

东北黑土区横垄坡耕地的产流产沙过程

温云浩¹, 刘铁军², 马林芊¹, 王立新¹, 殷哲³, 武鑫¹, 石伟¹

(1.内蒙古大学生态与环境学院, 内蒙古呼和浩特 010021;

2.水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古呼和浩特 010020; 3.中国水利水电科学研究院, 北京 100020)

摘要: [目的] 在漫川漫岗黑土区开展横垄坡耕地冲刷试验研究, 为黑土地保护工作提供理论依据。[方法] 采用野外现场放水冲刷试验, 研究了 10, 30, 50 和 70 m 横垄坡耕地径流小区, 在不同上方来水量下的产流、产沙过程。[结果] 3 种冲刷流量(0.34, 0.67 和 1.00 L/min)条件下的径流系数和含沙量均随坡长的增加持续波动, 但不同冲刷流量达到稳定的大小和时间不同; 累积产流量和累积产沙量均随冲刷流量的增强而增大, 但相同冲刷流量下受坡长变化影响二者最大值出现的坡长却不同; 冲刷流量为 0.34 L/min 时, 10, 30, 50 和 70 m 这 4 种坡长的径流系数和含沙量相关性均显著; 累积产沙量随累积流量的增加而增加, 坡长越短, 且线性关系越强。0.34 L/min 冲刷流量侵蚀量大小顺序依次为: 30 m > 10 m > 70 m > 50 m; 冲刷流量为 0.67 和 1.00 L/min 侵蚀量大小顺序为: 30 m > 50 m > 70 m > 10 m。1.00 L/min 冲刷流量情形下 30 m 坡长侵蚀量是 10 m 坡长的 4.2 倍。[结论] 坡面侵蚀量随冲刷流量增大而增大, 30 m 坡长是横垄坡耕地侵蚀的临界坡长, 细沟发育是横垄坡耕地坡面土壤侵蚀的主要来源。

关键词: 黑土地; 横垄坡耕地; 坡长; 径流; 冲刷; 泥沙

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)06-0063-08

中图分类号: S157.1, S155.27

文献参数: 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.010; Wen Yunhao, Liu Tiejun, Ma Linqian, 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.

Process of Flow and Sand Production at Cross-ridge Slope Land in Black Soil Area of Northeast China

Wen Yunhao¹, Liu Tiejun², Ma Linqian¹, Wang Lixin¹, Yin Zhe³, Wu Xin¹, Shi Wei¹

(1.College of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot, Inner Mongolia 010021,

China; 2.Research Institute of Water Resources in Pastoral Areas, Ministry of Water Resources, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China; 3.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100020, China)

Abstract: [Objective] The scouring of cross-ridge slope land in the Manchuan-Manggang black soil area was studied, in order to provide a theoretical basis for black land conservation. [Methods] Field scouring experiments were performed on runoff plots in 10, 30, 50, and 70 m sloping farmland with ridge farming, to investigate the processes of runoff and sediment production with different volumes of upslope inflow. [Results] Under the three scouring flow rates of 0.34, 0.67, and 1.00 L/min, the runoff coefficients and sediment contents fluctuated continuously with increasing slope length, but they stabilized at different magnitudes and times at different scouring flow rates. The cumulative runoff production and cumulative sediment production both increased with increasing scouring flow rate, but the maximum values of both occurred at different slope lengths under the same scouring flow rate. When the scouring flow rate was 0.34 L/min, there was a significant correlation between the runoff coefficient and sediment content for the four slope lengths (10, 30, 50, and 70 m). The cumulative sediment production increased with the increase of the

收稿日期: 2021-05-09

修回日期: 2021-06-11

资助项目: 国家重点研发计划项目“东北黑土区坡面水土流失综合治理技术”(2018YFC0507002); 内蒙古科技计划项目(2020GG0126)

第一作者: 温云浩(1995—), 男(蒙古族), 内蒙古自治区赤峰市人, 硕士研究生, 主要从事环境工程研究。Email: 1593252285@qq.com。

通讯作者: 刘铁军(1979—), 男(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 正高级工程师, 主要从事生态水文学及伴生过程研究。Email: mksltj@126.com。

cumulative flow rate, with shorter slope lengths exhibiting a stronger linear relationship. When the scouring flow rate was 0.34 L/min, the ranking of the different slope lengths by the amount of soil erosion was 30 m > 10 m > 70 m > 50 m. At scouring flow rates of 0.67 and 1.00 L/min, the order was 30 m > 50 m > 70 m > 10 m. Under the scouring flow rate of 1.00 L/min, the erosion of the 30 m slope was 4.2 times the erosion of the 10 m slope. [Conclusion] Slope erosion increases with increase of scouring flow rate; However, 30 m is the critical slope length for erosion of cross-ridge slope land, and rill development is the main source of soil erosion on cross-ridge slope land.

Keywords: black soil; cross-ridge slope land; slope length; runoff; scrubbing; sediment

东北黑土区是中国重要的粮食产区和商品粮基地,对稳定粮食市场、保障国家粮食安全具有重要作用。因缺乏保护和无限开垦造成了严重的水土流失^[1]。长缓坡下垄作方式引起的侵蚀已成为国内外共同关注的问题^[2]。大量水土流失导致黑土层逐年变薄,保水保肥能力越来越弱,适宜耕作性也越来越差^[3]。降雨及其形成的坡面水流是侵蚀发生发展的主要驱动力;加之坡长引起坡面水流能量的变化、分布以及影响水沙运移规律和侵蚀形态的演变过程,都是导致坡面侵蚀的重要因素之一^[4]。国内学者^[5]自20世纪50年代就开始研究坡长对坡面侵蚀产沙的影响,发现在降雨强度较小时,产沙量随坡长的增加而缓慢增加;随降雨强度增加,坡面产沙量随坡长明显增多。模拟降雨研究发现,当坡面以切沟侵蚀为主时,汇水坡长对坡面侵蚀产沙的作用最大^[6];也有研究指出产沙量虽然随坡长的增加而增加,但当坡长大于临界坡长时,坡面侵蚀产沙量随坡长的增加反而减少^[7]。廖义善等^[8]研究也认为在坡面上径流的侵蚀产沙、输沙能力随着坡面长度的变化呈强弱交替变化。李桂芳等^[9]通过对5 m和10 m坡长模拟降雨试验发现,坡面径流主要受降雨强度、坡长以及降雨强度与坡长相互作用的影响,坡面侵蚀量主要受降雨强度、坡度和坡长三者的共同作用。齐星圆等^[10]通过变坡长条件下工程堆积体平台模拟径流冲刷试验发现,坡长越长,细沟溯源侵蚀、沿程侵蚀和下切侵蚀越剧烈。长缓坡作为黑土区最主要的地形特征,汇水坡长引起的坡面加大对黑土区土壤侵蚀垂直分带的宽度和排列均有影响^[11]。根据田间坡地径流小区观测结果与分析,黑土区土壤侵蚀率沿坡长呈交替分布,侵蚀带的分布与坡长和降雨的组合有关^[12-13]。

坡长与产流产沙的研究取得的成果主要集中在黄土高原区,对垄作黑土地的研究较少,且东北黑土区对土壤侵蚀研究大多集中在30 m以内的短坡林地、草地、地埂等具有水保措施的黑土坡面上;室内模拟降雨试验和天然降雨观测试验较多,野外放水冲刷试验较少,尤其是针对东北黑土区超长坡、垄作条件下的坡面侵蚀过程的试验研究鲜见报道。为此,本研

究选择东北黑土区横坡垄作坡耕地进行径流小区冲刷试验,通过模拟不同降雨强度下坡面径流量设置冲刷流量,研究汇水坡长对产流、产沙的相应,为黑土地垄作长缓坡减蚀预报模型提供科学支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

该研究区位于内蒙古扎兰屯市境内,属温带大陆性半湿润气候区,年平均气温3.2℃,年降水量为450~550 mm,多年平均径流深100 mm。地处大兴安岭隆起和松嫩平原下沉的结合地带,地貌以低山丘陵为主,地形特点为西北高、东南低,海拔高度在250~272 m之间。土壤主要类型为黑土,其次为暗棕壤和草甸土,黑土面积占65.4%,主要分布于平缓坡地,绝大部分已开垦为农田;试验区地理位置123°07′72″E,48°01′40″N,土壤为黑土,黑土层平均厚度45 cm,表层0—20 cm土壤有机质含量为24.18 g/kg,土壤颗粒组成为黏粒(<2 μm)占20.3%、粉粒(2~50 μm)占76.4%和砂粒(50~2 000 μm)占3.3%,土壤pH值为6.39,田间持水量45.10%~50.02%。流域内土壤侵蚀主要类型以水力侵蚀为主,多年平均侵蚀模数2 520 t/(km²·a)。

1.2 试验方法

1.2.1 径流小区建设 径流小区建设在扎兰屯境内的大河湾农场黑土横坡垄作坡耕地上,建于2020年6月。分别设置10,30,50,70 m共4个坡长,宽3 m,坡度3.0°,铁板围埂,地下埋深30 cm,地上高度20 cm,小区下方建有集流池。小区内起横垄,垄宽66 cm,垄高20 cm(图1),小区经历一个雨季后,试验于秋季9月上旬开展^[14]。

1.2.2 冲刷试验 冲刷试验于2020年9月8—28日进行。基于当地2016—2018年降雨数据分析3 a最大降雨强度大多集中在60 mm/h内,为使冲刷试验结果更接近天然降雨所致的侵蚀状况,本文根据不同雨强所可能产生的径流量,分别设计20,40和60 mm/h共3种强度的冲刷试验^[15-16],并根据雨强和不同坡长折算出单位坡面不同冲刷流量,即冲刷流

量分别为 0.34, 0.67, 1.00 L/min^[14,17](表 1)。试验前多次利用量筒稳定流量,当流量大小和均匀度均达到要求时开始放水冲刷试验^[18]。水箱放水开始后,稳流槽水流流出后开始计时。当集流池收集到径流时,即为产流起始时间。产流前 3 min 内间隔 1 min 测量径流量体积并收集径流泥沙样品 1 个,3 min 后间

隔 3 min 测量径流样体积并收集泥沙样品,收集 3 个样品后间隔 5 min 以上述相同方式再收集 3 个径流样。整个样品采集过程持续 27 min,收集径流样 9 个(1,3,5 min 间隔各 3 个),采集结束后上方停止放水。采集样品带回实验室烘干、称重测定泥沙重。冲刷过程采用高锰酸钾染色法进行坡面水流流速监测。



图 1 研究区径流小区布设情况

表 1 模拟冲刷试验的条件设计

坡长/ m	雨强/ (mm·h ⁻¹)	冲刷流量/ (L·min ⁻¹)	坡长/ m	雨强/ (mm·h ⁻¹)	冲刷流量/ (L·min ⁻¹)
10	20	0.34	50	20	0.34
10	40	0.67	50	40	0.67
10	60	1.00	50	60	1.00
30	20	0.34	70	20	0.34
30	40	0.67	70	40	0.67
30	60	1.00	70	60	1.00

2 结果与分析

2.1 产流过程

产流起始时间是坡面综合阻控侵蚀效果的反映,不同的坡长坡面产流起始时间具有差异性,不同冲刷流量对产流起始时间也有较大的影响。4 种坡长产流起始时间均表现为:70 m > 50 m > 30 m > 10 m (图 2),坡长延长坡面面积增大,相同冲刷流量下,径流越过垄台逐级储水,同时垂直入渗土壤中的水量也增加,产流起始时间延迟。随冲刷流量增加,产流起始时间缩短,除坡面冲刷流量增大外,坡面水流动力增强,坡面极易形成固定水流路径,加速径流下行。

产流过程是垄作坡面土壤侵蚀规律变化的间接反映,不同冲刷流量和坡长条件下产流过程差异明显。相同坡长,冲刷流量越大,坡面径流率越高;径流率变异性随坡面延长逐渐增大,随冲刷流量的

改变各坡长径流率起伏规律也有不同。冲刷流量在 0.34 L/min 情况下,30,50 和 70 m 坡长径流率随时间呈增强—减弱—平稳规律,其中 30 m 坡长波动性较明显。10 m 坡长上径流率以平稳—递增趋势为主;冲刷流量变为 0.67 L/min 时,10,30 和 50 m 径流率均呈现递增—递减—平稳趋势,此时 70 m 坡长径流率变异性明显;而冲刷流量增至 1.00 L/min 后,4 种坡长径流率均有先增强、后减弱、最后趋于平稳规律。由此可见,坡长与冲刷流量的变化均会影响产流过程。其原因是垄作改变坡面微地貌,冲刷水流自上而下流动过程中,水流需填满上一垄沟方可向下流动,期间必然会引起垄台失稳倒塌(图 3),此时蓄积在垄沟的水流快速流出,致使坡面水流增大,因此在起始阶段径流率逐渐增加,待上方垄沟内水流渐少,径流率开始减弱,并逐渐趋于稳定。其次由于冲刷流量的增大,致使坡面垄台倒塌的时间提前以及形成浅沟宽度和深度都扩大,所以冲刷流量增大,径流率升高。

试验观察发现,当坡面垄台产生细小跌坎(图 3),在水流冲刷下,开始发生溯源侵蚀,并在小区中部逐渐形成贯通坡面且平行于水流方向的细沟。伴随细沟继续发育,导致沟壁失稳坍塌,水流又接触新土壤继续入渗延缓水流下行。上述过程是引起径流率波动的主要原因。对于同坡长小区由于冲刷流量的不同,导致细沟发育速度、竖直侵蚀力不同,径流率也随之变化。

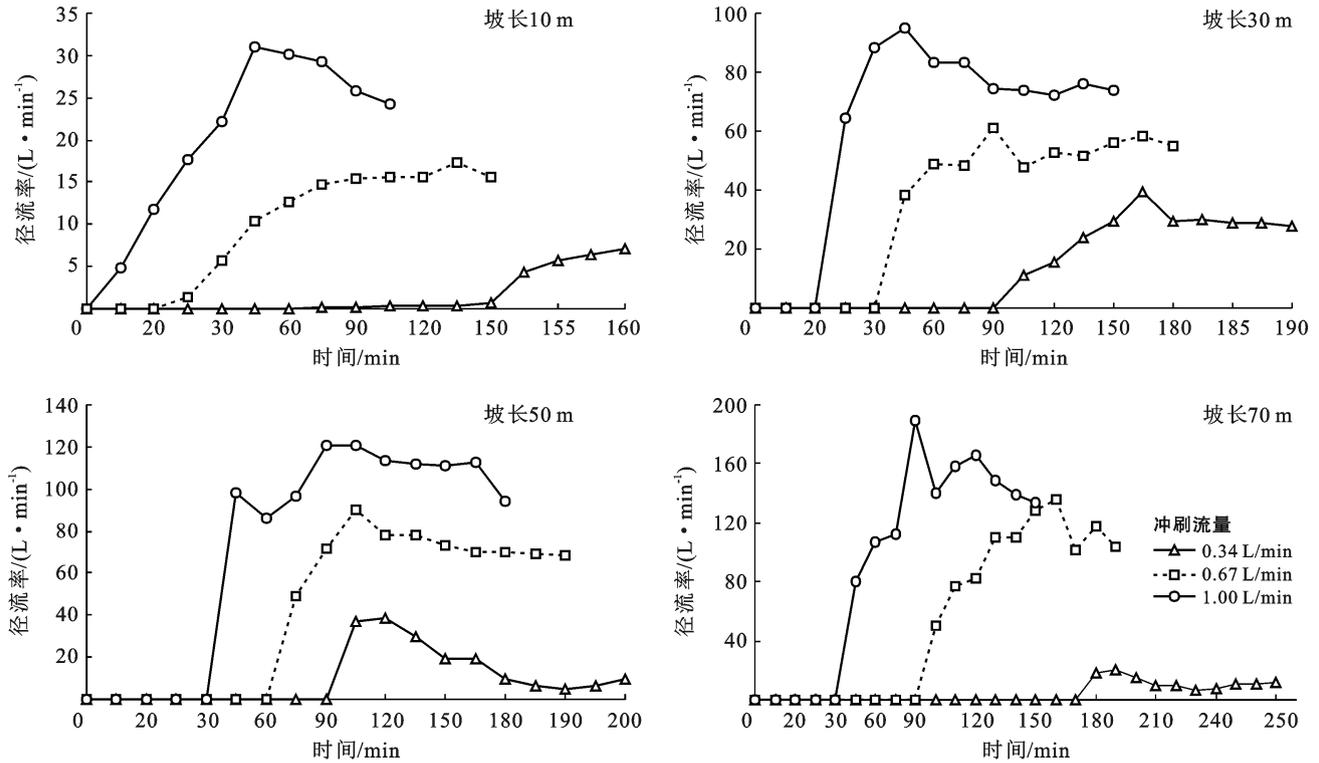


图 2 模拟冲刷试验的径流率变化过程



图 3 模拟冲刷试验坡面冲刷细沟侵蚀

2.2 产沙过程

坡面水流自上而下流动过程中,对土壤产生剪切冲刷力,造成水土流失。冲刷水流强弱作为侵蚀产沙主要的驱动力,对侵蚀过程有着非常重要的影响^[16]。通过分析含沙量随时间的变化规律,有助于进一步了解不同坡长条件下黑土坡耕地的土壤侵蚀过程。不同试验条件下坡耕地径流含沙量的变化情况如图 4 所示。

由图 4 总体来看,不论坡长及冲刷流量如何变化,含沙量均随着径流时间的延长逐渐减少,即径流开始发生时含沙量较高,主要是因为地表松散泥沙

易被冲蚀并随径流向坡下运移。含沙量逐渐降低主要因为地表可冲刷泥沙逐渐减少,其次因坡面水流逐渐稳定,对地表形成保护膜,冲刷水流难以继续剥蚀。10,50,70 m 坡长径流小区的含沙量基本在产流 3 min 后减小逐渐趋于稳定,但是 30 m 坡长径流小区有所不同,冲刷流量为 1.00 L/min 条件下初始含沙量最高,17 min 后减小逐渐趋于稳定,可见 30 m 坡长小区在大流量冲刷情况下发生的侵蚀最为严重。说明坡长对产沙过程存在一定程度的影响,主要原因是随着坡长的增加,泥沙会产生沉积—运移—在沉积的反复过程,此过程必然会引起含沙量的波动。

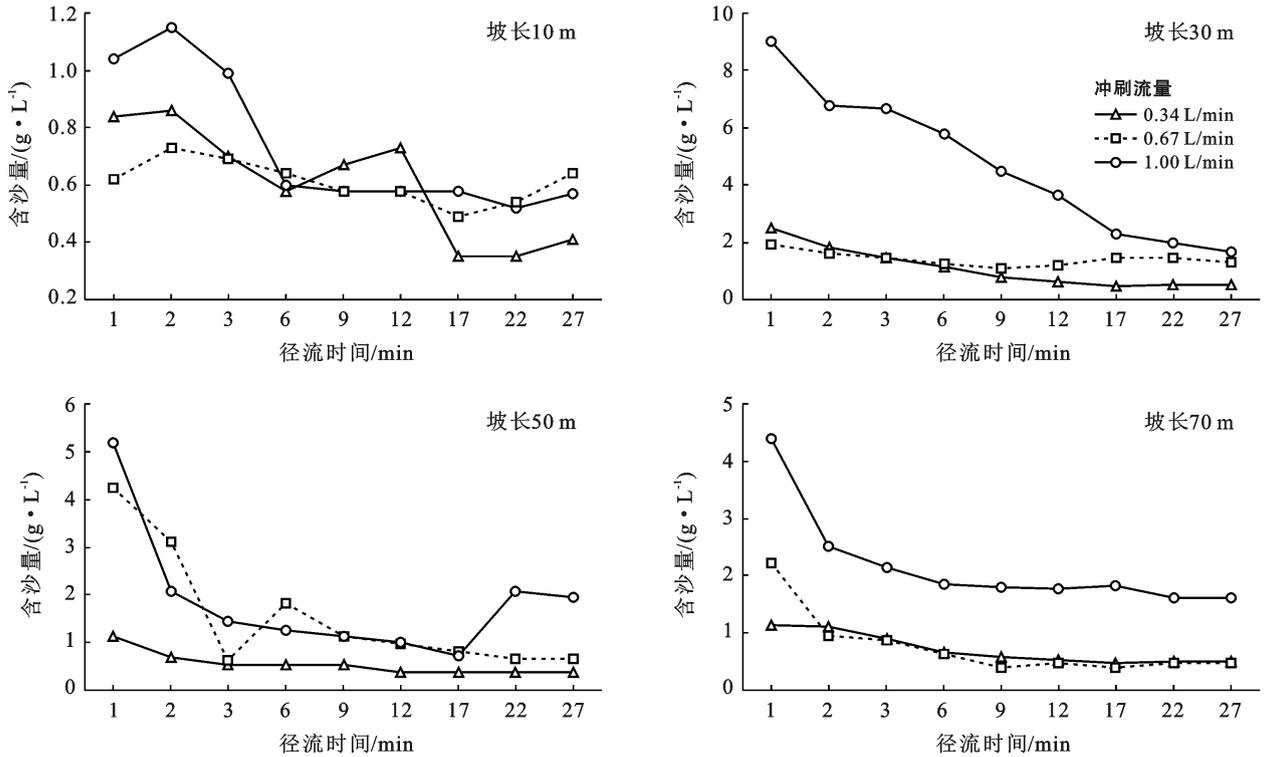


图4 模拟冲刷试验含沙量随时间的变化过程

2.3 产流、产沙总量

径流量是指在一场冲刷试验里坡面累积产流总量(图5)。由图5可知,相同坡长中累积产流量均随冲刷流量增大而增加。在坡长为50和70m情况下,0.34 L/min冲刷流量的累积产流量较0.67和1.00 L/min的累积产流量低很多,可能是由于冲刷水流小,坡面水流弱,加之坡长延长与起垄耕作增加水流的入渗量的缘故。冲刷流量为0.34 L/min时,30m坡长累积产流量最大,但冲刷流量控制在0.67和1.00 L/min状况下,累积产流量均随坡长增加而增加。50和70m长坡中,当冲刷流量增大后,垄作坡面水流动力增强,极易使垄台倒塌,快速形成新水流路径,相同时段收集径流量增大。小冲刷流量试验下却在30m坡长出现最大径流量,主要是与其他垄作坡长相比,30m垄作坡面即保证了水流发挥动能的长度,快速导致垄台失稳、崩塌形成坡面径流通道,此时收集的径流总量最大,当坡长继续延长反而削弱了水流动能,因此相同试验条件下,坡长增加后累积径流量反而减少。

泥沙量是表征坡面土壤流失轻重的最直观数值,不同冲刷流量与不同坡长累积产沙量变化如(图5)所示。相同坡长,冲刷流量越大侵蚀越严重,说明冲刷水流强弱是导致土壤侵蚀的主控因素。冲刷流量

相同情况下,坡长变化却引起了不同程度的侵蚀,30m坡长小区累积产沙量最大即侵蚀强度最大。尤其冲刷流量为1.00 L/min情况下,30m坡长小区的侵蚀量是10m坡长的4.2倍。不同坡长累积产沙量有以下规律:0.34 L/min冲刷流量侵蚀量表现为:30m>10m>70m>50m;冲刷流量为0.67 L/min及1.00 L/min侵蚀量大小顺序为:30m>50m>70m>10m。本试验结果显示30m坡长是横坡垄作坡耕地侵蚀强弱的临界坡长,其主要原因是坡面侵蚀过程中坡长足够长的话侵蚀泥沙会表现出侵蚀—沉积—侵蚀—再沉积的反复过程,这一过程中30m的坡长恰好完成第一个侵蚀过程,此时收集的泥沙量最大。坡长继续增加会出现侵蚀之后的再沉积,反而使收集的泥沙总量减少,而同冲刷强度,短坡水流动力弱,难以对泥沙进行剥蚀运移。相同坡长条件下,10,50和70m坡长泥沙量随冲刷流量增强而增加,但增幅差异较小,而30m坡长泥沙量增幅较大,其主要原因是在30m的坡面上水流能快速剥蚀泥沙,且用以泥沙的搬运,所以在冲刷流量增加后,产沙量增幅明显,其他坡长累积产沙量增幅小是因为小坡长坡面水流弱难以对泥沙进行剥蚀运移,大坡长坡面水流虽强,但泥沙伴随水流下行过程中在坡面的沉积现象较严重,因此增幅较低。

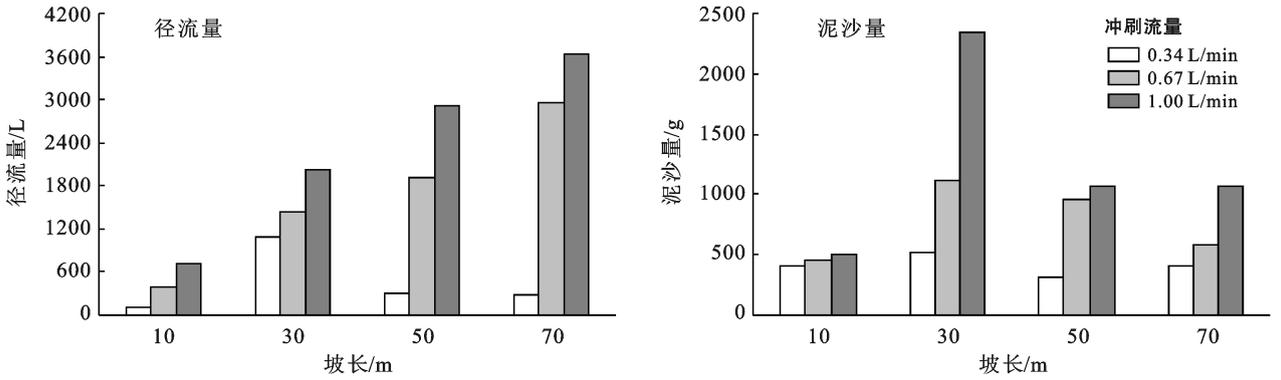


图 5 不同冲刷流量下的产流和产沙量

2.4 浅沟侵蚀形态发育特征

长缓坡垄作坡面上进行放水冲刷试验,观察发现,小流量冲刷下,垄台上会形成密集的细沟,随着放水冲刷的持续,垄台上的细沟逐步发生下切侵蚀与溯源侵蚀,且细沟逐步清晰,在径流小区整个坡面上逐渐贯通为一条线。冲刷流量增大后,细沟迅速贯穿整个坡面,且沟道下切明显,形成较多跌坎,因此冲刷流量增大后,各垄作坡长侵蚀明显增加,在浅沟侵蚀情况下,坡面下方侵蚀量大于上方,坡长越长越明显。其原因是坡面上放水势能转化为动能,增加了对下坡面浅沟的冲刷能力。

2.5 坡长、冲刷流量对产流产沙关系的影响

通过分析 0.34, 0.67, 1.00 L/min 这 3 个冲刷流量在 10, 30, 50 和 70 m 这 4 个坡长的坡面径流率和含沙量相关性(表 2), 得出冲刷流量为 0.34 L/min 时, 10, 30, 50 和 70 m 这 4 种坡长的径流率和含沙量都在置信度为 0.01 的相关性水平上显著相关, 即径流率和含沙量极强相关。70 m 坡长, 0.67 L/min 冲刷流量, 径流率和含沙量在置信度为 0.01 的相关性水平上显著相关, 冲刷流量 0.67 L/min 和 1.00 L/min 在其他各坡面径流率和含沙量表现为弱相关或不相关。当冲刷流量较小时, 坡面水流动力弱, 产生细沟分支少, 水流流路较稳定, 径流携带的泥沙量随产流时间的增加波动性小。而当冲刷流量较大时, 坡面水流动力强, 坡面细沟分支多, 水流走向较不稳定, 且细沟下切严重, 径流量和产沙量的变化波动性更强。坡长影响着水流的入渗和流动方式。较长坡的径流率和含沙量间的相关性相对短坡更强。因此在长坡垄作坡面上, 要通过减缓坡长进行分级。

2.6 累积产流量与累积产沙量间的关系

分别拟合 10, 30, 50, 70 m 坡长累积产流量与累积产沙量随坡长变化存在良好的线性关系(表 3), 累积产沙量随累积流量的增加而增加, 坡长越短, 累积产沙量随产流量的增加明显, 且线性关系越强。

表 2 不同坡长下径流率与含沙量的相关性分析

坡长/m	冲刷流量/(L·min ⁻¹)	相关系数
10	0.34	0.815**
	0.67	0.503
	1.00	0.878**
30	0.34	0.765*
	0.67	0.608
	1.00	0.414
50	0.34	0.816**
	0.67	0.634
	1.00	0.414
70	0.34	0.881**
	0.67	0.857**
	1.00	0.747*

注: 试验样本数 $n=9$; * 表示在置信度(双侧)为 0.05 时, 显著相关性; ** 表示在置信度(双侧)为 0.01 时, 显著相关性。

表 3 累积产沙量与累积产流量之间的关系

坡长/m	拟合方程	决定系数 R^2
10	$y=0.1477x+395.58$	0.999
30	$y=1.6018x-1189.2$	0.995
50	$y=0.3025x+259.63$	0.935
70	$y=0.1607x+313.94$	0.689

3 讨论

坡长是作为黑土区重要的地形因素, 加之垄作方式对天然坡面的改变, 致使黑土区土壤侵蚀更具有复杂性。坡长所引起的坡面扩大增加水流的汇流面积, 同时起垄耕作延长了水流与坡面的接触时间。伴随冲刷流量的改变, 不同垄作坡长产流产沙过程均有不同规律。本研究表明, 同坡长冲刷流量大产流量则大, 放水冲刷开始水流要先蓄满垄沟, 然后再向下流动, 可见横垄耕作有较好的蓄水作用^[19], 垄沟通过储蓄水流, 延长坡面水流下行, 从而增加入渗。坡长

增加之后,由于坡面面积增大上方冲刷流量增加,导致径流率增加,这与魏霞等^[20]的研究结果一致。Fu Suhua等^[21]研究也发现径流率随坡长延长逐渐增加。但是郭军权等^[22]通过恒定冲刷流量,探究不同坡长产流产沙规律中发现,随着坡长的增加,水流与土壤的接触面积增大,入渗量增加,如果冲刷流量恒定,坡长延长后径流率必然减少。可见模拟降雨冲刷试验与等流量冲刷试验的结果完全不同。垄作长缓坡产沙过程较为复杂。冲刷强弱是引起长缓坡水土流失的主要因素,相同坡长冲刷流量越大,坡面侵蚀越严重。而冲刷流量维持恒定时,最大侵蚀量均出现在30 m坡长,可见坡长对黑土区垄作坡面侵蚀产沙过程具有较大影响^[23],在一定坡长范围下坡耕地侵蚀—沉积交替出现。可以将30 m左右长度视为黑土坡耕地侵蚀产沙的临界坡长,此结果与汪骁勇和姚璟等在黄土区的研究^[24-25]一致。虽然垄作可减缓土壤侵蚀^[26],且起垄耕作作为东北黑土区长缓坡现阶段主要耕作方式^[27-28],但仍建议在现有耕作方式基础上,每隔30~40 m内建设地埂或植物带,更有效减缓长坡引起的土壤侵蚀。

4 结论

(1) 冲刷流量影响径流量。冲刷流量0.34 L/min情况下最大径流量出现在30 m坡长,0.67 L/min和1.00 L/min冲刷流量的径流量均随坡长增加而增加。冲刷流量越大径流率越高,各坡面径流率随冲刷历时呈先增加后减小最终趋于稳定。

(2) 土壤流失量受坡长影响,且存在阈值。10 m垄作短坡中侵蚀含沙量随冲刷历时的增加呈先增大后减小的趋势,且变化较剧烈。长坡(30,50,70 m)垄作耕地含沙量的变化相对平缓,呈递减趋势,且坡长越长递减速率越明显。在3种冲刷流量的试验中,侵蚀最严重均出现在30 m坡长,侵蚀强度变化规律如下:冲刷流量为0.34 L/min侵蚀量表现为:30 m>10 m>70 m>50 m;0.67 L/min和1.00 L/min冲刷侵蚀量顺序为:30 m>50 m>70 m>10 m。冲刷流量为1.00 L/min情况下,30 m坡长侵蚀量是10 m坡长的4.2倍。

(3) 径流系数与径流中泥沙含量存在显著相关关系。冲刷流量为0.34 L/min时,10,30,50,70 m这4种坡长的径流系数和径流中含沙量相关性显著,径流率和含沙量间的相关性表现为:长坡>短坡。累积产沙量随累积流量的增加而增加。坡长越短,累积产沙量随产流量的增加越明显,且线性关系越强。

本试验通过对黑土地垄作长缓坡进行径流小区

冲刷试验得出一些研究结论,为垄作长缓坡土壤侵蚀的预测和水土保持措施的布置提供了科学依据,但由于本试验是在野外天然坡面进行模拟不同降雨强度的放水冲刷,与天然降雨以及农作物生长下的下垫面仍有不同,虽然试验期间天气变化不大但依旧有一定的影响,据此本试验研究主要分析了过程的变化,下一步需深入开展驱动机制研究。

[参考文献]

- [1] 赵玉明,刘宝元,姜洪涛.东北黑土区垄向的分布及其对土壤侵蚀的影响[J].水土保持研究,2012,19(5):1-6.
- [2] 宁静,杨子,姜涛,等.东北黑土区不同垄向耕地沟蚀与地形耦合规律[J].水土保持研究,2016,23(3):29-36.
- [3] 曹媛,孙鹏,姚蕊,等.不同雨强条件下工程措施对坡地产流产沙影响[J].水土保持学报,2020,34(6):1-7.
- [4] 王玲玲,范东明,王文龙,等.水蚀风蚀交错区不同坡长坡面产流产沙过程[J].人民黄河,2016,38(3):72-75,79.
- [5] 黎四龙,蔡强国.坡长对径流及侵蚀的影响[J].干旱区资源与环境,1998,12(1):29-35.
- [6] 张新和,郑粉莉,张鹏,等.黄土坡面侵蚀方式演变过程中汇水坡长的侵蚀产沙作用分析[J].干旱地区农业研究,2007,25(6):126-131.
- [7] 蔡强国.坡长在坡面侵蚀产沙过程中的作用[J].泥沙研究,1989(4):84-91.
- [8] 廖义善,蔡强国,程琴娟.黄土丘陵沟壑区坡面侵蚀产沙地形因子的临界条件[J].中国水土保持科学,2008,6(2):32-38.
- [9] 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):147-154,182.
- [10] 齐星圆,高照良,张翔,等.黄土堆积体变坡长坡面细沟动态发育过程[J].水土保持研究,2019,26(3):42-48.
- [11] 范昊明,蔡强国,崔明.东北黑土漫岗区土壤侵蚀垂直分带性研究[J].农业工程学报,2005,21(6):8-11.
- [12] Cui M, Cai Q, Zhu A, et al. Soil erosion along a long slope in the gentle hilly areas of black soil region in Northeast China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2007, 17(3): 375-383.
- [13] 刘元保,唐克丽,查轩,等.坡耕地不同地面覆盖的水土流失试验研究[J].水土保持学报,1990,4(1):25-29.
- [14] 李玉婷婷,高照良,李永红,等.坡长对黄土区工程堆积体产流产沙影响的模拟试验研究[J].水土保持通报,2019,39(4):102-106.
- [15] 任乐,张科利,郭继成.基于冲刷试验的贵州耕地土壤抗冲性研究[J].水土保持学报,2013,27(1):56-59.
- [16] 张少佳,高照良,李永红,等.高边坡工程堆积体产流产沙特性研究[J].水土保持学报,2016,30(2):107-110.
- [17] 张翔,高照良.不同坡长条件下黄土堆积体坡面产流产

- 沙过程[J].水土保持研究,2018,25(6):79-84,93.
- [18] 赵光旭,王全九,张鹏宇,等.短坡坡长变化对坡地风沙土产流产沙及氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2016,30(4):13-18.
- [19] 林艺,秦凤,郑子成,等.不同降雨条件下垄作坡面地表微地形及土壤侵蚀变化特征[J].中国水土保持科学,2015,13(3):32-38.
- [20] 魏霞,李勋贵,李占斌,等.黄土凸型复合坡面产流产沙过程的坡长与植被效应[J].水土保持学报,2015,29(5):45-49,55.
- [21] Fu Suhua, Wu Zhiping, Liu Baoyuan, et al. Comparison of the effects of the different methods for computing the slope length factor at a watershed scale [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2013,1(2):64-71.
- [22] 郭军权,王文龙.坡度对浅沟侵蚀产沙的野外放水冲刷试验影响[J].水土保持学报,2019,33(4):87-92,212.
- [23] 陈晓安,蔡强国,张利超,等.黄土丘陵沟壑区不同雨强下坡长对坡面土壤侵蚀的影响[J].土壤通报,2011,42(3):721-725.
- [24] An J, Liu Q J, Wu Y Z. Optimization of the contour ridge system for controlling nitrogen and phosphorus losses under seepage condition [J]. Soil Use and Management, 2015,31(1):89-97.
- [25] 汪晓勇,郑粉莉.黄土坡面坡长对侵蚀—搬运过程的影响研究[J].水土保持通报,2008,28(3):1-4.
- [26] 姚璟,付兴涛.坡长对离石黄土坡面径流含沙量影响的模拟降雨研究[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(3):493-501.
- [27] 宋玥,张忠学.不同耕作措施对黑土坡耕地土壤侵蚀的影响[J].水土保持研究,2011,18(2):14-16,25.
- [28] 王磊,何超,郑粉莉,等.黑土区坡耕地横坡垄作措施防治土壤侵蚀的土槽试验[J].农业工程学报,2018,34(15):141-148.

(上接第 62 页)

- [21] Maschinski J, Whitham T G. The continuum of plant responses to herbivory: The influences of plant association, nutrient availability and timing [J]. American Naturalist, 1989,134(1):1-19.
- [22] Guitian R, Bardgett R D. Plant and soil microbial responses to defoliation in temperate seminatural grassland [J]. Plant and Soil, 2000,220(1/2):271-277.
- [23] Lee S G, Cho J G, Shin M H, et al. Effects of summer pruning combined with winter pruning on bush growth, yields, and fruit quality of 'Misty' southern highbush blueberry for two years after planting [J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2015, 56(6):740-748.
- [24] 姚素梅,康跃虎,刘海军,等.喷灌与地面灌溉条件下冬小麦光合作用的日变化研究[J].农业工程学报,2005,21(11):16-19.
- [25] 周静静,马红彬,蔡育蓉,等.平茬时期与留茬高度对宁夏荒漠草原柠条营养成分和再生的影响[J].西北农业学报,2017,26(2):287-293.
- [26] 高玉葆,任安芝,王巍,等.科尔沁沙地黄柳再生枝与现存枝形态和光合特征的比较[J].生态学报,2002,22(10):1758-1764.
- [27] Ueda Y, Nishihara S, Tomita H, et al. Photosynthetic response of Japanese rose species *Rosa bracteata* and *Rosa rugosa* to temperature and light [J]. Scientia Horticulturae, 2000,84(3/4):365-371.
- [28] Von Caemmerer S, Farquhar G D. Effects of partial defoliation, changes of irradiance during growth, short-term water stress and growth at enhanced $p(\text{CO}_2)$ on the photosynthetic capacity of leaves of *Phaseolus vulgaris* L. [J]. Planta, 1984,160(4):320-329.
- [29] McNaughton S J. Compensatory plant growth as a response to herbivory [J]. Oikos, 1983,40(3):329-336.
- [30] Holechek J I. Livestock grazing impacts on public lands: A viewpoint [J]. Wildlife Management, 1994,58(1):28-30.