东北黑土区顺坡垄作和无垄作坡面侵蚀过程对比

边 锋[1], 郑粉莉[1,2], 徐锡蒙[2], 卢 嘉[2], 覃 超[2], 吴红艳[2]

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院 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. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: [目的] 以无垄作坡面侵蚀过程为对照,研究顺坡垄作坡面土壤侵蚀过程及机理,为东北黑土区坡耕地土壤侵蚀防治提供科学依据。[方法] 基于人工模拟降雨试验,设计了 3 个降雨强度(50,75 和 100 mm/h)以及 1 个坡度(即顺坡垄作改横坡垄作的临界坡度 5°),进行顺坡垄作和无垄作坡面侵蚀过程的对比研究。[结果] 顺坡垄作坡面径流量和侵蚀量分别较无垄作坡面增加了 1.2～1.7 和 1.3～2.1 倍,径流和侵蚀过程也发生了变化。与无垄作坡面相比,顺坡垄沟的集中汇流作用使坡面水流流速增加了 1.0～2.3倍,径流剪切力增加了 0.7～1.2 倍,其坡面侵蚀方式也由片蚀为主转变为以细沟侵蚀为主,细沟侵蚀量可占总侵蚀量的 55.3%～65.6%。[结论] 坡面水流流速增加和细沟侵蚀发生是导致顺坡垄作坡面土壤侵蚀增加的主要原因。

关键词: 顺坡垄作; 坡面侵蚀; 东北黑土区; 人工模拟降雨

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2016)01-0011-06 **中图分类号**: S157.1

文献参数: 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.01.003

Comparison of Soil Erosion Process Between Longitudinal Ridge Slope and Non-ridge Slope in Mollisol Region of Northeast China

BIAN Feng[1], ZHENG Fenli[1,2], XU Ximeng[2], LU Jia[2], QIN Chao[2], WU Hongyan[2]

(1. *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, College of Natural Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: [Objective] Longitudinal ridge slope soil erosion process was studied by using non-rige slope as control in order to provide scientific basis for the prevention and control of soil erosion in the northeast mollisol region slope. [Methods] Simulated rainfall experiments were conducted. The experimental treatments included two tillage measures (longitudinal ridge and non-ridge tillage), three rainfall intensities (50, 75 and 100 mm/h) and one slope gradient (5°, which was the critical slope gradient for changing longitudinal ridge to contour cultivation). [Results] Compared with non-ridge tillage, the total runoff rate and total erosion amount of the longitudinal ridge tillage increased by 1.2～1.7 times and 1.3～2.1 times, respectively. The runoff and sediment process also changed. Compared with non-ridge treatment, the concentrated runoff velocity in furrows of the longitudinal ridge increased by 1.0～2.3 times and shear strength increased by 0.7～1.2 times. Consequently, hillslope erosion pattern shifted from sheet erosion dominant to rill erosion dominant, and rill erosion occupied 55.3%～65.6% of total erosion amount at longitudinal ridge treatments. [Conclusion] The increase of runoff velocity and occurrence of rill erosion were two main reasons for the intensification of hillslope erosion at the longitudinal ridge treatment.

Keywords: **longitudinal ridge; hillslope erosion; mollisol region; simulated rainfall**

收稿日期:2015-05-20 **修回日期**:2015-07-13

资助项目:国家自然科学基金项目"黑土区多种外营力互作的坡面侵蚀过程与机制"(41571263)

第一作者:边锋(1988—),男(汉族),山西省寿阳县人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀过程。E-mail:sybfeng1227@163.com。

通讯作者:郑粉莉(1960—),女(汉族),陕西省蓝田县人,研究员,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。

耕作方式可明显改变坡面径流和侵蚀过程,因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。不同耕作方式下坡耕地土壤侵蚀特征有明显差异,在东北黑土区常见的耕作方式中,顺坡垄作坡面径流量大,侵蚀最为剧烈[1-3],且顺坡垄作径流量和侵蚀量的变异系数最大[4]。长期使用顺坡垄作,可加剧坡耕地土壤侵蚀[5]。王勇强等[6]研究了川中丘陵紫色土区两种典型耕作方式下的土壤侵蚀过程,发现在雨强大于50 mm/h情况下,顺坡垄作的坡面侵蚀率与无垄作坡面有明显的差异。

东北黑土区作为中国的商品粮基地,在中国的粮食安全方面占有举足轻重的地位。由于自然因素和人类长期的不合理的生产活动,该地区土壤侵蚀严重[7]。顺坡垄作作为东北黑土区常见的耕作方式之一,在东北黑土区坡耕地比例很大[8]。此外研究表明,雨季短历时、高强度的暴雨也是造成该区土壤侵蚀的主要原因[9-10]。但关于高强度暴雨下顺坡垄作坡面侵蚀过程的定量研究较少,且开展顺坡垄作对坡面侵蚀的影响研究将为针对性的开展坡耕地水土保持工作提供重要的科学依据。因此,本文采用人工模拟降雨试验,以无垄作坡面为对照,比较分析不同雨强条件下顺坡垄作对黑土区坡面土壤侵蚀过程的影响,以期为东北黑土区坡耕地土壤侵蚀防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验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进行。降雨设备为侧喷式人工降雨装置,降雨高度16 m,雨滴直径和雨滴分布与天然降雨相似[11],降雨均匀度大于85%。试验土槽采用8 m(长)×3 m(宽)×0.6 m(深)的固定式液压可升降钢槽,中间用PVC板隔成2个1.5 m宽的试验土槽。

供试土壤采集于东北黑土区中心地带的吉林省榆树市刘家镇,地理位置为44°43′N,126°11′E。供试土壤黏粒(<2 μm)、粉粒(50~2 μm)与砂粒(2 000~50 μm)含量分别为20.3%,76.4%和3.3%,pH值(水浸提法,水土比2.5∶1)为6.39,土壤有机质(重铬酸钾氧化—外加热法)含量24.18 g/kg。

1.2 试验设计

本研究以无垄作坡面作为对照,共设计6个试验处理,通过模拟降雨试验研究顺坡垄作对黑土区坡面土壤侵蚀的影响。具体试验设计为:① 根据东北黑土区侵蚀性降雨标准[12](I_5=1.34 mm/min,5 min瞬时雨量为6.7 mm),结合试验实际情况,设计3个降雨强度(50,75,100 mm/h,即0.83,1.25,1.67 mm/min);② 根据野外调查结果和相关文献资料[13],设计顺垄垄高为15 cm,垄间距为65 cm;③ 基于当地顺坡垄作改为横坡垄作的临界坡度[14],设计试验坡度为5°。每个试验处理设计2个重复,每场次试验降雨历时为45 min。

1.3 试验步骤

对试验填土采取不研磨不过筛处理,尽量保持土壤的原有结构免遭破坏,保证试验土壤形状一致。试验土槽填土时,首先在试验土槽底部每1 m长均匀打4个孔径为2 cm的排水孔,用纱布填充试验土槽底部的排水孔,随后填入5 cm厚的细沙作为透水层,保证模拟降雨试验过程中土槽良好的透水性。沙层之上填装15 cm厚的犁底层和20 cm厚的耕作层。黑土耕层土壤容重变化范围为1.15~1.25 g/cm^3,犁底层土壤容重变化范围为1.28~1.48 g/cm^3[14],结合野外测量结果,设计耕层土壤容重为1.20 g/cm^3,犁底层土壤容重为1.35 g/cm^3。每次装填试验土槽前,测定土壤含水量结合设定容重值确定每层所需的土壤重量。为保证填土的均匀性,采用分层填土法,每5 cm为1层。装上层土之前,要先用齿耙将土壤表面耙松,以减少土壤分层现象。同时填土时还要将试验土槽四周边界压实,减少边界效应的影响。

对于填装好的试验土槽,在耕层之上按照垄高15 cm,垄间距65 cm做顺坡垄,土壤容重控制在1.00~1.10 g/cm^{3}内。为保证下垫面土壤含水量的一致性,且减少雨滴打击对土壤水分入渗的影响,在试验前一天,用纱网覆盖试验土槽,用30 mm/h雨强进行预降雨直至坡面产流为止。预降雨结束后,为防止试验土槽土壤水分蒸发和减缓结皮形成,用塑料布覆盖试验土槽,静置12 h后开始正式降雨。正式降雨开始后即仔细观察坡面产流情况,记录初始产流时间并接取第一个径流泥沙样,待产流稳定后每隔2~3 min采集径流样。降雨过程中用高锰酸钾染色法测量垄坡和垄沟的地表径流表层流速,用直尺法测量水深,并记录试验水温。降雨结束后,去除径流样的上层清液,然后放入设置恒温为105 ℃的烘箱,烘干后测得泥沙重。

1.4 数据处理

本文选取径流流速和径流剪切力指标来对比研究顺坡垄作和无垄作坡面的径流特征。考虑到使用染色剂示踪法测定的流速为优势流流速,实测流速乘以修正系数0.75,作为水流断面平均流速。径流剪切力是破坏和分散土壤颗粒的主要动力。水流剪切

力的计算公式如下:

$$\tau=\gamma RJ \quad (1)$$

式中:τ——径流剪切力(Pa);γ——水的重度,$\gamma=\rho g$;R——水力半径,$R=Bh/B+2h$;B——流宽或侵蚀沟宽度(cm);h——水流水深(cm)。

2　结果与讨论

2.1　顺坡垄作和无垄作坡面的径流总量和侵蚀总量

不同降雨强度下顺坡垄作和无垄作坡面的径流总量和侵蚀总量均存在差异(表 1)。顺坡垄作和无垄作坡面的径流总量和侵蚀总量均随降雨强度的增加而增大。当降雨强度由 50 mm/h 增加到 75 mm/h 时,顺坡垄作和无垄作坡面径流总量分别增加了 81.9%和 68.2%,侵蚀总量分别增加了 84.6%和 113.5%;当降雨强度由 75 mm/h 增加到 100 mm/h 时,无垄作坡面的径流总量和侵蚀总量分别增加了 85.0%和 243.7%,而顺坡垄作坡面径流总量和侵蚀总量则分别增加了 51.2%和 152.8%。

表 1　不同降雨强度下无垄作坡面的径流量与侵蚀量

降雨强度/(mm·h^{-1})	耕作方式	总径流量/mm	增加率/%	平均径流强度/(mm·h^{-1})	总侵蚀量/kg	增加率/%	平均侵蚀率/(kg·m^{-2}·h^{-1})
50	无垄作坡面	8.9	—	11.9	2.4	—	0.6
	顺坡垄作	22.3	150.7	29.8	6.4	169.0	1.6
75	无垄作坡面	15.0	—	20.0	4.4	—	1.1
	顺坡垄作	40.6	171.1	54.1	13.7	211.1	3.5
100	无垄作坡面	27.7	—	36.9	15.2	—	3.9
	顺坡垄作	61.4	121.7	81.9	34.7	128.8	8.9

对比顺坡垄作和无垄作坡面径流总量(表 1),发现当降雨强度为 50 mm/h 时,顺坡垄作坡面的径流量为无垄作坡面的 2.5 倍;当降雨强度继续增加到 75,100 mm/h 时,其值分别为 2.7,2.2 倍。同一雨强下,顺坡垄作使径流沿垄坡迅速汇集,从而导致顺坡垄作的径流总量大于无垄作坡面。表 1 同样表明,顺坡垄作明显增加了坡面侵蚀量,3 种降雨强度下,顺坡垄作较无垄作坡面侵蚀量增加 1.3～2.1 倍;这与宋玥等[15]结论基本一致,即顺坡垄作加剧了黑土区坡面土壤侵蚀的发生。

2.2　顺坡垄作和无垄作坡面土壤侵蚀过程对比

2.2.1　*顺坡垄作和无垄作坡面下径流强度动态变化过程*　顺坡垄作和无垄作坡面的径流强度随降雨历时增加皆呈先增大后逐渐趋于稳定的变化趋势(图 1);但顺坡垄作坡面产流时间明显早于无垄作坡面,前者较后者产流时间提前 57～211 s,其受降雨强度的影响。

3 种降雨强度下顺坡垄作相对稳定阶段的径流强度明显大于无垄作坡面。当降雨强度为 50 mm/ h 时,顺坡垄作和无垄作坡面径流过程稳定阶段的径流强度分别为 38.5,16.5 mm/h,前者较后者增加了 135.8%;当降雨强度为 75 mm/h 时,顺坡垄作和无垄作坡面达到稳定的径流强度分别为 58.8,25.6 mm/h,前者是后者的 2.3 倍;当降雨强度为 100 mm/h 时,顺坡垄作稳定阶段的径流强度(86.3 mm/h)是无垄作坡面径流强度(40.5 mm/h)的 2.1 倍。

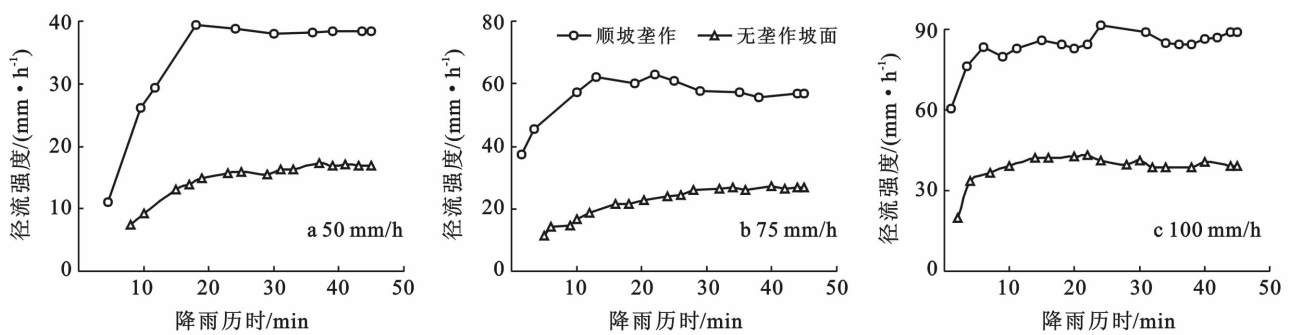


图 1　顺坡垄作和无垄作坡面地表径流强度随降雨历时的变化过程

分析 2 种耕作处理下径流强度增加率随雨强的变化,发现在无垄作坡面处理下,坡面径流强度增加率随雨强的增加呈增加趋势;即当降雨强度从 50 mm/h增加到 75 mm/h 时,坡面径流强度增加了

68.2%，当降雨强度从 75 mm/h 增加到 100 mm/h 时，坡面径流强度增加了 84.6%。而对于顺坡垄作处理，坡面径流强度增加率随降雨强的增加呈减少趋势；即当降雨强度从 50 mm/h 增加到 75 mm/h 时，坡面径流强度增加了 81.9%，当降雨强度从 75 mm/h 增加到 100 mm/h 时，坡面径流强度增加了51.2%。这说明，在较小雨强时，顺坡耕作对坡面径流汇集过程的影响更加明显。

2.2.2 顺坡垄作和无垄作坡面下侵蚀率动态变化过程 无垄作坡面的侵蚀率随降雨历时的变化过程表现为先增大后减小再逐渐趋于稳定的趋势(图 2)。当降雨强度为 50 mm/h 时，无垄作坡面侵蚀率最大值出现在降雨历时 10 min，其值为 0.5 kg/(m^2 · h)；此后坡面侵蚀率逐渐减小，直至到达稳定阶段，此时坡面侵蚀率为 0.3 kg/(m^2 · h)。对于 75 mm/h 降雨强度，无垄作坡面侵蚀率最大值发生在降雨历时 9 min，其值为1.2 kg/(m^2 · h)；此后坡面侵蚀率呈缓慢的下降趋势，直到稳定阶段，此时坡面侵蚀率为 0.5 kg/(m^2 · h)。与降雨强度为 50 mm/h 相比，75mm/h 降雨强度下无垄作坡面侵蚀率最大值增加了 1.4 倍，稳定阶段坡面侵蚀率增加了 66.4%。当降雨强度为 100 mm/h 时，无垄作坡面侵蚀率最大值发生在降雨历时 7 min，其值时为 2.8 kg/(m^2 · h)，而稳定阶段的侵蚀率为 1.6 kg/(m^2 · h)。与降雨强度为 75 mm/h 相比，100 mm/h 雨强下无垄作坡面侵蚀率最大值增加 1.4 倍，稳定阶段坡面侵蚀率增加了2.5倍。

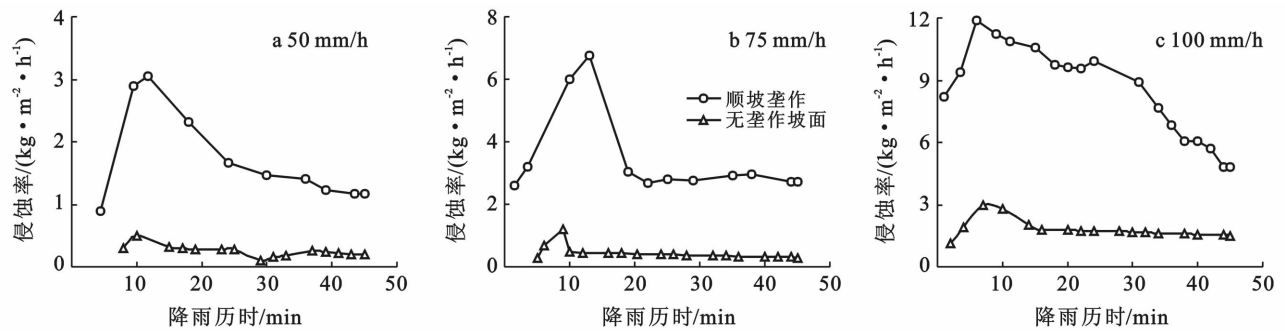


图 2 顺坡垄作坡面和无垄作坡面侵蚀率随降雨历时的变化

不同降雨强度下，顺坡垄作坡面侵蚀率均大于无垄作坡面。当降雨强度为 50 mm/h 时，顺坡垄作坡面侵蚀率变化过程与无垄作坡面的变化过程一致，其侵蚀率在降雨历时 12 min 时达到最大，其值为 3.1 kg/(m^2 · h)，较无垄作坡面增加了 5.1 倍，然后逐渐下降并在 35 min 后趋于稳定，此时坡面侵蚀率为 1.5 kg/(m^2 · h)，较无垄作坡面增加了 4.5 倍。当降雨强度为 75 mm/h 时，顺坡垄作坡面侵蚀率在 13 min达到最大，其值为 6.8 kg/(m^2 · h)，此后坡面侵蚀率缓慢下降，在 22 min 时趋于稳定，此时坡面侵蚀率为 2.8 kg/(m^2 · h)。与无垄作坡面相比，顺坡垄作坡面侵蚀率最大值较无垄作坡面增加了5.5倍，稳定阶段坡面侵蚀率较无垄作坡面增加了 5.2 倍。对于 100 mm/h 降雨强度，顺坡垄作侵蚀率最大值发生在降雨历时 7 min，其值为 11.9 kg/(m^2 · h)，较无垄作坡面增加了 3.2 倍，此后坡面侵蚀率呈缓慢的下降趋势，侵蚀率由最大值减小到降雨结束时的 4.8 kg/(m^2 · h)，其值也较无垄作坡面增加了 2.0 倍。

2.2.3 顺坡垄作和无垄作坡面径流含沙量动态变化过程 无垄作坡面的径流含沙量随降雨历时的变化过程呈先增大后减小再趋于稳定的趋势(图 3)。当降雨强度为 50 mm/h 时，无垄作坡面径流含沙量最大值发生在降雨历时 10 min，其值为 54.2 g/L，此后坡面径流含沙量呈缓慢下降趋势，直到稳定阶段，此时坡面径流含沙量为 15.1 g/L，当降雨强度增加到 75 mm/h 时，无垄作坡面径流含沙量最大值出现在降雨历时 9 min，其值为 80.3 g/L，此后坡面径流含沙量逐渐较小，直至到达稳定阶段，此时坡面径流含沙量为 16.1 g/L。与降雨强度为 50 mm/h 相比，75 mm/h雨强下无垄作坡面径流含沙量最大值增加 48.0%，稳定阶段坡面侵蚀率增加了 6.9%。对于 100 mm/h 降雨强度，无垄作坡面径流含沙量最大值发生在降雨历时 10 min，其值为 81.7 g/L，此后坡面径流含沙量逐渐减小，直到稳定阶段，其值为 39.0 g/L，与降雨强度为 75 mm/h 相比，100 mm/h 雨强下无垄作坡面径流含沙量最大值增加 1.8%，稳定阶段坡面径流含沙量增加了 1.4 倍。

不同降雨强度下，顺坡垄作坡面径流含沙量均大于无垄作坡面。降雨强度为 50 mm/h 时，顺坡垄作径流含沙量在降雨历时 10 min 时达到最大，其值为 110.3 g/L，较无垄作坡面增加了 1.03 倍，然后其逐

渐下降,在 30 min 后趋于稳定,此时坡面径流含沙量为 33.6 g/L,较无垄作坡面增加了 1.2 倍。对于 75 mm/h降雨强度,顺坡垄作径流含沙量最大值发生在降雨历时 13 min,其值为 109.0 g/L,此后坡面径流含沙量呈缓慢下降趋势,直到稳定阶段,此时坡面径流含沙量为 48.0 g/L。与无垄作坡面相比,顺坡垄作坡面径流含沙量最大值较无垄作坡面增加了 35.8%,稳定阶段坡面径流含沙量较无垄作坡面增加了 2.0 倍。当降雨强度为 100 mm/h 时,顺坡垄作径流含沙量最大值发生在降雨历时 6 min,其值为 142.9 g/L,较无垄作坡面增加了 74.9%,此后坡面径流含沙量呈缓慢的下降趋势,径流含沙量由最大值减小到降雨结束的 54.0 g/L,其值也较无垄作坡面增加了 38.7%。

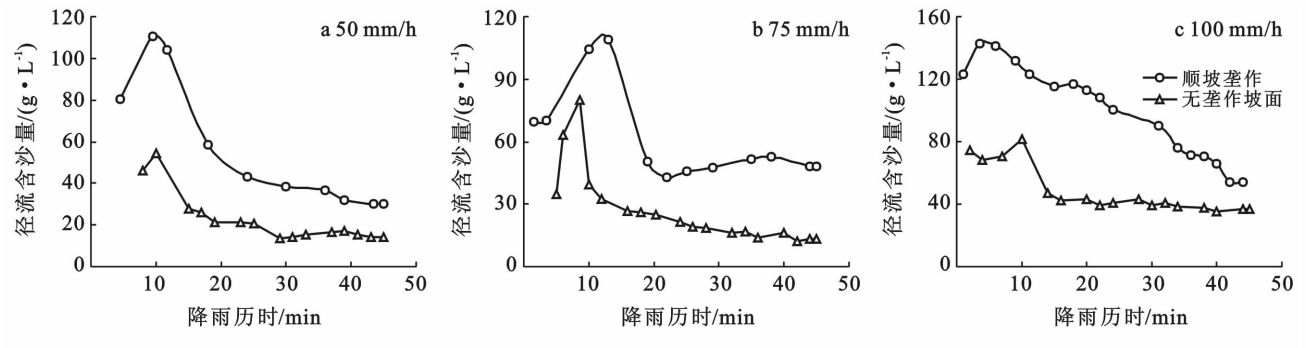


图 3　顺坡垄作坡面和无垄作坡面下径流含沙量随降雨历时的变化

2.3　顺坡垄作影响坡面侵蚀的原因分析

顺坡垄作处理增加黑土坡面土壤侵蚀的主要原因是:①顺坡垄沟的汇流作用增大了坡面水流流速;②由于顺坡垄中径流侵蚀能力的增大,坡面侵蚀方式由片蚀为主转变为细沟侵蚀为主。

3 种降雨强度下,顺坡垄作坡面流速较无垄作坡面增加了 1.0～2.3 倍,径流剪切力增加了 0.7～1.2 倍(表 2)。由于坡面水流挟沙能力与水流流速的立方成正比[16],因此,坡面水流流速的增加使得坡面径流剪切力增大,水流功率变大,可以携带更多的泥沙,最终使坡面侵蚀率增加[17-19]。

表 2 还表明,无垄作坡面水流流速随降雨强度的增加而增大。与降雨强度为 50 mm/h 相比,75,100 mm/h 降雨强度下的无垄作坡面水流流速分别增加 48.1%和 85.5%。而对于顺坡垄作处理,坡面水流流速随降雨强度增加较小。

表 2　不同降雨强度下顺坡垄作坡面和无垄作坡面径流及侵蚀特征

降雨强度/(mm·h⁻¹)	耕作方式	平均流速/(cm·s⁻¹)	平均径流剪切力/Pa	垄沟汇流流量/(L·min⁻¹)	占降雨量的比例/%	细沟侵蚀量/kg	占总侵蚀量的比例/%
50	无垄作坡面	5.5	35.8				
	顺坡垄作	18.1	77.4	3.3	77.0	4.2	65.6
75	无垄作坡面	8.1	42.3				
	顺坡垄作	19.4	84.1	5.1	78.4	8.5	62.0
100	无垄作坡面	9.9	56.1				
	顺坡垄作	20.1	96.5	7.5	86.3	19.2	55.3

顺坡垄作处理下坡面侵蚀方式由片蚀为主转变为以细沟侵蚀为主。顺垄地形的作用使得径流汇集,垄沟汇流流量可达到降雨总量的 77.0%以上(表 2),径流的汇集冲刷使顺坡垄沟内形成了明显的细沟下切沟头,且随降雨历时的持续,沟头溯源侵蚀使垄沟内断续细沟形成连续细沟(图 4),且垄沟内集中股流也加剧了细沟沟壁坍塌,从而加剧了坡面侵蚀,细沟侵蚀量占总侵蚀量的 55.3%～65.6%。而对于无垄作处理,坡面侵蚀主要以鳞片状片蚀为主(图 4)。



图 4　顺垄垄沟内的细沟侵蚀和无垄作坡面的片蚀对比

3 结 论

(1) 顺坡垄作和无垄作坡面的径流总量和侵蚀总量均随降雨强度的增加而增大,且顺坡垄作的径流总量和侵蚀总量较无垄作坡面增加了 1.2～1.7 和 1.3～2.1 倍。

(2) 不同降雨强度下,顺坡垄作和无垄作坡面的径流强度均随降雨强度的增加而增大,且顺坡垄作的径流强度明显大于无垄作坡面,前者径流过程稳定阶段的径流强度是后者的 2.1～2.4 倍。无垄作坡面侵蚀率和径流含沙量变化过程则均呈先增大后下降再逐渐趋于稳定的趋势;当降雨强度为 50,75 mm/h 时,顺坡垄作与无垄作坡面的侵蚀率和径流含沙量变化过程相一致,其稳定阶段坡面侵蚀率和径流含沙量分别为无垄作坡面的 4.5～5.2 和 1.2～2.0 倍;当降雨强度为 100 mm/h 时,顺坡垄作的侵蚀率和径流含沙量的变化过程呈先增大后逐渐减小的趋势,其侵蚀率和径流含沙量的最小值也较无垄作坡面分别增加了 2.0 倍和 38.7%。

(3) 顺坡垄沟地形使径流汇集,汇流流量占降雨量的 77.0%以上;垄沟的集中汇流作用使顺坡垄作坡面的径流流速较无垄作坡面增加了 1.0～2.3 倍,径流剪切力增加了 0.7～1.2 倍,使得顺坡垄作坡面的侵蚀方式由以片蚀为主转变为以细沟侵蚀为主,其中细沟侵蚀量占顺坡垄作坡面总侵蚀量的 55.3%～65.6%,从而加剧了顺坡垄作坡面的土壤侵蚀。

[参 考 文 献]

[1] 王鸿斌,赵兰波,王杰,等.松辽平原玉米连作黑土不同耕作制度下土壤侵蚀特征研究[J].水土保持学报,2005,19(2):26-28.

[2] 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,2008,5(36):93-94.

[3] 蔡强国,马紹嘉,吴淑安,等.横厢耕作措施对红壤坡耕地水土保持影响的试验研究[J].水土保持通报,1994,14(1):49-55.

[4] 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.

[5] 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):48-50.

[6] 王勇强,王玉宽,傅斌,等.不同耕作方式对紫色土侵蚀的影响[J].水土保持研究,2007,14(3):333-335.

[7] 辛艳,王瑄,邱野,等.坡耕地不同耕作模式下土壤养分流失特征研究[J].沈阳农业大学学报,2012,43(3):346-350.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 王玉玺,解运杰,王萍.东北黑土区水土流失成因分析[J].水土保持科技情报,2002(3):27-29.

[11] 周佩华,张学栋,唐克丽.黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟试验大厅降雨装置[J].水土保持通报,2000,20(4):27-30.

[12] 高峰,詹敏,战辉.黑土区农地侵蚀性降雨标准研究[J].中国水土保持,1989(11):21-23.

[13] 陈雪,蔡强国,王学强.典型黑土区坡耕地水土保持措施适宜性分析[J].中国水土保持科学,2008,6(5):44-49.

[14] 水利部,中国科学院,中国工程院.中国水土流失防治与生态安全:东北黑土区卷[M].北京:科学出版社,2010:64-66.

[15] 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.

[16] 肖培青,姚文艺,申震洲,等.草被覆盖下坡面径流入渗过程及水力学参数特征试验研究[J].水土保持学报,2009,23(4):50-53.

[17] Giménez R, Govers G. Interaction between bed roughness and flow hydraulics in eroding rills[J]. Water Resources Research,2001,37(3):791-799.

[18] Guo Tailong, Wang Quanjun, Li Dingqiang, et al. Flow hydraulic characteristic effect on sediment and solute transport on slope erosion[J]. Catena, 2013(107):145-153.

[19] 李君兰,蔡强国,孙莉英.坡面水流速度与坡面含沙量的关系[J].农业工程学报,2011,27(3):73-78.