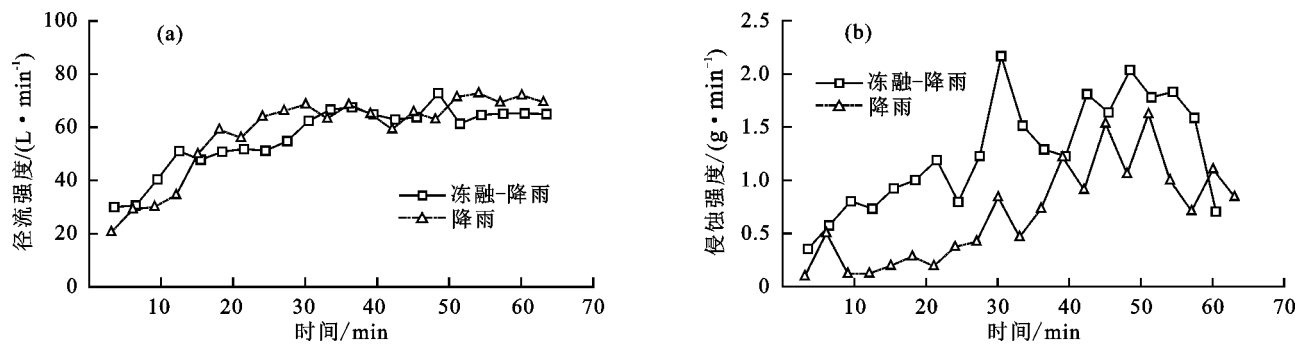


图 3 冻融作用对坡面降雨径流和侵蚀过程的影响

Fig. 3 Effects of freeze-thaw action on rainfall runoff and erosion processes on slope

表 4 冻融作用对土壤抗侵蚀能力指标的影响

Table 4 Effect of freeze-thaw action on soil erosion resistance index

处理	土壤密度/(g·cm ⁻³)	抗剪强度/kPa	土壤硬度/kPa	>1 mm 干团聚体/%
无冻融	1.19±0.13a	24.10±2.01a	448.50±37.40a	43.87±5.2a
1 次冻融	1.16±0.09a	18.66±1.42b	381.98±41.15b	39.91±4.6a
冻融后增幅/%	-2.5	-22.6	-15.0	-9.0

由图 4 可知,在土壤冻结后表面产生一些裂隙,这些裂隙在土壤融化后有所减小,但无法恢复原状。黑土冻融循环作用下土壤微结构研究^[35]表明,土壤中水分凝结成冰晶的冻胀现象导致挤压土壤孔隙,造成孔隙的不断发育,受限于土壤的弹性,土壤水分融化后土体的收缩不足以还原其产生的裂隙,造成不可逆的变化,这种对土壤的破坏可能加快侵蚀过程。本研究表明,1 次冻融作用对土壤结构有明显改变,已有研究^[36]表明,13 次冻融循环后土壤抗剪强度降低 9.2%~13.5%,土壤崩解速率也随冻融循环次数的增加而增加,说明黑土区冻融循环次数对土壤抗侵蚀能力参数有明显影响,这可能加剧冻融作用坡面侵蚀过程的影响。因此,未来有望进一步分析冻融循环次数对坡面融雪侵蚀、风蚀和降雨侵蚀过程的影响。



图 4 冻融作用后坡面形态变化

Fig. 4 Changes of slope morphology after freeze-thaw action

3.2 冻融作用影响坡面融雪和降雨侵蚀的水动力学机制

坡面水流流速是表征土壤剥蚀能力和搬运能力重要的参数^[37],水流沿坡面流动必然受到阻力的影响,进而影响坡面侵蚀能力^[38]。因此,所选用坡面径流剪切力和阻力系分析冻融作用影响坡面水蚀的水动力学机制。

由表 5 可知,冻融作用使融雪侵蚀和降雨侵蚀的坡面水流流速增加 13.6%~25.0%,阻力系数分别减小 1.6%~20.6%,水流平均径流剪切力分别增加 2.3%~81.9%,说明冻融作用在对土壤结构破坏和降低土壤抗侵蚀力的同时,也使坡面水流侵蚀能力和搬运能力增加^[39],进而加剧坡面融雪和降雨侵蚀过程。与融雪侵蚀相比,降雨侵蚀过程中坡面其阻力系数是融雪侵蚀的 6.8~14.5 倍。这可能是造成本研究中冻融作用对融雪侵蚀的影响大于降雨侵蚀的原因。

3.3 冻融作用对坡面抗风蚀性的影响

风蚀过程中土壤颗粒在风力作用下被搬运,一部分堆积在坡下,一部分运移出试验土槽,这导致地表产生风蚀凹痕和条纹(图 5),而冻融作用使地表形态的改变更加明显。此外,风蚀颗粒中>2 mm 的团聚体颗粒几乎不可见,主要为<2 mm 的团聚体(图 6)。其中,0.25~0.5 mm 的团聚体颗粒占到风蚀物质的 50%左右,这与<0.85 mm 粒径的干团聚体为可蚀性颗粒的结果基本一致^[40]。风蚀过程细颗粒的流失导致地表粗化,进而减小土壤肥力^[41],而冻融作用加剧这一过程。冻融作用对团聚体的破碎作用为风蚀提供更多的可蚀性物质,对土壤抗剪强度的降低也使土壤颗粒更易被搬运^[42]。

表 5 有、无冻融作用下坡面融雪和降雨侵蚀过程中水流水动力学参数对比

Table 5 Comparison of hydraulics parameters under snowmelt and rainfall erosion with and without freeze-thaw action

侵蚀营力	融雪流量/(L·min ⁻¹)	平均流速/(m·s ⁻¹)	阻力系数(<i>f</i>)	径流剪切力(τ)	水流功率(ω)
融雪	1	0.12	1.37	2.57	0.32
	2	0.22	0.64	2.70	0.59
降雨	—	0.04	9.34	2.12	0.09
冻融—融雪	1	0.14	1.35	3.53	0.51
	2	0.25	0.45	4.90	1.21
冻融—降雨	—	0.05	8.16	2.11	0.10

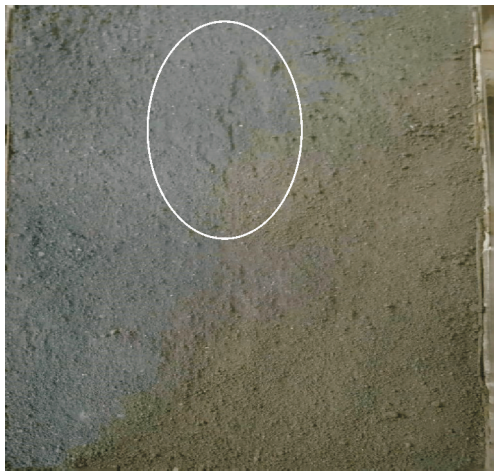


图 5 风蚀后地表形态变化

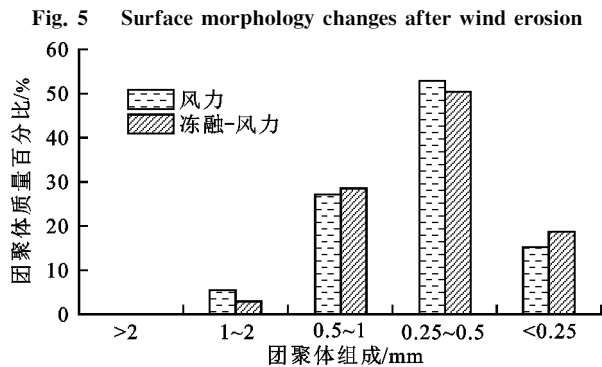


图 6 风蚀颗粒团聚体分布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of wind erosion particles aggregates

4 结论

(1)冻融作用显著加剧坡面融雪、风力和降雨侵蚀的侵蚀量($p<0.05$)。冻融作用其使 1,2 L/min 流量下的融雪侵蚀量增加分别 2 042.9%和 777.9%,使风蚀量和降雨侵蚀量分别增加 118.0%和 74.9%。

(2)对于坡面水蚀(融雪侵蚀和降雨侵蚀),有、无冻融作用下坡面径流过程基本一致,总体呈现先增加后趋于稳定的趋势,而冻融作用使坡面侵蚀过程的侵蚀强度增强,侵蚀活跃期的时长增加。对于土壤风蚀,冻融作用后风蚀输沙高度增加 30%,各高度的风蚀输沙量均增加 50%以上。

(3)冻融作用降低土壤抗侵蚀能力,使土壤密度、土壤抗剪强度、土壤硬度分别减小 2.5%,22.6%,15.0%,使 >1 mm 团聚体含量减小 9.0%。此外,冻融

后坡面水蚀的水流剪切力增加 2.3%~81.9%,阻力系数减小 1.6%~20.6%,进而加剧坡面侵蚀过程。

参考文献:

- [1] 范昊明,蔡强国,王红闪.中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J].水土保持学报,2004,18(2):66-70.
FAN H M, CAI Q G, WANG H S. Condition of soil erosion in Phaeozem Region of Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2004,18(2):66-70.
- [2] LI R, SHI H, FLERCHINGER G N, et al. Simulation of freezing and thawing soils in Inner Mongolia Hetao Irrigation District, China[J].Geoderma,2012,173/174:28-33.
- [3] 王文刚,王彬,顾汪明,等.冻融循环对黑土团聚体稳定性与微结构特征的影响[J].水土保持学报,2022,36(1):66-73.
WANG W G, WANG B, GU W M, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil aggregate stability and micro-structure characteristics of black soil[J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(1):66-73.
- [4] 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.
ZHANG K L, ZHANG H Y. Research progresses and prospects on freeze-thaw erosion in the black soil region of Northeast China[J].Science of Soil and Water Conservation,2018,16(1):17-24.
- [5] 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.
WANG F, FAN H M, GUO J C, et al. Comparison and analysis of climate environmental variation in two main freeze-thaw erosion regions in China[J]. Ecology and Environment, 2008,17(1):173-177.
- [6] 顾汪明,周金星,王彬,等.冻融循环作用对黑土水稳性团聚体特征的影响[J].中国水土保持科学,2020,18(4):45-52.
GU W M, ZHOU J X, WANG B, et al. Effects of freeze-thaw cycle on the characteristics of black soil water-stable aggregates[J].Science of Soil and Water Conservation,2020,18(4):45-52.
- [7] WEI X, HUANG C H, WEI N, et al. The impact of freeze-thaw cycles and soil moisture content at freezing on runoff and soil loss[J].Land Degradation and Development,2019,30(5):515-523.
- [8] 刘绪军,景国臣,杨亚娟,等.冻融交替作用对表层黑土结构的影响[J].中国水土保持科学,2015,13(1):42-46.

- LIU X J, JING G C, YANG Y J, et al. Effects of alternate freezing and thawing on the structure of black topsoil[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(1): 42-46.
- [9] 左小锋, 王磊, 郑粉莉, 等. 冻融循环和土壤性质对东北黑土抗剪强度的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 30-35, 42.
- ZUO X F, WANG L, ZHENG F L, et al. Effects of freeze-thaw cycles and soil properties on mollisol shear strength in Chinese black soil region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2): 30-35, 42.
- [10] 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[J]. *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[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(12): 4177-4185.
- [11] 王一菲, 郑粉莉, 张加琼, 等. 冻融作用对典型黑土土壤风蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 34-41.
- WANG Y F, ZHENG F L, ZHANG J Q, et al. Effects of freeze-thaw on wind erosion in the typical mollisol region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5): 34-41.
- [12] 程圣东, 杭朋磊, 李占斌, 等. 初始解冻深度对冻融坡面侵蚀产沙过程的影响[J]. *西安理工大学学报*, 2018, 34(3): 257-263, 293.
- CHENG S D, HANG P L, LI Z B, et al. Study of the influence of initial thawing depth on the erosion and sediment yield processes on freezing-thawing slope[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2018, 34(3): 257-263, 293.
- [13] LIU T J, XU X T, YANG J. Experimental study on the effect of freezing-thawing cycles on wind erosion of black soil in Northeast China[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2017, 136: 1-8.
- [14] 张瑞芳, 王瑄, 范昊明, 等. 我国冻融区划分与分区侵蚀特征研究[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(2): 24-28.
- ZHANG R F, WANG X, FAN H M, et al. Study on the regionalization of freeze-thaw zones in China and the erosion characteristics [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(2): 24-28.
- [15] 李胜龙, 李和平, 林艺, 等. 东北地区不同耕作方式农田土壤风蚀特征[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(4): 110-118, 220.
- LI S L, LI H P, LIN Y, et al. Effects of tillage methods on wind erosion in farmland of northeastern China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(4): 110-118, 220.
- [16] BAN Y Y, LEI T W, LIU Z Q, et al. Comparative study of erosion processes of thawed and non-frozen soil by concentrated meltwater flow[J]. *Catena*, 2017, 148: 153-159.
- [17] DONG Y F, WU Y Q, QIN W, et al. The gully erosion rates in the black soil region of northeastern China: Induced by different processes and indicated by different indexes[J]. *Catena*, 2019, 182: e104146.
- [18] ZHANG X L, ZHOU Q Q, Chen W W, et al. Observation and modeling of black soil wind-blown erosion from cropland in Northeastern China [J]. *Aeolian Research*, 2015, 19: 153-162.
- [19] 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.
- LIU X Y, ZHANG Z D, ZHANG K L, et al. Effects of freezing and thawing on runoff and sediment yield in the black soil region of Northeast China at different scales [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5): 45-50.
- [20] ZHAO Y, HUANG M B, HORTON R, et al. Influence of winter grazing on water and heat flow in seasonally frozen soil of Inner Mongolia[J]. *Vadose Zone Journal*, 2013, 12(1): e2012.0059.
- [21] 张永光, 伍永秋, 刘宝元. 东北漫岗黑土区春季冻融期浅沟侵蚀[J]. *山地学报*, 2006, 24(3): 306-311.
- ZHANG Y G, WU Y Q, LIU B Y. Ephemeral gully erosion during the spring freeze-thawing period in black soil rolling-hill regions of northeast [J]. *Mountain Research*, 2006, 24(3): 306-311.
- [22] 朱宾宾, 满秀玲, 俞正祥, 等. 大兴安岭北部森林小流域融雪径流特征[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(6): 69-75.
- ZHU B B, MAN X L, YU Z X, et al. Forming process of snowmelt-runoff of forest watershed in northern region of Da Hinggan Mountains [J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition)*, 2016, 40(6): 69-75.
- [23] 赵显波, 刘铁军, 许士国, 等. 季节冻土区黑土耕层土壤冻融过程及水分变化[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(1): 233-240.
- ZHAO X B, LIU T J, XU S G, et al. Freezing-thawing process and soil moisture migration within the black soil plow layer in seasonally frozen ground regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(1): 233-240.
- [24] 平原, 澹腾辉, 李雨晨, 等. 丹江口库区典型小流域生物结皮驱动土壤性质变化及分离响应[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(3): 87-94.
- PING Y, TAN T H, LI Y C, et al. Soil properties change and soil detachment response driven by biocrusts in typical small watershed of Danjiangkou Reservoir Area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(3): 87-94.
- [25] 赵娅君, 郑粉莉, 安小兵, 等. 典型黑土区坡耕地融雪、风力、降雨复合侵蚀效应[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(9): 2421-2428.
- ZHAO Y J, ZHENG F L, AN X B, et al. Compound

- erosion effect of snowmelt, wind, and rainfall on sloping farmlands of Chinese typical Mollisol region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(9): 2421-2428.
- [26] 阎百兴, 杨育红, 刘兴土, 等. 东北黑土区土壤侵蚀现状与演变趋势[J]. 中国水土保持, 2008(12): 26-30.
YAN B X, YANG Y H, LIU X T, et al. Present situation and evolution trend of soil erosion in black soil region of Northeast China[J]. Soil and Water Conservation in China, 2008(12): 26-30.
- [27] 张晓平, 梁爱珍, 申艳, 等. 东北黑土水土流失特点[J]. 地理科学, 2006, 26(6): 687-692.
ZHANG X P, LIANG A Z, SHEN Y, et al. Erosion characteristics of black soils in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(6): 687-692.
- [28] 张科利, 彭文英, 王龙, 等. 东北黑土区土壤剖面地温和水分变化规律[J]. 地理研究, 2007, 26(2): 314-320.
ZHANG K L, PENG W Y, WANG L, et al. Variation of soil temperature and soil moisture on black soil profile in seasonal frozen area of Northeast China[J]. Geographical Research, 2007, 26(2): 314-320.
- [29] 杨鑫, 刘刚, 谢云, 等. 东北黑土区北部典型小流域融雪径流及发生条件分析[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(4): 34-40.
YANG X, LIU G, XIE Y, et al. Analysis of snowmelt runoff and its formation condition in typical small watersheds in the northern black soil region of Northeast China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(4): 34-40.
- [30] 杨新, 郭江峰, 刘洪鹤, 等. 东北典型黑土区土壤风蚀环境分析[J]. 地理科学, 2006, 26(4): 4443-4448.
YANG X, GUO J F, LIU H H, et al. Soil wind erosion environment in black soil region in Northeastern China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(4): 4443-4448.
- [31] 张宪奎, 许靖华, 卢秀琴, 等. 黑龙江省土壤流失方程的研究[J]. 水土保持通报, 1992, 12(4): 1-9, 18.
ZHANG X K, XU J H, LU X Q, et al. A study on the soil loss equation in Heilongjiang Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1992, 12(4): 1-9, 18.
- [32] 左小锋, 郑粉莉, 张加琼, 等. 典型薄层黑土区前期坡面水蚀对土壤风蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 45-53.
ZUO X F, ZHENG F L, ZHANG J Q, et al. Effect of previous sloping water erosion on soil wind erosion in typical thin layered Mollisol region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(12): 45-53.
- [33] 桑琦明, 郑粉莉, 王一菲, 等. 东北黑土区冻融、风力、水力交互作用对坡面侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 87-95.
SANG Q M, ZHENG F L, WANG Y F, et al. An experimental study on freeze-thaw, wind and water agents impacts on hillslope soil erosion in Chinese Mollisol Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 87-95.
- [34] 王恩姮, 赵雨森, 夏祥友, 等. 冻融交替后不同尺度黑土结构变化特征[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6287-6296.
WANG E H, ZHAO Y S, XIA X Y, et al. Effects of freeze-thaw cycles on black soil structure at different size scales[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6287-6296.
- [35] 王文刚, 王彬, 顾汪明, 等. 冻融循环对黑土团聚体稳定性与微结构特征的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 66-73.
WANG W G, WANG B, GU W M, et al. Effect of freeze-thaw cycles on soil aggregate stability and micro-structure of black soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 66-73.
- [36] WANG L, ZOU X F, ZHENG F L, et al. The effects of freeze-thaw cycles at different initial soil water contents on soil erodibility in Chinese Mollisol region[J]. Catena, 2020, 193: e104615.
- [37] 范昊明, 王铁良, 周丽丽, 等. 不同坡形坡面径流流速时空分异特征研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 35-38.
FAN H M, WANG T L, ZHOU L L, et al. Study on temporal and spatial variation of current velocity on different form slopes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(6): 35-38.
- [38] 丁文峰, 李占斌, 丁登山. 坡面细沟侵蚀过程的水动力学特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 72-75.
DING W F, LI Z B, DING D S. Study on hydrodynamic characters of runoff in rill erosion process on slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(3): 72-75.
- [39] 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.
ZHENG F L, XU X M, QIN C. A review of gully erosion process research[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 48-59, 116.
- [40] 郝腾飞, 喻邦江. 粗颗粒含量对砾石土抗剪强度影响的试验研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2018, 29(3): 73-76.
HAO T F, YU B J. Experimental study on the effect of coarse particle content on shear strength of gravel soil[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2018, 29(3): 73-76.
- [41] 张正偲, 董治宝. 土壤风蚀对表层土壤粒度特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(12): 86-89.
ZHANG Z X, DONG Z B. The effect of wind erosion on the surface particle size[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(12): 86-89.
- [42] 刘瑞娟, 李继峰, 冯哲, 等. 风蚀过程中翻耕农田土壤抗剪强度变化[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 112-120.
LIU R J, LI J F, FENG Z, et al. Changes in shear strength of ploughed farmland soil during wind erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 112-120.