

东北黑土区不同垄作坡面产流产沙过程

温云浩¹, 王立新¹, 刘铁军²

(1.内蒙古大学 生态与环境学院, 呼和浩特 010021; 2.水利部 牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020)

摘要:起垄种植是东北黑土区普遍的耕作模式,不同垄作坡面产流产沙规律尚不明晰、亟需研究。为此,基于野外放水冲刷试验,设计 3 个冲刷流量(30 L/min, 60 L/min, 90 L/min)和 4 种处理坡面(横坡垄作、斜坡垄作、无垄作、顺坡垄作),探究东北黑土区不同垄作坡面的土壤侵蚀差异。结果表明:(1) 3 种冲刷流量产流率和含沙量均随垄作措施改变呈持续波动趋势,但受冲刷流量影响二者变化规律不同。(2) 4 种垄作措施状况下,产流时间与冲刷流量均不相关,含沙量与产流时间均呈负相关;其他试验条件下,因冲刷流量和垄作措施的差异出现不同相关性。(3) 30 L/min, 60 L/min 两种冲刷流量下,侵蚀强弱表现为:顺坡垄作>无垄作>斜坡垄作>横坡垄作。冲刷流量 90 L/min 时,侵蚀规律变为:横坡垄作>顺坡垄作>斜坡垄作>无垄作,且横坡垄作与斜坡垄作的累积产沙量较 30 L/min 冲刷流量比分别增加了 12.78 倍和 10.11 倍。综上,小流量冲刷条件下横垄和斜垄可有效控制径流和水土流失,当冲刷强度增大后二者发生断垄恰是径流和泥沙发生变异的最主要因素。

关键词:黑土地; 垄作措施; 冲刷; 径流; 泥沙

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0008-06

Process of Runoff and Sediment Generation on Different Slopes with Ridged Cropping in the Black Soil Area of Northeast China

WEN Yunhao¹, WANG Lixin¹, LIU Tiejun²

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

2.Institute of Pastoral Water Conservancy Science, Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, China)

Abstract: Ridged planting is a common cropping pattern in the black soil area of northeast China, and the runoff and sediment generation patterns on different slopes with ridged cropping are not clear and need to be studied. Based on the field scouring test, three drainage flow rates (30 L/min, 60 L/min, 90 L/min) and four slopes (cross-slope ridge, slope ridge, no ridge, and down-slope ridge) were designed to investigate the differences in soil erosion on different slopes with ridged cropping in the northeast black soil area. The results show that: (1) the runoff generation rate and sediment content of the three kinds of scouring flows both showed a continuous fluctuation trend with the change of ridged cropping measures, but the change patterns of the two were different by the scouring flow; (2) under the four ridged cropping conditions, the time of runoff generation was not correlated with the drainage flow, and the sediment content was negatively correlated with the time of runoff generation; under the other test conditions, different correlations were observed due to the differences in drainage flow and ridged cropping measures; (3) at the drainage flow rates of 30 L/min and 60 L/min, the erosion intensity decreased in the order: downhill ridge>no ridge>slope ridge>cross-slope ridge; when the drainage flow rate was 90 L/min, the erosion intensity decreased in the order: cross-slope ridge>down-slope ridge>slope ridge>no ridge. And the cumulated amounts of sediment generation of cross-slope ridge and slope ridge increased 12.78 times and 10.11 times, respectively compared with those under drainage flow rate of 30 L/min. Under the condition of small flow erosion, horizontal ridge and oblique ridge can effectively control runoff and soil erosion, and when the erosion intensity increases, the fracture of the two ridges is the most important factor in the variation of runoff and sediment.

收稿日期:2021-07-22

修回日期:2021-08-06

资助项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0507002);内蒙古科技计划项目(2020GG0126);国家自然科学基金项目(32160279,3211101852)

第一作者:温云浩(1995—),男,内蒙古赤峰人,硕士研究生,主要从事环境工程研究。E-mail:1593252285@qq.com

通信作者:王立新(1975—)男,内蒙古呼和浩特人,博士,教授,主要从事环境生态学方面的研究。E-mail:Lx_wimu@163.com

Keywords: black soil; ridged cropping measures; scouring; runoff; sediment

我国黑土区总面积约 103 万 km^2 ^[1-2], 其中典型黑土面积达 32.76 万 km^2 ^[3]。东北黑土区是我国最大的商品粮基地。地貌类型漫川漫岗^[4], 是大自然赋予人类的独特财富。黑土是一种品质优良、肥力高的土壤, 非常适合植物生长^[5]。因此东北黑土区被誉为“谷物粮仓”。坡耕地是东北黑土区的主要耕地资源, 占总耕地的 60%, 大部分分布在 $3^\circ \sim 15^\circ$ 的坡面上^[6]。内蒙古自治区幅员辽阔, 呼伦贝尔市东部、兴安盟和通辽市北部, 共 38 个市(盟、州)163 个县(市、旗), 也均有黑土区域分布, 总面积约 25.1 km^2 , 典型黑土区 10.4 万 km^2 。然而近半个世纪, 黑土层厚度下降 30—40 cm ^[7]。且约有 10% 的农田黑土层流失, 出现“破皮黄”现象。不合理的耕作方式是影响坡耕地黑土流失的重要因素之一^[3, 8-9]。为此, 近年来耕作方式对土壤侵蚀的影响研究越来越受到重视^[10]。顺坡垄作作为一种耕作方式, 由于垄作的汇流效应, 导致坡面土壤侵蚀严重^[11-13], 且顺坡垄作条件下, 径流和侵蚀的变异系数较大。如长期顺坡垄作会导致坡耕地更严重的土壤侵蚀^[14-15]。已有研究表明, 与传统的顺坡垄作相比, 横坡垄作可以通过改变地表微地形、增加地表糙率来减少径流, 垄台还可以有效地降低径流流速、增加入渗, 从而减少泥沙的剥离和输移^[16-17], 但横坡垄作不同于梯田土埂, 垄台稳定性较差, 因此在有暴雨时易发生断垄涌流, 另外, 由于微地形的影响, 横坡垄作难以严格按照等高线进行修建, 水流在下垫面低处汇集仍会造成垄台更严重的失稳、塌陷^[18], 引起更剧烈的水土流失^[19]。斜坡垄耕是不规则地形上沿顺坡和横坡垄作的一种特殊垄作方式^[20]。当坡面走向与等高线成一定角度时, 顺坡垄作和横坡垄作便表现为斜坡垄作。比较顺坡垄作, 斜坡垄作可以增加降雨对坡面的入渗, 在一定程度上保留地表径流, 从而达到治理水土流失的目的。

综上所述, 现有的研究主要对单一耕作坡面产流产沙过程较多, 缺乏对比性^[21]。目前, 较多试验集中在 10~20 m 坡长径流小区的数据分析, 长坡长的试验研究较少, 且对于黑土区土壤侵蚀现有研究大多停留在野外径流小区定位监测、室内模拟降雨试验等方法, 野外原位试验较少。为此, 本文基于野外天然坡面, 对 30 m 坡长小区进行放水冲刷试验, 以深翻后无垄作为对照, 研究变冲刷流量下东北黑土区不同垄作措施产流、产沙特征。辨析顺坡垄作对黑土区坡面侵蚀特征的影响以及横坡垄作和斜坡垄作对坡面上方来水的防蚀效应, 为东北黑土区土壤侵蚀的防治提供理论依据。

1 材料与方法

试验区位于内蒙古自治区扎兰屯市($123^\circ 07' 72''\text{E}$, $48^\circ 01' 40''\text{N}$)当地属于温带大陆性气候, 年平均气温 3.2°C , 平均降雨量 500 mm 左右。地形西高东低, 以丘陵为主, 四季冷暖干湿分明, 雨水分布不均, 降雨主要集中在 7—9 月。土壤以黑土为主, 水土流失严重且主要类型为水力侵蚀。坡面坡度约为 3.0° 。

试验共设置径流小区 4 个, 其中包括对照(无垄作)小区和(顺坡垄作、斜坡垄作、横坡垄作)3 种具有不同水保措施的径流小区。各小区坡度约为 3.0° , 坡长 30 m、宽 3 m, 其边界均为埋入地下 30 cm、高出地表 20 cm 的铁板, 小区建成后, 将小区进行深翻, 利用人工按当地现有耕作方式进行起垄, 分别建设横垄、斜坡和顺垄, 垄宽 66 cm, 高 20 cm, 见图 1。

通过分析当地近三年降雨数据, 发现雨强大多集中在 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, 分别设定 20 mm/h、40 mm/h 和 60 mm/h 3 种雨强的冲刷, 即冲刷流量为 30 L/min, 60 L/min 和 90 L/min, 冲刷试验从上方放水开始计时到产流 27 min 后结束, 每次冲刷结束, 为保证小区下垫面与初始下垫面相同, 采用填土法将水流路径填平、压实。每次冲刷前 24 h 对坡面进行均匀洒水, 直至产流, 确保每次冲刷前土壤含水率基本保持不变。冲刷开始后, 记录放水时间, 待下方产流, 每间隔 3 min 取样一次, 共 9 次, 用时 27 min。采集过程中记录每个时间段的径流总量。将取好样品带回实验室, 烘干、称重。用以计算径流率、含沙量、径流总量、含沙总量。

试验数据采用 Excel 2016 和 Oingin 2019 进行分析和作图。

2 结果与分析

2.1 不同措施对坡面产流起始时间的影响

产流起始时间是坡面综合效果的反映, 不同的耕作措施导致产流起始时间具有差异性, 不同冲刷流量对相同耕作措施黑土坡面的产流起始时间也有很大的影响^[22]。由图 2 可知, 冲刷流量越大, 产流起始时间越短。其主要原因是冲刷流量越大, 坡面水流动力强, 坡面极易形成固定水流路径, 从而使入渗能力减弱, 因此产流起始时间随冲刷流量增大而减小^[23]。然而在 3 种冲刷流量下, 顺坡垄作产流起始时间均最短, 横坡垄作产流起始时间最长, 不同耕

作措施产流起始时间规律为横坡垄作>斜坡垄作>无垄作>顺坡垄作。无垄作小区作为对照,地表裸露、无耕作措施引起的微地貌起伏,无法截留上方水流,因此产流起始时间较快。顺坡垄作为坡面水流提供固定路径,从而加速坡面水流流速,与无垄作相

比产流起始时间提前。横坡垄作和斜坡垄作比无垄作产流起始时间晚,主要是因为垄沟有蓄水作用,阻碍坡面水流流速,增加入渗,且垄沟容积、深度较大,需蓄满所有垄沟后才可产流。此结论与边锋等^[10]研究结果一致。

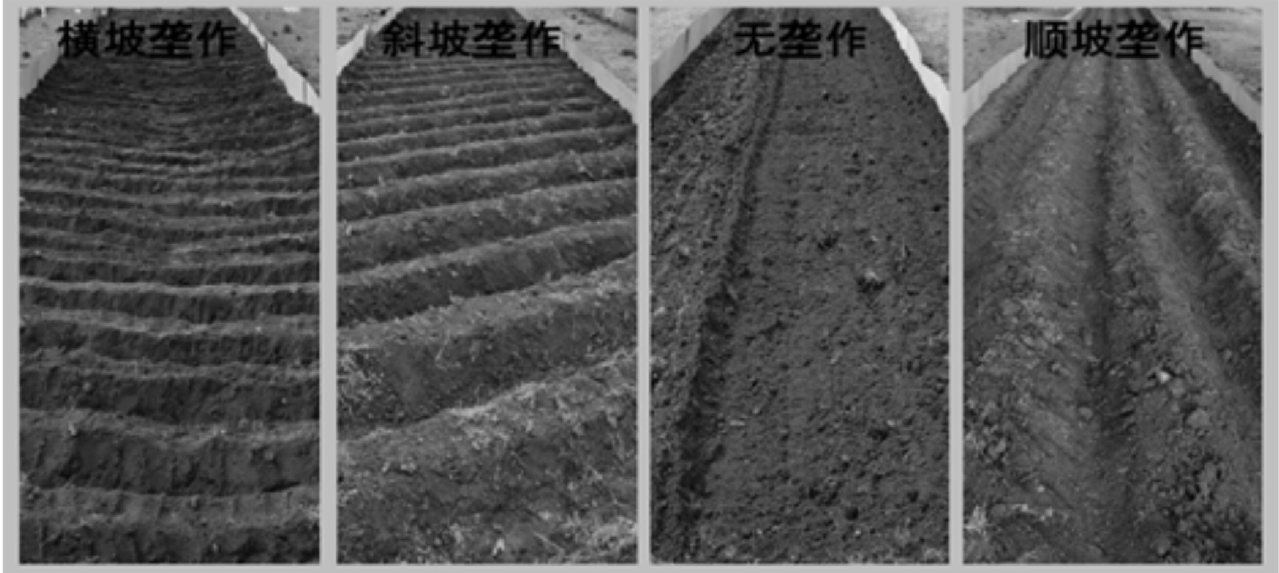


图 1 径流小区布设

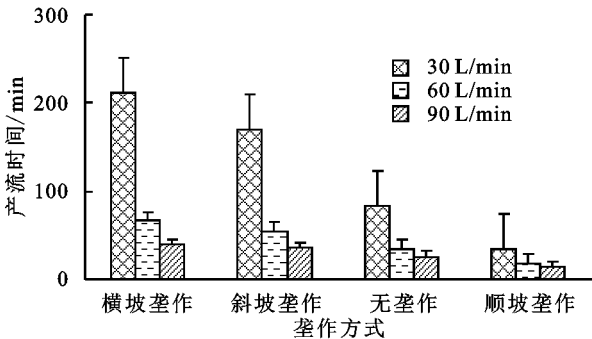


图 2 不同垄作措施的初始产流起始时间

2.2 不同垄作措施对产流、产沙特征影响

2.2.1 不同垄作措施对产流率影响 不同垄作措施下产流率随时间的变化规律见图 3,本试验条件,不同处理小区产流率在径流初期均有明显增加趋势,而后某一刻达到峰值呈逐渐递减最终趋于平稳,但受冲刷流量强弱影响,各处理措施坡面产流率呈现不同的变化规律。30 L/min 放水冲刷,横坡垄作和斜坡垄作产流率在 6 min 前后出现明显的峰值,之后骤减很快趋于平稳。无垄作与顺坡垄作在此冲刷条件下均呈缓慢增加趋势,在 12 min 达最大后趋稳。冲刷流量 60 L/min 时,4 种垄作产流率均有明显增加,且增加趋势相对平缓;而冲刷流量增至 90 L/min 后,横坡垄作和斜坡垄作最大产流率提前至 3 min,并在 12 min 趋于平稳。此时无垄作与顺坡垄作无明显的波动。顺坡垄作与无垄作产流率在产流初期缓慢增加,是因为产流开始后坡面入渗性能逐渐减弱,根据土壤

饱水原理,坡面径流流量逐步增大,直至坡面入渗稳定,径流在某个小范围内稳定波动^[24]。横坡垄作与斜坡垄作径流率在初期骤增达峰值后逐渐稳定,且上方来水流量越大峰值越提前。主要因为随着时间的继续,水流蓄满垄沟,垄台产生小跌坎,产生破顶效应,此刻产流率达到最大值,而之后逐步减小并趋于平稳。而当上方冲刷流量增大后,水流动力较大,垄台失稳、崩塌会提前,极易形成新的水流路径,因此大流量冲刷,不但径流较高,径流率最大值出现时间以及径流率达稳定时间也会提前。

2.2.2 不同垄作措施对含沙量影响 含沙量随冲刷流量的变化主要与土壤剥蚀情况与泥沙运移能力有关^[25]。东北黑土区不同垄作坡面径流含沙量随冲刷流量变化见图 4,由图可知,30 L/min 和 60 L/min 冲刷条件下,横坡垄作与斜与坡垄作含沙量均从初始 2.5 g/L 上下分别缓慢下降到 0.75 g/L 和 1.5 g/L,无垄作与顺坡垄作含沙量也呈缓慢减小规律;90 L/min 冲刷流量,横坡垄作与斜坡垄作初始含沙量是无垄作的 3 倍,随之两垄作含沙量由初始 9 g/L 骤减至 2 g/L,而无垄作和顺坡垄作含沙量均集中在 2.1 g/L 左右波动。由此可见,各垄作坡面含沙量基本在起始阶段出现最大值,随后逐渐减小并趋于稳定的趋势。此结果与其他地区坡面产沙特征研究结论相同^[26-27]。原因是在放水冲刷前,小区坡面上含有较多松散的浮土,而试验冲刷流量产生的坡面水流能量恰好能搬运这些泥沙,所

以此时含沙量高。随着试验的继续,坡面可被搬运的泥沙逐步减少。在试验过程中发现,冲刷后期,水流

主要以冲刷细沙为主,整个坡面形态不发生明显形态变化下,含沙量逐步趋于稳定^[28]。

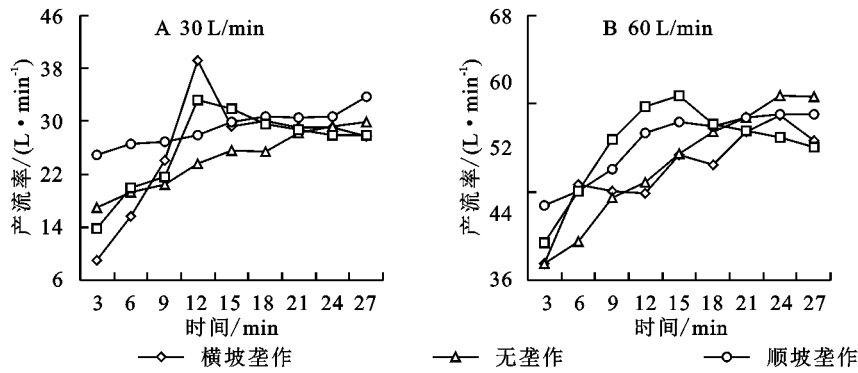


图3 不同垄作措施下产流率变化特征

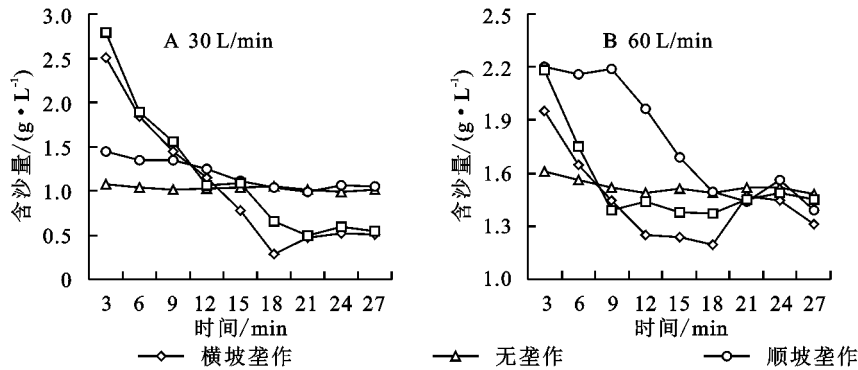


图4 不同垄作措施含沙量变化特征

随着冲刷流量的增强,径流含沙量也随之升高且变异系数变大。主要原因有两个方面:一是放水冲刷初期坡面松散的浮土为侵蚀提供了充足的沙源;二是足够大的冲刷流量产生较大坡面侵蚀力,使得垄作坡面出现明显的细沟,细沟下切,并发生细沟间侵蚀^[29],导致含沙量增大以及含沙量的变异系数加大。以上结果表明坡面冲刷强弱和垄作方式对坡面侵蚀过程影响显著,我们必须采取合理水土保持措施(增加垄沟宽度^[17]、压实耕作垄台)防止东北黑土区垄作耕地坡面侵蚀。

2.3 不同垄作措施对累积产流量、累积产沙量影响

不同垄作措施下累积产流量随冲刷流量的变化关系如(图5A),累积产流量随冲刷流量增加而增大。在相同冲刷流量下,由于垄作方式引起的坡面糙度变化致使累积产流量发生改变,相同时间顺坡垄作累积产流量相对较大,主要是因为顺坡垄作为水流提供稳定水流通路,上方冲刷流量相同情形下,坡面水流可沿耕作垄沟流下,减少入渗,产流起始时间短且径流达稳定时间也短,因此在相同时间的径流收集里,累积径流量较大。整个放水冲刷过程无垄作产流量较小主要原因是,坡面水流自上而下流动情况下,由于水流与坡面接触较大,加之土壤疏松,相同收集时间内,虽有径流收集,但部分水流在下行过程中已经产生

入渗。30 L/min 与 60 L/min 冲刷条件下,各垄作累积径流量比较接近,而当冲刷流量变为 90 L/min 后,各垄作坡面累积径流量差异明显,大小表现为:顺坡垄作>横坡垄作>斜坡垄作>无垄作。其原因是在小流量冲刷条件下,伴随坡面水流下行过程,虽然垄作方式通过入渗改变了产流起始时间,引起径流率有不同的变化规律,但产流后下方径流主要受冲刷流量影响较大,因此相同时段内累积径流量几乎一致。当冲刷流量增大后,水流动力增强,在坡面水流蓄满垄沟后短时间内极易形成破垄,接续破垄切口逐渐扩大加速水流外泄,所以短时内累积径流量有所增大。

由图5B可看出,冲刷流量是影响坡面土壤侵蚀的直观因素,同种垄作措施冲刷流量越大水土流失越严重;然而不同垄作方式受冲刷流量影响,累积产沙量有不同变化规律。30 L/min 和 60 L/min 两种冲刷流量下,顺坡垄作水土流失相对严重,但各坡面累积产沙量总体相差不大,其原因是两种冲刷条件产生的坡面水流下行过程中主要以搬运松散泥沙为主,弱水流难以对沟垄产生破坏性侵蚀。当冲刷流量增至 90 L/min 后,与 30 L/min 冲刷相比,横坡垄作与斜坡垄作的侵蚀分别增加了 12.78 倍和 10.11 倍,大小表现为:横坡垄作>顺坡垄作>斜坡垄作>无垄作。

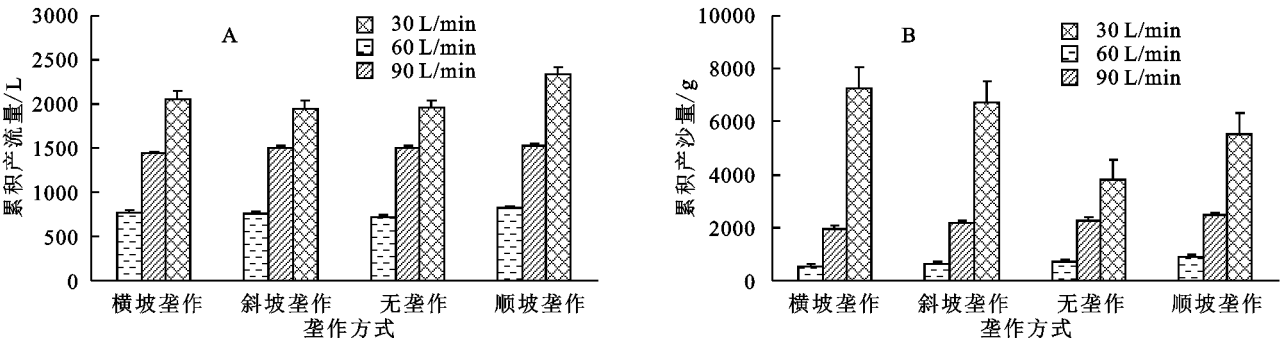


图 5 不同垄作措施下累积产流量、累积产沙量

以上分析数据表明,在不同垄作措施的黑土缓坡耕地上,累积产沙规律存在一定差异性,笔者认为形成差异主要受黑土区坡耕地产流机制和垄作方式所改变产流过程所影响。现有研究结果^[30]表明,耕作使坡面表层土壤重新分布,形成具有一定空间结构的微地形。由于不同耕作措施对表层土壤的扰动方式不同,致使坡面微地形存在差异。在 60 L/min 和 30 L/min 流量冲刷下,横坡垄作和斜坡垄作形成垄沟交错的微地貌,垄沟的蓄水和垄台的拦截相结合,上方来水只能蓄满垄沟后溢过垄台方可继续下行,产生侵蚀。在缓坡耕地上,坡面水流弱,垄不易崩塌,侵蚀沟较难形成,水流主要以搬运松散泥沙为主,所以累积产沙量低。但冲刷流量增至 90 L/min 后,强水流极易使垄台发生断坎、崩塌,加之强水流的下切作用,使坡面细沟侵蚀不断完整,两种耕作措施反而侵蚀更严重。

2.4 不同垄作措施下产流产沙之间的关系

2.4.1 产流、含沙的相关性分析 通过分析 30 L/min, 60 L/min 和 90 L/min 3 种冲刷流量下横坡垄作、斜坡垄作、无垄作与顺坡垄作 4 种垄作措施坡面含沙量、产流率、泥沙量、径流量、产流起始时间、冲刷流量之间的线性关,结果表明,不同冲刷条件下,大部分指标呈正相关关系,15 种相关关系中 12 种为正相关,2 种负相关,1 种不相关。斜坡垄作冲刷条件下,15 种相关关系中 11 种为正相关,3 种负相关,1 种不相关,无垄作状况下,10 种正相关,4 种负相关,1 种不相关,顺坡垄作条件下,13 种正相关,1 种负相关,1 种不相关。对比发现,4 种处理措施状况下,产流起始时间与冲刷流量均不相关,含沙量与径流时间均呈负相关。其他试验条件下,因冲刷流量和垄作措施的差异导致出现不同相关性。当冲刷流量较小时,各坡面水流路径稳定,坡面细沟分支较少,因此径流含沙量波动性小。上方冲刷水流增大后,坡面水流路径不稳定,细沟分支多,径流携带泥沙量随时间波动性大。垄作方式严重影响着坡面水流通路以及重力势能,顺坡垄作和无垄作含沙量与产流率相关性更

强。因此东北现存大面积横坡垄作状况下应适当调控垄作方式来调控极强暴雨引起的侵蚀,提高坡面保水减蚀性能。

2.4.2 累积产流量与累积产沙量间的关系 分别拟合横坡垄作、斜坡垄作、无垄作、顺坡垄作 4 种处理措施下累积产流量与累积产沙量随冲刷流量变化的关系(表 1)。由表 1 可知,累积径流量与泥沙之间存在良好的线性关系。从方程中可以看出,累积产沙量随累积产流量的增加而增加。线性关系强弱表现为:顺坡垄作>无垄作>横坡垄作>斜坡垄作。

表 1 累积产流量与累积产沙量间的关系

垄作方式	拟合方程	决定系数 R^2
横坡垄作	$y = 5.2232x - 4178.8$	$R^2 = 0.885$
斜坡垄作	$y = 4.8214x - 3674.8$	$R^2 = 0.8025$
无垄作	$y = 2.4123x - 1095.3$	$R^2 = 0.9769$
顺坡垄作	$y = 3.0821x - 1840.2$	$R^2 = 0.9776$

3 结论

(1) 相同垄作措施下,冲刷流量越大,产流起始时间越短;冲刷流量恒定,4 种耕作措施产流起始时间长短表现为横坡垄作>斜坡垄作>无垄作>顺坡垄作。

(2) 累积产流量随冲刷流量增加而增大;不同处理小区产流率在产流初期均有明显的增加趋势,而后某一刻达到峰值逐渐递减最终趋于平稳,但受冲刷流量强弱影响,各处理措施坡面产流率有不同的变化规律。

(3) 30 L/min 和 60 L/min 冲刷条件下土壤侵蚀表现为:顺坡垄作>无垄作>斜坡垄作>横坡垄作;冲刷流量 90 L/min 时,侵蚀强弱变为:横坡垄作>斜坡垄作>顺坡垄作>无垄作。这是因为在小流量冲刷条件下,坡面水流动能弱,不易携泥沙下行;加之横坡垄作和斜坡垄作改变下垫面,水流沿坡面向下流动会先进行垄沟横向流通,减小了水流对坡面的剥蚀,从而土壤流失量减少。当冲刷流量增大后,横坡与斜坡垄作极易断垄,坡面形成细沟,并产生细沟间侵蚀,所以此时较顺坡垄作与无垄作相比累积产沙量增幅明显,此时

垄台倒塌土体是横坡与斜坡垄作侵蚀泥沙的主要来源。垄作方式作为影响黑土区水土流失的重要因子,也是土壤侵蚀的主要来源,此结果与较多学者研究结论一致^[17,32-33]。顺坡垄作加剧侵蚀主要原因是:顺坡垄作沟内易使坡面水流汇集,汇集水流的冲刷使垄沟内形成明显的细沟下切,伴随细沟不断溯源,坡面侵蚀逐步加剧,这与边锋等^[10]研究结果一致。

(4) 4种垄作措施状况下,产流起始时间与冲刷流量均不相关,含沙量与径流时间均呈负相关。其他试验条件下,因冲刷流量和垄作措施的差异导致出现不同相关性。4种措施下累积产沙量均随冲刷流量增大依次递增,此结论与不同垄作措施下紫色土壤坡耕地产流产沙过程相同^[34]。坡面水流作为水土流失的原动力,土壤侵蚀与地表径流有密切联系。本研究发现,4种垄作措施产沙量与产流量呈良好的线性关系,且拟合系数 R^2 均在0.80以上。这与吴淑芳等^[35]已有研究成果相似。

根据降雨强度调控冲刷流量进行放水冲刷试验,为东北黑土区不同垄作措施土壤侵蚀特征提供了一些理论依据。但放水冲刷试验并不能完全代表天然降雨的坡面产流产沙过程;且径流小区大小不能代表真实的田间条件,径流被迫集聚在犁沟内,由于径流小区的侧壁,径流无法横向排除,因此超过犁沟存储量,就会出现坡顶现象。

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.
- [2] 李发鹏,李景玉,徐宗学.东北黑土区土壤退化及水土流失研究现状[J].水土保持研究,2006,13(3):50-54.
- [3] 郑粉莉,边锋,卢嘉.雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响[J].农业机械学报,2016,47(2):90-97.
- [4] 刘晓昱.黑土流失与整治[J].水土保持研究,2005,12(5):132-133,156.
- [5] 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):236-240.
- [6] 齐智娟,张忠学,杨爱峥.黑土坡耕地几种水土保持措施的蓄水保土效应研究[J].水土保持研究,2011,18(5):72-75.
- [7] Zhang Y, Wu Y, Liu B, et al. Characteristics and factors controlling the development of ephemeral gullies in cultivated catchments of black soil region, Northeast China[J]. Soil & Tillage Research, 2007,96(1/2):28-41.
- [8] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等.东北漫岗黑土区切沟侵蚀发育特征[J].地理学报,2007,62(11):1165-1173.
- [9] Nunes A N, Almeida A, Coelho C. Impacts of land use and cover type on runoff and soil erosion in a marginal area of Portugal[J]. Applied Geography, 2011,31(2):687-699.
- [10] 边锋,郑粉莉,徐锡蒙,等.东北黑土区顺坡垄作和无垄作坡面侵蚀过程对比[J].水土保持通报,2016,36(1):11-16.
- [11] Xu X, Zheng F, Wilson G V, et al. Comparison of runoff and soil loss in different tillage systems in the Mollisol region of Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2018,177:1-11.
- [12] 王鸿斌,赵兰坡,王杰,等.松辽平原玉米带黑土不同耕作制度下的土壤侵蚀特征研究[J].水土保持学报,2005,19(2):26-28,40.
- [13] 霍军力,王永成,董斌.东北黑土区坡耕地地表径流的影响因素分析:兼谈水土流失对策[J].黑龙江水利科技,2008,36(5):93-94.
- [14] 付斌,胡万里,屈明,等.不同农作措施对云南红壤坡耕地径流调控研究[J].水土保持学报,2009,23(1):17-20.
- [15] 沈昌蒲,龚振平,温锦涛.横坡垄与顺坡垄的水土流失对比研究[J].水土保持通报,2005,25(4):48-49.
- [16] 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.
- [17] Gebregziabher T, Nyssen J, Govaerts B, et al. Contour furrows for in situ soil and water conservation, Tigray, Northern Ethiopia[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 103(2):257-264.
- [18] Juan, An, QianJin, et al. Soil aggregate breakdown in response to wetting rate during the inter-rill and rill stages of erosion in a contour ridge system[J]. Catena, 2017,157:241-249.
- [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] 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.
- [21] 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.
- [22] Borselli L, Torri D, Poesen J, et al. Effects of water quality on infiltration, runoff and interrill erosion processes during simulated rainfall[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2001,26(3):329-342.
- [23] Vermang J, Norton L D, Huang C, et al. Characterization of soil surface roughness effects on runoff and soil erosion rates under simulated rainfall[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010,79(3):903-916.
- [24] 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.
- [25] Nearing M A, Norton L D, Bulgakov D A, et al. Hydraulics and erosion in eroding rills[J]. Water Resources Research, 1997,33(4):865-876.

- sion by field plots: Understanding the sources of variation[J]. *Earth Science Review*, 2006, 78(3/4): 267-285.
- [10] Boer M, Puigdefábregas J. Effects of spatially structured vegetation patterns on hillslope erosion in a semiarid Mediterranean environment: A simulation study[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30(2): 149-167.
- [11] 高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 等. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(1): 12-22.
- [12] 党小虎, 吴彦斌, 刘国彬, 等. 生态建设 15 年黄土高原生态足迹时空变化[J]. *地理研究*, 2018, 37(4): 761-771.
- [13] 张宝庆, 邵蕊, 赵西宁, 等. 大规模植被恢复对黄土高原生态水文过程的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(3): 594-606.
- [14] 任宗萍, 李占斌, 李鹏, 等. 黄土高原植被建设应从扩大面积向提升质量转变[J]. *科技导报*, 2018, 36(14): 12-14.
- [15] 秦伟, 曹文洪, 郭乾坤, 等. 植被格局对侵蚀产沙影响的研究评述[J]. *生态学报*, 2017, 37(14): 4905-4912.
- [16] 李鹏, 崔文斌, 郑良勇, 等. 草本植被覆盖结构对径流侵蚀动力的作用机制[J]. *中国水土保持科学*, 2006, 4(1): 55-59.
- [17] 周佩华, 王占礼. 黄土高原土壤侵蚀暴雨的研究[J]. *水土保持学报*, 1992, 6(3): 1-5.
- [18] Yang C. T. minimum unit stream power and fluvial hydraulics [J]. *Journal of the Hydraulics Division, Asae*, 1976(102): 919-934.
- [19] 鲁克新, 李占斌, 鞠花. 径流侵蚀功率理论在不同尺度坡面侵蚀产沙中的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2009, 20(4): 70-73.
- [20] 吴蕾, 穆兴民, 高鹏, 等. 黄土高原地区植被盖度对产流产沙的影响[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 133-138.
- [21] 刘一帆. 半干旱区植被恢复的水土流失调控效应研究 [M]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [22] 张霞, 李鹏, 李占斌, 等. 坡面草带分布对坡沟水土流失的防控作用及其优化配置[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(7): 122-128.
- [23] 陈倩, 傅瑜, 余冬立, 等. 坡面产流产沙过程对植被过滤带响应的试验研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 104-109.
- [24] 潘成忠, 上官周平. 牧草对坡面侵蚀动力参数的影响[J]. *水利学报*, 2005, 36(3): 371-377.
- [25] 苏远逸, 李鹏, 李占斌, 等. 坡面植被格局对坡沟系统能量调控及水沙响应关系的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 32-39.
- [26] Moor I P, Burch G I. Sediment transport capacity of sheet and rill flow: application of unit stream power theory[J]. *Water Resources Research*, 1986, 22(8): 1350-1360.

(上接第 13 页)

- [26] 郑海金, 杨洁, 张洪江, 等. 南方红壤区农田道路强降雨侵蚀过程试验[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(9): 85-90, 98.
- [27] 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.
- [28] 郑子成, 林代杰, 李廷轩, 等. 不同耕作措施下成熟期玉米对径流及侵蚀产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 24-28.
- [29] 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 162-170.
- [30] 赵龙山, 张青峰, 宋向阳, 等. 基于微尺度下 DEM 的黄土坡耕地地表坑洼特征研究[J]. *土壤学报*, 2012, 49(1): 179-183.
- [31] 林超文, 罗春燕, 庞良玉, 等. 不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(22): 6091-6101.
- [32] Liu Q J, Shi Z H, Yu X X, et al. Influence of microtopography, ridge geometry and rainfall intensity on soil erosion induced by contouring failure[J]. *Soil & Tillage Research*, 2014, 136: 1-8.
- [33] 覃超, 何超, 郑粉莉, 等. 黄土坡面细沟沟头溯源侵蚀的量化研究[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(6): 160-167.
- [34] 任雨之, 郑江坤, 付滢, 等. 不同耕种模式下遂宁组紫色土坡耕地产流产沙特征[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 30-38.
- [35] 吴淑芳, 吴普特, 宋维秀. 坡面调控措施下的水沙输出过程及减流减沙效应研究[J]. *水利学报*, 2010, 41(7): 870-875.