东北不同黑土厚度区多营力作用的坡面土壤侵蚀试验研究

何 煦[1]，桑琦明[1]，郑粉莉[1,2]，王一菲[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：量化东北黑土区多种外营力作用的坡面复合土壤侵蚀过程，将为坡面水保措施的精确布置提供重要科学依据。基于野外模拟试验，分析了东北典型薄层黑土区(宾县)、中层黑土区(海伦市)和厚层黑土区(克山县)多营力叠加作用的坡面水蚀特征。野外模拟降雨的试验处理包括仅水蚀的试验处理(Ⅰ)、冻融＋水力叠加作用的试验处理(Ⅱ)和冻融＋风力＋水力叠加作用的试验处理(Ⅲ)。结果表明：与仅有水蚀作用的试验处理相比，冻融作用使典型薄层、中层和厚层黑土厚度区的坡面径流深度分别减小 29.4%，39.3%，32.1%；而其使坡面水蚀量分别增加 16.3%，36.0%，26.3%；冻融和风力叠加作用使 3 个黑土厚度区的坡面径流深度分别减少 3.6%，4.1%，10.8%，而其坡面水蚀量分别增加 38.5%，102.1%，64.1%。试验条件下，从厚层黑土区到中层黑土区再到薄层黑土区，坡面径流深度和坡面侵蚀量均呈增加趋势。冻融作用和冻融＋风力叠加作用对 3 个黑土厚度区坡面水蚀的影响程度从大到小依次皆为海伦黑土＞克山黑土＞宾县黑土。冻融作用使土壤硬度和土壤抗剪强度分别减小 24.4%～36.7%和 21.3%～23.9%，从而使土壤可蚀性增加，导致坡面水蚀量增加。地表在风力作用下形成了不同深度和不同大小的风蚀凹痕微形态，导致坡面径流集中和流速增加 12.4%～19.1%，坡面径流侵蚀能力和搬运能力增加，从而使坡面水蚀量增加。

关键词：不同黑土厚度区；侵蚀营力；叠加作用

中图分类号：S157.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2021)01-0103-07

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.015

An Experimental Study on Impact of Multiples Agent Actions on Sloping Water Erosion in Different Mollic Thickness Regions of Northeast China

HE Xu[1], SANG Qiming[1], ZHENG Fenli[1,2], WANG Yifei[1]

(1.*State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100;
2.*Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi* 712100)

Abstract: Quantifying hillslope soil erosion process will provide an important basis for arrangement of sloping soil and water conservation measures. Thus, a field simulated rainfall experiment was conducted to analyze the effects of freeze-thaw, wind and water agent superposition action on sloping soil erosion in the typical thin mollic thikness region (Binxian county), middle mollic thikness region (Hailun city) and thick mollic thikness region (Keshan county). The experimental treatments included three treatments of only water erosion (Ⅰ), freeze-thaw ＋ water agent superposition action (Ⅱ) and freeze-thaw ＋ wind ＋ water agent superposition action (Ⅲ). The results showed that compared with the experimental treatment of water erosion only, freeze-thaw action decreased runoff depth in the Binxian, Hailun and Keshan mollic thikness regions by 29.4%, 39.3% and 32.1%, respectively; while it increased water erosion rate by 16.3%, 36.0% and 26.3%, respectively. The freeze-thaw and wind agent superposition actions decreased runoff depth in these three mollic thickness regions by 3.6%, 4.1% and 10.8%, respectively, but it increased water erosion rate by 38.5%, 102.1% and 64.1%, respectively. Under the experimental treatments, both sloping runoff depth and water erosion rates tended to increase from the thick mollic thikness region to the middle mollic thikness region and then to the thin mollic thikness region. The effects of freeze-thaw action and freeze-thaw ＋ wind agent superposition actions on sloping water erosion rate among these three different mollic thickness regions were in orders of Hailun Mol-

收稿日期：2020-06-22

资助项目：美丽中国生态文明建设科技工程专项子课题“黑土侵蚀风险评估及坡耕地保土提质技术集成”(XDA23060502)；国家重点研发计划项目“黑土侵蚀防治机理与调控技术”(2016YFE0202900)

第一作者：何煦(1992—)，男，硕士研究生，主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail：hirsi_hx@163.com

通信作者：郑粉莉(1960—)，女，教授，博士生导师，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

lisol > Keshan Mollisol > Binxian Mollisol. The freeze-thaw action reduced soil hardness and soil shear strength by 24.4% ~ 36.7% and 21.3% ~ 23.9%, respectively and increased soil erodibility, thus it increased sloping water erosion rate. The surface wind erosion formed the micro-morphology of wind erosion dent, which enhanced the surface flow concentration and increased flow velocity by 12.4% ~ 19.1%; then runoff depth erosivity and transport capacity were increased, thus sloping water erosion rate increased.

Keywords: different mollic thickness regions; erosion agents; superposition action

东北黑土区是我国重要的商品粮基地,对我国粮生产贡献巨大[1-2]。然而数十年来,黑土资源的过度利用导致土壤有机质含量骤减,黑土层日渐变薄,侵蚀加剧,对我国粮食安全和可持续发展威胁巨大[3-4]。东北黑土区特殊的地理环境使得该区坡耕地的土壤侵蚀特点为多种侵蚀外营力作用的复合侵蚀在时间上的更替和空间上的叠加[5]。晚秋至翌年早春期间,土壤开始发生单向冻结[6],冻胀作用使得坡面土壤颗粒发生位移,晚春土壤解冻作用—融雪径流侵蚀的发生;次后,由于坡耕地土壤裸露,加之春季风速较大(平均风速可达 5.1 m/s),大风天气多,历年春季> 5 级风(≥8 m/s)日数占全年的 41.8%[7],导致风蚀严重。进入雨季后,频繁发生侵蚀性降雨[8],使得坡耕地土壤水蚀严重。因此,冻融—风力—水力在时间和空间的叠加是造成黑土区侵蚀严重的重要原因。

已有研究[9]表明,土壤经过前期冻融作用后更易为侵蚀提供物质来源,冻融作用使得土壤容重降低、孔隙度增大,进而在降雨过程中表现为入渗能力增强,产流滞后[10];但由于冻融作用使土壤结构破坏,而造成坡面土壤侵蚀量增加[11]。此外,土壤冻融后由于土层疏松很容易发生风蚀[12],而风蚀使土壤颗粒粗化[13],以及风蚀作用对地表微地形的改变[14],对后期降雨的侵蚀产生重要影响。目前针对多营力复合作用的土壤侵蚀研究较多关注风水复合侵蚀研究,且主要集中在西北黄土高原风蚀水蚀交错地带[15-16],而对 3 个及以上侵蚀营力相互作用下的坡面侵蚀过程研究非常薄弱[17-19]。基于此,本研究利用野外降雨模拟试验,设计仅水蚀、冻融—水力叠加以及冻融—风力—水力叠加作用的野外模拟试验,分析典型薄层、中层和厚层黑土区冻融、风力、水力的叠加作用对坡面水蚀过程的影响,以期为宝贵黑土资源的防治提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤于 2016 年 10 月上旬分别采自典型东北薄层黑土区的宾县(127°31′—127°34′E,45°43′—45°46′N)、中层黑土区海伦市(126°14′—127°45′E,46°58′—47°52′N)和厚层黑土区克山(125°11′—126°08′E,47°51′—48°34′N)0—20 cm 的耕层土壤,测定的土壤性质见表 1。宾县年平均温度为 4.4 ℃,年降水量 570 mm,无霜期 146 天,黑土层厚度<30 cm,属于典型薄层黑土区。海伦县年平均气温为 1~2 ℃,年降水量为 500~600 mm,全年无霜期 130 天左右,黑土层厚在 30~50 cm,属于典型中层厚度黑土区。克山县年平均温度为 2.4 ℃,年降水量 503 mm,无霜期 122 天,黑土层厚度> 60 cm,属于典型厚层黑土区[20-22],故具有较好的代表性。

表 1 供试土壤性质测定

采样点	土壤粒径组成/%			土壤有机质含量/(g·kg^{-1})
	砂砾(0.05~2 mm)	粉粒(0.002~0.05 mm)	黏粒(<0.002 mm)	
薄层黑土区(宾县)	9.3	61.3	29.4	20.3
中层黑土区(海伦)	6.3	39.2	54.5	37.0
厚层黑土区(克山)	10.7	48.7	40.6	42.1

注:下文中薄层黑土(宾县)、中层黑土(海伦)和厚层黑土(克山)分别简称为宾县黑土、海伦黑土和克山黑土。

野外模拟试验于 2016 年 10 月至 2017 年 7 月在黑龙江省水土保持研究所科技园中进行,试验所用设备主要包括试验土槽和降雨设备。试验土槽规格为 200 cm(长)、50 cm(宽)和 60 cm(深),土槽底部每隔 5 cm 均匀布设有 2 mm 直径的透水孔,从而保证了降雨过程中水分的良好入渗,槽口设置有集流装置以收集径流泥沙。

降雨设备由中国科学院水利部水土保持研究所自主研制的侧喷式人工模拟降雨机,其高度为 7 m,雨滴上喷高度为 1.5 m,故有效降雨高度为 8.5 m。降雨机通过喷头内孔板直径大小控制水泵压力调节降雨强度,其可调节范围为 30~120 mm/h,雨滴粒径及其分布与天然降雨相似,降雨均匀度>85%。野外模拟降雨试验前在土槽表面覆盖防水布,待雨强率定达到目标雨强且稳定后撤掉防水布并用秒表开始计时,从而正式开始野外模拟降雨试验。

1.2 试验设计

黑土区耕层土壤含水量介于 10.0%~20.0%[23-24],野外实测结果也显示,研究区黑土表层 0—2 cm 风干

土含水量介于 9.0%～11.0%,因此设计的表层土壤初始含水量为 10.0%。根据野外调查结果,本试验设计犁底层土壤容重为 1.35 g/cm^3,耕层土壤容重为 1.20 g/cm^3。该区地形主要是漫川漫岗地,坡缓而长,坡度变化大多介于 1°～8°,故试验坡度设计为 5°[25]。此外,导致黑土流失的主要降雨类型为短历时高强度降雨,最大瞬时雨强的标准为 $I_{10}\geqslant 1.72$ mm/min,最长侵蚀性降雨历时接近 1 h[26],因此本研究设计的降雨强度为 50,100 mm/h,降雨历时为 1 h,每个试验处理设计 2 个重复(表 2)。

表 2　试验设计

试验处理	土壤类型	降雨强度/(mm·h^{-1})	坡度/(°)	试验目的
仅水蚀试验(Ⅰ)	宾县薄层黑土	50,100	5	分析坡面水蚀过程(对照)
冻融+水力作用叠加试验(Ⅱ)	海伦中层黑土	50,100	5	分析冻融+水力叠加作用下的坡面侵蚀过程
冻融+风力+水力作用叠加试验(Ⅲ)	克山厚层黑土	50,100	5	分析冻融+风力+水力叠加作用下的坡面侵蚀过程

注:所有试验处理的初始土壤含水量为 10%。

1.3　试验步骤

1.3.1　仅水蚀试验处理(Ⅰ)

(1)将 2016 年 10 月上旬采集的试验土样(包括宾县黑土、海伦黑土和克山黑土)存放在有供暖设备的房间并保证室内温度在 0 ℃以上,以使供试土壤不经历冬季和春季冻融过程。

(2)在次年夏季(2017 年 5—7 月)用未经冻融过程的试验土壤装填试验土槽,装填土槽的过程见 Wang 等[27]的研究方法,其中,填土厚度包括试验土槽底部铺 15 cm 厚的细沙层、细沙上部 20 cm 的模拟犁底层以及模拟犁底层以上 20 cm 的耕层。

(3)进行野外模拟降雨试验,分析无冻融和无风力作用下的坡面水蚀过程。正式降雨试验前先进行降雨强度的率定,当试验降雨强度与设计的目标降雨强度的误差<5%方可正式进行试验。待坡面产流后,每 2～5 min 采集 1 次坡面径流泥沙样,径流泥沙样品在降雨结束后称重。此外,将泥沙样静置 6 h 后倒掉上层清液并转入饭盒中并放入 105 ℃的烘箱烘干后称重。

1.3.2　冻融+水蚀叠加试验处理(Ⅱ)

(1)首先用 2016 年 10 月上旬采集于黑龙江省宾县、海伦市和克山的试验土壤装填试验土槽。

(2)次后将试验土槽用防水塑料布覆盖严实,并使玉米秸秆压盖在塑料布之上,以使试验土槽不发生当年晚秋的风蚀过程和次年融雪侵蚀过程,同时保证试验土槽不受外界风蚀及其他因素影响。

(3)最后在次年晚春早夏(2017 年 4 月下旬至 5 月上旬)进行模拟降雨试验,分析冻融作用对坡面土壤水蚀的影响。

1.3.3　冻融+风力+水蚀叠加试验处理(Ⅲ)

(1)首先用 2016 年 10 月上旬采集于宾县、海伦市和克山的试验土壤装填试验土槽。

(2)将试验土槽全部暴露在自然条件下,使试验土槽经历晚秋风蚀和冬春季冻融－融雪侵蚀过程、以及后期的风蚀过程,以此模拟雨季前试验土壤经历了冻融－风力叠加作用。

(3)最后,于翌年晚春早夏(2017 年 4 月下旬至 5 月上旬)进行野外模拟降雨试验,分析冻融－风力叠加作用对坡面土壤水蚀的影响。

1.4　土壤硬度和土壤抗剪强度的测定

采用 Spectrum SC 900 土壤紧实度仪测定冻融前后 0—2 cm 土层的土壤硬度,采用 GEONOR7189 十字板剪切仪测定冻融前后 0—2 cm 土层的土壤抗剪强度。

1.5　坡面水流流速的测定

降雨过程中坡面径流的流速采用染色剂法进行测定。降雨过程中实际测得的径流流速为坡面最大流速,坡面径流平均流速的取值须根据坡面水流流态将坡面最大流速乘以修正系数[28],计算公式为:

$$V=kV_m$$

式中:V 为坡面径流平均流速(cm/s);V_m 为坡面径流最大流速(cm/s);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 $k=0.67$。

2　结果与分析

2.1　不同黑土厚度区冻融作用对坡面水蚀影响的对比

2.1.1　冻融作用对坡面径流深度和侵蚀量的影响

由于所有试验处理下 50 mm/h 降雨强度在 60 min 降雨过程中均未产生地表径流,因此仅用 100 mm/h 降雨强度下的试验数据进行分析。由表 3 可知,在 100 mm/h 降雨强度和 5°坡度的试验条件下,冻融+水力叠加作用(Ⅱ)下的 3 个黑土厚度区坡面径流深度均小于仅有水蚀的试验处理(Ⅰ)。对于宾县薄层黑土,在仅有水蚀作用处理下的坡面径流深度为 92.3 mm,而在冻融+水力叠加作用下其坡面径流深度较仅有水蚀试验处理减小 29.4%;对于海伦中层黑土,在仅有水蚀作用下的径流深度为 85.5 mm,而在冻融+水力叠加作用下其坡面径流深度较仅有水蚀试验处理减少 39.3%;对于克山厚层黑土,在仅有水蚀作用下的径流深度为 71.6 mm,而在冻融+水力叠加作

用下其坡面径流深度较仅有水蚀试验处理减少 32.1%。对比 3 个黑土厚度区,无论在仅有水蚀作用试验处理还是冻融+水力叠加作用的试验处理下,坡面径流深度大小排序依次均为宾县黑土>海伦黑土>克山黑土。对于仅有水蚀作用的试验处理(I),宾县黑土的坡面径流深度分别较海伦黑土和克山黑土增加 8.0%和 28.9%;对于冻融+水力叠加作用的试验处理(II),宾县黑土的坡面径流深度分别较海伦黑土和克山黑土增加 25.6%和 34.2%。

与坡面径流深度变化相反,在 100 mm/h 降雨强度和 5°坡度的试验条件下,3 个黑土厚度区的坡面侵蚀量在冻融+水力叠加作用试验处理(试验处理 II)下均大于仅有水蚀的试验处理(试验处理 I)。冻融+水力叠加作用下宾县黑土、海伦黑土和克山黑土的坡面侵蚀量分别为 102.5,59.3,51.4 g/m^2,较仅有水蚀作用的坡面侵蚀量分别增加 16.3%,36.0%,26.3%。此外,对比 3 个黑土厚度区,无论是在仅有水蚀作用试验处理还是冻融+水力作用试验处理下,坡面侵蚀量大小排序均表现为宾县黑土>海伦黑土>克山黑土。对于仅有水蚀作用的试验处理(I),宾县黑土的坡面侵蚀量分别较海伦黑土克山黑土增加 102.1%和 92.2%;对于冻融+水力叠加作用的试验处理(II),宾县黑土的坡面侵蚀量分别较海伦黑土和克山黑土增加 72.8%和 99.4%。此结果说明,从厚层黑土区到中层黑土区再至薄层黑土区,坡面径流深度和侵蚀量皆呈增加的趋势。因此,精准实施水土保持措施和确保黑土层不流失对实现黑土资源持续利用有重要意义。

表 3 100 mm/h 降雨强度下不同处理坡面径流深度和侵蚀量对比

土壤类型	降雨强度/(mm·h^{-1})	坡度/(°)	径流深度/mm			侵蚀量/(g·m^{-2})		
			(Ⅰ)	(Ⅱ)	(Ⅲ)	(Ⅰ)	(Ⅱ)	(Ⅲ)
宾县薄层土	100	5	92.3	65.2	89.0	88.1	102.5	122.0
海伦中层土	100	5	85.5	51.9	82.0	43.6	59.3	88.1
克山厚层土	100	5	71.6	48.6	63.9	40.7	51.4	66.8

上述结果说明,对于 3 个黑土厚度区,冻融作用使得坡面径流深度增加,使坡面侵蚀量减小。Wischmeier 等[18]的研究同样表明,冻融作用导致坡面径流深度减小,而侵蚀量增加,这与本研究结果一致。冻融作用导致土壤容重减小,直接影响到土壤可蚀性和入渗性[29-30],使得降雨过程中土壤水分入渗加强,导致坡面径流深度的减小;同时冻融作用还导致土壤抗剪强度降低[31],且土壤经过冻融作用后团聚体中大颗粒破碎、表层细颗粒增多[12,32-33],为水蚀搬运提供了丰富的物质,因而冻融作用造成坡面侵蚀量的剧增。

2.2.2 不同黑土厚度区冻融作用对坡面径流和侵蚀过程影响的对比 由图 1 可知,100 mm/h 降雨强度和 5°坡度的试验条件下,对于冻融+水力叠加作用的试验处理,3 个黑土厚度区的坡面径流速率在整个降雨过程中始终小于仅有水蚀的试验处理。与仅有水蚀的试验处理相比,宾县黑土在冻融+水力叠加作用下的坡面平均径流速率减小 24.8%,海伦黑土的坡面平均径流速率减小 26.6%,克山黑土坡面平均径流速率减小 20.2%。此外,对比 3 个黑土厚度区,发现冻融作用对 3 个黑土厚度区坡面平均径流速率影响程度有所不同。其中,经过冻融作用后海伦黑土的坡面平均径流速率减幅最大(26.6%),其次为宾县黑土(24.8%),而冻融作用对克山黑土的坡面平均径流速率影响最小(减幅为 20.2%)。

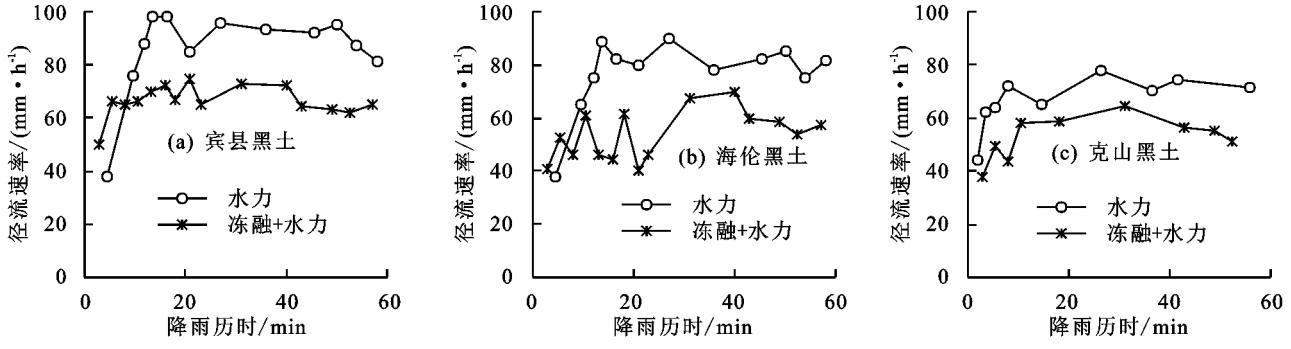

图 1 100 mm/h 降雨强度下冻融作用对 3 个黑土厚度区坡面径流过程的影响

与冻融作用对坡面径流过程的影响不同,在 100 mm/h 降雨强度和 5°坡度的试验条件下,冻融+水力叠加作用试验处理下坡面侵蚀速率在整个降雨过程中始终大于仅有水蚀作用的试验处理(图 2)。冻融+水力叠加作用下宾县黑土、海伦黑土和克山黑土的坡面平均侵蚀速率分别为 1.2,1.1,0.8 g/min,分别较仅有水蚀作用试验处理的坡面平均侵蚀速率增加 20.0%,57.4%,33.3%。此外,冻融作用对 3 个黑土厚度区坡面平均侵蚀速率影响程度从大到小依次为海伦黑土(增加 57.4%)>克山黑土(增加 33.3%)>宾县黑土(增加 20.0%)。

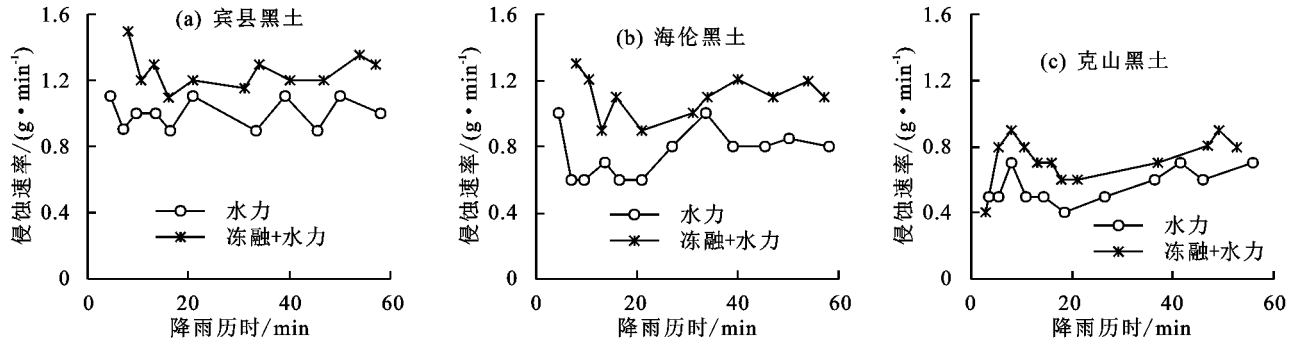

图 2　100 mm/h 降雨强度下冻融作用对 3 个黑土厚度区坡面侵蚀过程的影响

2.2　不同黑土厚度区冻融和风力叠加作用对坡面水蚀影响的对比

2.2.1　*冻融－风力－水力叠加作用对坡面径流深度和侵蚀量影响的对比*　由表 3 可知,在 100 mm/h 降雨强度和 5°坡度的试验条件下,3 个黑土厚度区的坡面径流深度从大到小均表现为仅有水蚀的试验处理(I)＞冻融＋风力＋水力叠加作用的试验处理(III)＞冻融＋水力叠加作用的试验处理(II)。对宾县薄层黑土,冻融＋风力＋水力叠加作用试验处理(Ⅲ)下的坡面径流深度为 89.0 mm,其较仅有水蚀作用试验处理(I)的坡面径流深度减少 3.6%,较冻融＋水力叠加作用试验处理(II)的坡面径流深度增加 36.5%。对于海伦中层黑土,冻融＋风力＋水力叠加作用下的坡面径流深度为 82.0 mm,其较仅有水蚀作用的坡面径流深度减少 4.1%,而较冻融＋水力叠加作用下的坡面径流深度增加 58.0%。对于克山厚层黑土,冻融＋风力＋水力叠加作用下的坡面径流深度为 63.9 mm,其较仅有水蚀作用的坡面径流深度减少了 10.8%,较冻融－水力叠加作用下的坡面径流深度增加 31.5%。此外,在冻融＋风力＋水力的共同作用下(试验处理 III),宾县黑土的坡面径流深度分别较海伦黑土和克山黑土增加 8.5%和 39.3%。

与坡面径流深度变化不同,在 100 mm/h 降雨强度和 5°坡度的试验条件下,3 个黑土厚度区的坡面侵蚀量从小到大均表现为冻融＋风力＋水力叠加作用的试验处理(III)＞冻融＋水力叠加作用试验处理(II)＞仅有降雨的试验处理(I)。对于宾县薄层黑土,冻融＋风力＋水力叠加作用试验处理(III)下的坡面侵蚀量为 122.0 g/m^2,其较仅有水蚀作用试验处理(I)下的坡面侵蚀量增加 38.5%,较冻融＋水力叠加作用试验处理(II)下的坡面侵蚀量增加 22.1%。对于海伦中层黑土,冻融＋风力＋水力叠加作用下的坡面侵蚀量为 88.1 g/m^2,其较仅有水蚀坡面下的侵蚀量增加 102.1%,较冻融＋水力叠加作用下的坡面侵蚀量增加 48.6%。对于克山厚层黑土,冻融＋风力＋水力叠加作用下坡面侵蚀量为 66.8 g/m^2,较仅有水蚀的坡面侵蚀量增加 64.1%,较冻融＋水力叠加作用下的坡面侵蚀量增加 30.0%。

上述结果说明,冻融作用使坡面水蚀量增加,冻融＋风力叠加作用也使坡面水蚀量增加,且其坡面侵蚀量增加幅度大于冻融作用对坡面水蚀的影响,这也可能是东北黑土坡面侵蚀严重的重要原因。此外,从表 2 还可以看出,在 3 个黑土厚度区,冻融作用以及冻融＋风力叠加作用对 3 个黑土厚度区坡面水蚀的影响程度从大到小一次均为海伦黑土＞克山黑土＞宾县黑土。冻融作用一方面使土层疏松,经过冻融后 0－2 cm 表层土壤容重减少了 3.4%～4.2%,为土壤水蚀提供了物质来源;另一方面,冻融作用使表层 0－2 cm 土层的土壤硬度和土壤抗剪强度减少,导致从土壤可蚀性增加,从而使坡面水蚀量增加。土壤硬度和土壤抗剪强度测定表明,冻融作用可使表层土壤硬度和土壤抗剪强度分别减小 24.4%～36.7%和 21.3%～23.9%。

风蚀作用改变了地表粗糙度和地表形态,使坡面径流更加集中和流速增大,从而增加坡面径流连通性和径流侵蚀能力,使坡面水蚀量增加。风蚀试验观测表明,地表风蚀作用在地表形成不同深度和不同大小的风蚀凹痕微形态(图 3),这些风蚀凹痕的形成改变了降雨过程中坡面径流路径,使坡面流速增加。与仅水蚀试验处理相比,冻融＋风力＋水力叠加作用试验处理下的坡面径流平均流速增加 12.4%～19.1%。正是由于地表风蚀作用改变地表形态,使坡面径流更加集中,从而增加了坡面径流的侵蚀能力和搬运能力,导致坡面水蚀量增加。

2.2.2　*不同黑土厚度区冻融＋风力叠加作用对坡面径流和侵蚀过程影响的对比*　由图 4 可知,在 100 mm/h 降雨强度和 5°坡度的试验条件下,3 种试验处理下 3 个黑土厚度区坡面径流速率随降雨历时的变化趋势大致相同,均为先快速增大然后趋于稳定。对于宾县薄层黑土,在冻融＋风力＋水力叠加作用下的坡面平均径流速率为 87.8 mm/h,其较仅有水蚀作用的坡面平均径流速率减小 2.2%,而较冻融＋水力叠加作用下的坡面平均径流速率增加 30.1%;对于海伦中层黑土,在冻

融＋风力＋水力叠加作用下的坡面平均径流速率为76.6 mm/h,其较仅有水蚀作用的坡面平均径流速率减小8.2%,而较冻融＋水力叠加作用下的坡面平均径流速率增加25.2%;对于克山厚层黑土,在冻融＋风力＋水力叠加作用下的坡面平均径流速率为 64.4 mm/h,其较仅有水蚀作用的坡面平均径流速率减小 10.4%,而较冻融＋水力叠加作用下的坡面平均径流速率增加 12.2%。

此外,冻融＋风力＋水力的叠加作用对 3 个黑土厚度区坡面径流速率的影响规律大致相同,但其影响程度有所不同。与仅水蚀作用的试验处理相比,冻融＋风力＋水力叠加作用对克山黑土坡面平均径流速率的影响程度最大(减少 10.4%),而对宾县黑土坡面平均径流速率的影响最小(减少 2.2%);与冻融＋水力叠加作用的试验处理相比,冻融＋风力＋水力叠加作用对宾县黑土坡面平均径流速率影响程度最大(增加 30.1%),而对克山黑土坡面平均径流速率的影响程度最小(增加 12.2%)。

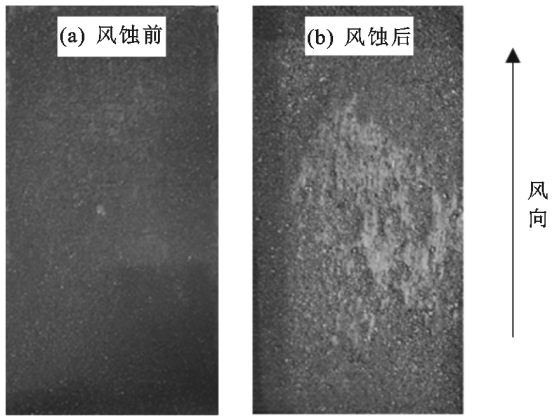

图 3 风蚀前后地表形态的变化

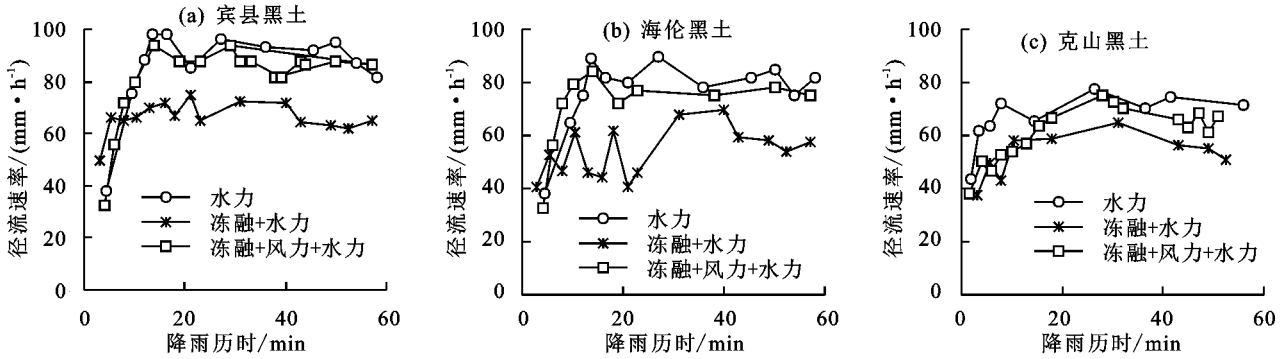

图 4 100 mm/h 降雨强度下 3 种试验处理下坡面径流过程的对比

在 100 mm/h 降雨强度和 5°坡度的试验条件下,3 个黑土厚度区坡面侵蚀速率在整个降雨过程中皆呈现冻融＋风蚀＋水蚀叠加作用的试验处理＞冻融＋水蚀叠加作用的试验处理＞仅有水蚀作用的试验处理(图 5)。对于宾县薄层黑土,在冻融＋风力＋水力叠加作用下的坡面平均侵蚀速率为 1.8 g/min,较仅有水蚀坡面的平均侵蚀速率增大 79.0%,较冻融＋水力叠加作用下的坡面平均侵蚀速率增加 45.5%;对于海伦中层黑土,在冻融＋风力＋水力叠加作用下的坡面平均侵蚀速率为 1.5 g/min,较仅有水蚀的坡面平均侵蚀速率增大 107.0%,较冻融＋水力叠加作用下的坡面平均侵蚀速率增加 44.3%;对于克山厚层黑土,在冻融＋风力＋水力叠加作用下的坡面平均侵蚀速率为 1.1 g/min,较仅有水蚀的坡面平均侵蚀速率增大 87.5%,较冻融＋水力叠加作用下的坡面的平均侵蚀速率增加 40.0%。

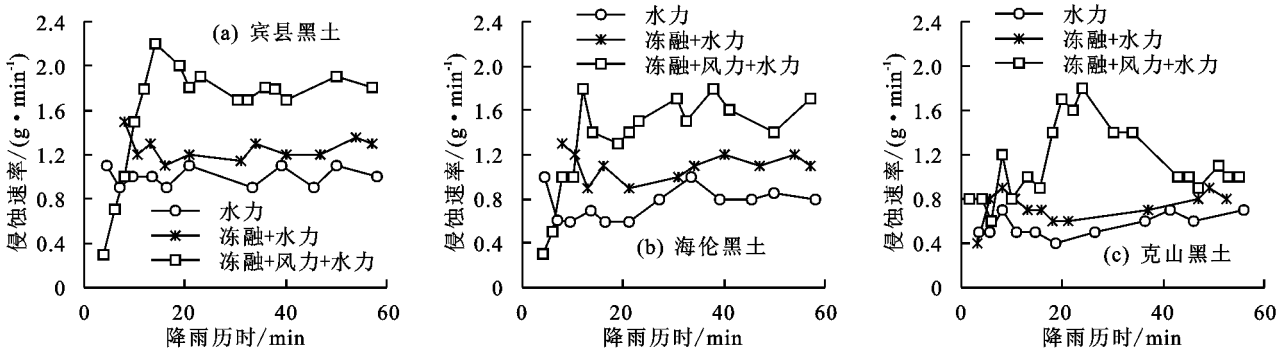

图 5 100 mm/h 降雨强度下 3 种试验处理下坡面侵蚀过程的对比

由图 5 可知,冻融＋风力＋水力叠加作用对 3 个黑土厚度区坡面平均侵蚀速率的影响程度有所不同。与仅水蚀作用的试验处理相比,冻融＋风力＋水力叠加作用对海伦黑土坡面平均侵蚀速率的影响程度最大(增加 107.0%),对宾县黑土坡面平均侵蚀速率的影响程度最小(增加 79.0%);与冻融＋水力叠加作用的试验处理相比,冻融＋风力＋水力叠加作用对宾县黑土坡面平均侵蚀速率的影响程度最大(增加 45.5%),对克山黑土坡面平均侵蚀速率的影响程度最小(增加 40.0%)。

3 结 论

(1)与仅有水蚀的试验处理(I)相比,冻融+水力叠加作用的试验处理(II)和冻融+风力+水力叠加作用的试验处理(III)下 3 个黑土厚度区坡面径流深度均呈减小趋势,而对应的坡面水蚀量则皆呈增加趋势。宾县黑土、海伦黑土和克山黑土经历冻融作用后坡面径流深度分别减小 29.4%,39.3%,32.1%,而其坡面水蚀量则分别增加 16.3%,36.0%,26.3%;冻融+风力叠加作用使宾县黑土、海伦黑土和克山黑土坡面径流深度分别减小 3.6%,4.1%,10.8%,而坡面水蚀量增加 38.5%,102.1%,64.1%。

(2)无论是仅有水蚀的试验处理(I)、冻融+水力叠加的试验处理(II),还是冻融+风力+水力叠加作用的试验处理(III),从厚层黑土区到中层黑土区再至薄层黑土区,坡面径流深度和侵蚀量皆呈增加的趋势。因此,精准实施水土保持措施和确保黑土层不流失对实现黑土资源持续利用有重要意义。

(3)与仅有水蚀的试验处理(I)相比,经过冻融作用后海伦黑土坡面平均径流速率减幅最大(26.6%),其次为宾县黑土(24.8%),而以克山黑土减幅最少(20.2%);冻融作用对 3 个黑土厚度区坡面平均侵蚀速率影响程度从大到小依次为海伦黑土(增加 57.4%)>克山黑土(增加 33.3%)>宾县黑土(增加 20.0%)。冻融+风力+水力叠加作用下克山黑土坡面平均径流速率的减幅最大(10.4%),其次为海伦黑土(8.2%),而以宾县黑土坡面平均径流速率的减幅最小(2.2%)。冻融+风力叠加作用对 3 个黑土厚度区坡面水蚀影响程度从大到小依次为海伦黑土(增加 107.0%)>克山黑土(增加 87.5%)>宾县黑土(增加 79.0%)。

(4)冻融作用一方面使土层疏松,为土壤水蚀提供了物质来源,另一方面冻融作用使土壤硬度和土壤抗剪强度减少分别减小 24.4%~36.7%和 21.3%~23.9%,土壤可蚀性增加,从而导致坡面水蚀量增加。风蚀作用在地表形成不同深度和不同大小的风蚀凹痕微形态,使坡面径流集中和流速增加 12.4%~19.1%,从而增加了坡面径流侵蚀能力,导致坡面水蚀量增加。

参考文献:

[1] Wang Z Q, Liu B Y, Wang X Y, et al. Erosion effect on the productivity of black soil in Northeast China [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009,52(7): 1005-1021.

[2] 桑琦明,王磊,郑粉莉,等.东北黑土区坡耕地斜坡垄作与顺坡垄作土壤侵蚀对比分析[J].水土保持学报,2020,34(3):73-78.

[3] 雷国平,代路,宋戈.黑龙江省典型黑土区土壤生态环境质量评价[J].农业工程学报,2009,25(7):243-248.

[4] 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.

[5] 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[J].水土保持通报,2019,39(4):314-319.

[6] 王一菲,郑粉莉,周秀杰,等.黑土农田冻结-融化期土壤剖面温度变化特征[J].水土保持通报,2019,39(3):57-64.

[7] 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.

[8] 水利部.中国水土流失防治与生态安全:东北黑土卷[M].北京:科学出版社,2010.

[9] 魏霞,李勋贵,Huang C H. 交替冻融对坡面产流产沙的影响[J].农业工程学报,2015,31(13):157-163.

[10] 李占斌,李社新,任宗萍,等.冻融作用对坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持学报, 2015,29(5):56-60.

[11] Kværnø S H, Øygarden L. The influence of freeze-thaw cycles and soil moisture on aggregate stability of three soils in Norway [J].Catena,2006,67:175-182.

[12] 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.

[13] 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.

[14] Tuo D F, Xu M X, Gao L Q, et al. Changed surface roughness by wind erosion accelerates water erosion[J]. Journal of Soils and Sediments,2016,16(1):105-114.

[15] 张加琼,刘章,杨明义,等.黄土高原水蚀风蚀交错带坡面土壤侵蚀特征及其影响因素[J].水土保持研究,2018,25(1):1-6,22.

[16] Huo Z, Shao M A, Horton R. Impact of gully on soil moisture of shrubland in wind-water erosion crisscross region of the Loess Plateau [J]. Pedosphere, 2008, 18(5):674-680.

[17] Zhang Y G, Wu Y Q, Liu B Y, et al. Characteristics and factors controlling the development of ephemeral gullies in cultivated catchments of black soil region, Northeast China [J].Soil and Tillage Research, 2007, 96(1/2):28-41.

[18] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]. Agriculture Handbook No. 537. Washington: United States Department of Agriculture, 1978:5-8.

[19] 孙宝洋,李占斌,肖俊波,等.冻融作用对土壤理化性质及风水蚀影响研究进展[J].应用生态学报,2019,30(1):337-347.

[20] 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.

(下转第 115 页)

[14] Li H, Liu L, Liu X C, et al. Greening implication inferred from vegetation dynamics interacted with climate change and Human activities over the southeast Qinghai-Tibet Plateau [J]. Remote Sensing, 2019, 11(20):e2421.

[15] Li H, Liu L, Shan B Y, et al.Spatiotemporal variation of drought and associated multi-scale response to climate change over the Yarlung Zangbo River Basin of Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Remote Sensing, 2019,11(13):e1596.

[16] 龚志强,封国林,万仕全,等.基于启发式分割算法检测华北和全球气候变化的特征[J].物理学报,2006,55(1):477-484.

[17] 黄生志,杜梦,李沛,等.变化环境下降雨集中度的变异与驱动力探究[J].水科学进展,2019,30(4):496-506.

[18] 封国林,龚志强,董文杰,等.基于启发式分割算法的气候突变检测研究[J].物理学报,2005,54(11):5494-5499.

[19] Chen T X, Zhang H X, Chen X, et al. Robust drying and wetting trends found in regions over China based on Köppen climate classifications [J].Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2017,122(8):4228-4237.

[20] Zarch M A, Sivakumar B, Sharma A. Assessment of global aridity change[J].Journal of Hydrology,2015,520:300-313.

[21] 刘贤赵,李嘉竹,宿庆,等.基于集中度与集中期的径流年内分配研究[J].地理科学,2007,27(6):791-795.

[22] 刘剑,姚治君,陈传友.雅鲁藏布江径流变化趋势及原因分析[J].自然资源学报,2007,22(3):471-477.

[23] Curio J, Scherer D. Seasonality and spatial variability of dynamic precipitation controls on the Tibetan Plateau [J].Earth System Dynamics,2016,7(3):767-782.

[24] Zhu Z C, Piao S L, Myneni R B, et al. Greening of the earth and its drivers [J].Nature Climate Change,2016,6(8):791-795.

(上接第 109 页)

[21] 崔明,张旭东,蔡强国,等.东北典型黑土区气候、地貌演化与黑土发育关系[J].地理研究,2008,27(3):527-535.

[22] 刘丽.黑龙江省黑土有机碳的研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2010.

[23] 王彬.土壤可蚀性动态变化机制与土壤可蚀性估算模型[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.

[24] 李俊伟,佟金,胡斌,等.不同含水率黏重黑土与触土部件互作的离散元仿真参数标定[J].农业工程学报,2019,35(6):130-140.

[25] 李桂芳,郑粉莉,卢嘉,等.降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J].农业机械学报,2015,46(4):147-154.

[26] 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.

[27] Wang L, Zheng F L, Zhang X J, et al. Discrimination of soil losses between ridge and furrow in longitudinal ridge-tillage under simulated upslope inflow and rainfall [J].Soil and Tillage Research, 2020,198:e104541.

[28] Li G, Abrahams A D, Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow [J].Earth Surface Processes and Landforms, 1996,21(6):509-515.

[29] Gatto L W. Soil freeze-thaw-induced changes to a simulated rill: potential impacts on soil erosion [J].Geomorphology,2000,32(1):147-160.

[30] 刘帅,于贵瑞,浅沼顺,等.蒙古高原中部草地土壤冻融过程及土壤含水量分布[J].土壤学报,2009,46(1):46-51.

[31] 范昊明,钱多,周丽丽,等.冻融作用对黑土力学性质的影响研究[J].水土保持通报,2011,31(3):81-84.

[32] Lehrsch G A, Sojka R E, Carter D L, et al. Freezing effects on aggregate stability affected by texture, mineralogy, and organic matter: Reply [J]. Soil Science Society of America Journal,1992,56(5):1659-1659.

[33] Zhang Z, Ma W , Feng W J, et al. Reconstruction of soil particle composition during freeze-thaw cycling: A review [J].Pedosphere,2016,26(2):167-179.