

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

桑琦明¹, 王磊¹, 郑粉莉^{1,2}, 覃超^{1,3}, 张勋昌⁴, 左小锋¹, 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;

3.清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,北京 100084;4.美国农业部农业研究局牧草地实验室,厄尔雷诺 73036)

摘要:斜坡垄作是东北黑土区最普遍的垄作方式之一,但当前关于斜坡垄作对坡耕地土壤侵蚀的影响鲜见报道。为此,基于室内模拟试验,设计2个降雨强度(50,100 mm/h)和2种垄作方式(斜坡垄作和顺坡垄作),分析东北黑土区坡耕地斜坡垄作与顺坡垄作坡面土壤侵蚀的差异。结果表明:(1)在50,100 mm/h降雨强度下,斜坡垄作断垄前坡面侵蚀速率分别是顺坡垄作的0.46%和0.35%;但在45 min的降雨过程中,由于斜坡垄作发生断垄现象,造成50,100 mm/h降雨强度下斜坡垄作坡面侵蚀速率分别是顺坡垄作的1.24,1.03倍。(2)斜坡垄作径流强度和侵蚀速率随降雨历时的变化均从断垄开始发生突变。在50,100 mm/h降雨强度下,随着降雨历时的变化,斜坡垄作断垄前的径流强度和侵蚀速率值均低于顺坡垄作,其平均径流强度分别为顺坡垄作的8.42%和3.75%;平均侵蚀速率分别为顺坡垄作的0.46%和0.35%;但斜坡垄作断垄后坡面径流和侵蚀速率明显增大,其平均径流强度分别为顺坡垄作的1.33,1.47倍,平均侵蚀速率分别是顺坡垄作的2.03,1.62倍。(3)在50,100 mm/h降雨强度下,斜坡垄作断垄前坡面径流量和侵蚀量存在极显著的线性关系($P<0.01$),而断垄后两者的相关关系则不显著($P>0.05$);而顺坡垄作在2种降雨强度下坡面径流量和侵蚀量存在极显著的线性关系。(4)在2种降雨强度下斜坡垄作坡面90%以上的径流泥沙均来自断垄后。因此,提高垄丘稳定性和防止断垄现象发生,是减少斜坡垄作坡面土壤侵蚀的关键所在。

关键词:土壤侵蚀;断垄;斜坡垄作;顺坡垄作;东北黑土区

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)03-0073-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2020.03.012

Comparative Study on Hillslope Soil Erosion Between Sloping Ridge-tillage and Longitudinal Ridge-tillage in Chinese Mollisol Region

SANG Qiming¹, WANG Lei¹, ZHENG Fenli^{1,2}, QIN Chao^{1,3},

ZHANG Xunchang⁴, ZUO Xiaofeng¹, WANG Yifei¹

(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; 3.State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084; 4.Grazinglands Research Laboratory, USDA-Agricultural Research Service, El Reno 73036)

Abstract: Sloping ridge-tillage is one of the most common ridge-tillage methods in Chinese Mollisol region. However, there are few studies related to the effects of sloping ridge-tillage on hillslope soil erosion. Thus, the indoor simulated rainfall experiments were conducted under 50 and 100 mm/h rainfall intensities with a typical slope of 5 degree (transforming from longitudinal ridge-tillage to contourridge-tillage) to analyze the differences in hillslope soil erosion between sloping ridge-tillage and longitudinal ridge-tillage system in Chinese Mollisol region. The results showed that: (1) Under 50 and 100 mm/h rainfall intensities, the erosion rates in sloping ridge-tillage before ridge failure were only 0.46% and 0.35% of the longitudinal ridge-tillage, respectively. However, during the 45-minute rainfall, once the ridge was failed, the erosion rates in sloping ridge-tillage were 1.24 and 1.03 times higher than that in longitudinal ridge-tillage under 50 and 100 mm/h rainfall intensities, respectively. (2) Both runoff and erosion rates suddenly changed with the rainfall time after ridge failure in sloping ridge-tillage system. Before ridge failure in sloping ridge-tillage system, both runoff and

收稿日期:2019-09-22

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFE0202900);美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23060502);国家自然科学基金项目(41571263)

第一作者:桑琦明(1995—),男,甘肃陇南人,在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail:18392437348@139.com

通信作者:郑粉莉(1960—),女,陕西蓝田人,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

erosion rates were lower than those in longitudinal ridge-tillage under 50 and 100 mm/h rainfall intensities. The average runoff rate in sloping ridge-tillage were only 8.42% and 3.75% of that in longitudinal ridge-tillage under the two rainfall intensities, respectively; and the average erosion rates in the former were 0.46% and 0.35% of those in the latter, respectively. After ridge failure in sloping ridge-tillage system, the average runoff rate were 1.33 and 1.47 times higher than those in longitudinal ridge system, the average erosion rates in the former were 2.03 and 1.62 times higher than those in the later under 50 and 100 mm/h rainfall intensities, respectively. (3) Under the two rainfall intensities, there was a extremely significant linear relationship between runoff and erosion amount in sloping ridge-tillage ($P < 0.01$), while the correlation was not significant after ridge failure ($P > 0.05$). There was a extremely significant linear relationship between runoff and erosion amount in longitudinal ridge-tillage. (4) Under the two rainfall intensities, more than 90% of runoff and sediment generated after ridge failure in sloping ridge-tillage system. Therefore, the key approach for controlling soil erosion in sloping gridge-tillage is to improve the ridge stability and to prevent the ridge failure.

Keywords: soil erosion; ridge failure; sloping ridge-tillage; longitudinal ridge-tillage; Chinese Mollisol region

东北黑土区是我国主要的粮食生产基地之一,其粮食年产量占我国粮食总产量的 20%,商品率高达 70%以上,商品粮调出率占全国的 1/3 以上^[1-3]。但近年来黑土侵蚀退化严重,有机质明显下降,严重威胁我国粮食安全^[4]。因此,保护黑土资源永续利用对保障国家粮食安全至关重要。要保护黑土地,首先要以农业耕作方式为抓手,使“管、调、节、蓄、保”等得到落实,在加大土地管理力度和改善农业耕作技术的同时完善工程措施,确保黑土地不退化。然而,东北黑土区坡耕地耕作方式大多以顺坡垄作为主,由于顺坡垄作的汇流作用,坡面土壤侵蚀强烈^[5-6]。

正因如此,近年来横坡垄作已被推广使用,横坡垄作有效防治了坡耕地土壤侵蚀^[7-9],但横坡垄作并不能从根本上控制水土流失^[10],一旦发生断垄现象,反而加剧了坡耕地土壤侵蚀。相对于横垄耕种,斜坡垄作则更为普遍^[11],宁静等^[12]研究表明,坡度与坡长交互下“大坡度+小坡长”或“大坡度+大坡长”条件下斜坡耕作为最优的选择,而斜坡垄作是顺坡垄作和横坡垄作在不规则地形上的特殊表现,当坡面走向与等高线呈一定夹角时,顺坡垄作和横坡垄作便表现为斜坡垄作。相较于顺坡垄作,斜坡垄作在一定程度上能增加坡面降雨入渗和拦蓄地面径流,从而达到防治土壤侵蚀的目的。然而,目前关于斜坡垄作坡面土壤侵蚀的相关研究鲜有报道,因此急需开展斜坡垄作坡面土壤侵蚀研究。为此,本文基于室内模拟降雨试验,对比分析斜坡垄作与顺坡垄作坡面土壤侵蚀的差异,以为东北黑土区的农业生产以及黑土地保护提供重要理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

供试土壤于 2017 年 6 月取自东北地区吉林省榆树市刘家镇合心村南城子屯(44°43′17″N, 126°11′13″E)

坡耕地表层 0—20 cm 的土层,其土壤有机质含量为 24.18 g/kg,土壤颗粒组成为黏粒($< 2 \mu\text{m}$)占 20.3%、粉粒(2~50 μm)占 76.4%和砂粒(50~2 000 μm)占 3.3%,土壤 pH 为 6.39,土壤密度在犁底层和耕层分别为 1.32~1.40, 1.15~1.25 g/cm³。室内模拟试验于 2017 年 8—11 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进行,降雨设备的雨滴降落高度达 16 m,基本保证了绝大部分雨滴速度达到终点速度,降雨均匀度 $> 80\%$,雨滴粒径及其分布与天然降雨相似。试验土槽为 8 m(长)×3 m(宽)×0.6 m(深)的固定式液压可升降钢槽,其可调节坡度范围为 0~30°,并在底部均匀分布有 2 mm 直径的透水孔,以保证降雨过程试验土槽渗透状况良好。

1.2 试验设计

根据东北黑土区侵蚀性降雨标准中 5 min 瞬时雨率 $I_5 = 80.4 \text{ mm/h}$ ^[13]的实际情况,本试验设计 50, 100 mm/h(即 0.83, 1.67 mm/min)2 个降雨强度。东北黑土区的漫川漫岗地形多为长缓坡,坡耕地的坡度大多为 2°~8°^[14-16],且顺坡垄改为横坡垄的典型坡度为 5°,因此设计的试验坡度为 5°。此外,根据野外调查结果,东北黑土区斜坡垄垄向多为 32°~55°,而以 40°~50°居多。宁静等^[12]研究调查结果也表明,斜坡垄在东北黑土区非常普遍,且其垄向大多为 30°~60°。基于此,设计斜坡垄垄向坡度为 45°。所以试验设计的斜坡垄垄高、垄间距以及垄向与坡面等高线夹角皆与田间斜坡垄的几何参数相同(图 1)。试验过程中,每个试验处理设 2 个重复,每场降雨试验历时 45 min。

1.3 试验步骤

(1)将采集土样中的石块、根系残落物、秸秆等挑出,然后按照土样的自然节理将其掰成较小的土块以备试验,整个过程中对土样不研磨、不过筛,以保持原有结构。

(2)装填土槽前先在土槽底部铺 1 层纱布,在土槽底部填入 5 cm 厚的细沙确保试验土槽透水性良好。试验土槽填土前,根据所测定的土壤质量含水率和土壤密度分别计算犁底层和耕层所需的填土重量,试验土壤质量含水量为 7%~9%,其目的是尽量减少试验土槽填土时对土壤结构的破坏。试验土槽填土时,基于野外测定的农地耕层和犁底层土壤密度分别填土。具体为在细沙层之上按 1.35 g/cm³ 土壤密度对试验土槽进行填土模拟犁底层,在犁底层之上按 1.20 g/cm³ 土壤密度对试验土槽进行填土模拟耕层^[17-18]。试验土槽填土时采用分层填土,每层深度为 5 cm。试验土槽填土深度为 35 cm,其中犁底层和耕层深度分别为 15,20 cm。在试验土槽填入上层土之前,用 2 cm 深自制的耙子对下层土壤表面进行扰动,增加土壤表面的糙率和避免由于分层装土造成土壤分层的现象。

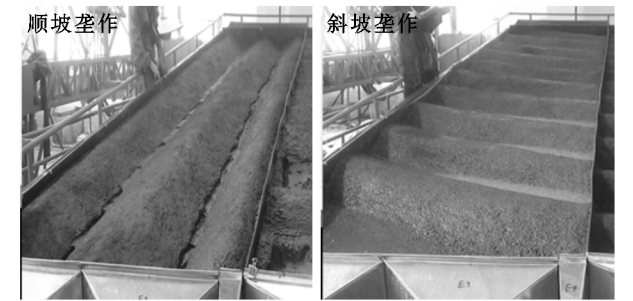


图 1 顺坡垄作和斜坡垄作坡面室内模拟试验装置

(3)试验土槽填土结束后,按照研究区当地垄作方式以及设计垄丘参数制做斜坡垄和顺坡垄。

(4)为保证试验土槽土壤前期条件一致,试验开始的前 1 天在土槽表面覆盖纱网,其目的是消除雨滴打击对试验土槽土壤表面的影响,然后在 30 mm/h 的降雨强度下进行预降雨直到坡面产流^[5],并将试验土槽静置 12 h,使试验土槽的土壤水分达到新的动态平衡后,开始正式降雨试验。

(5)开始正式降雨后,仔细观察坡面产流状况,从初始产流开始接取坡面径流泥沙样,待产流稳定后每

隔 2~3 min 用径流桶接取 1 个径流泥沙样。尤其在垄沟出现溢流后及断垄过程中连续接取径流泥沙样,以充分获取断垄前后的坡面径流泥沙信息。

(6)降雨结束后用精度为 0.01 g 的秤称量径流桶的质量以得到浑水径流的质量,然后将其静置 12 h 并去除上层清液,最后将样品放入 105 ℃ 的烘箱进行烘干以计算泥沙量。

2 结果与分析

2.1 斜坡垄作与顺坡垄作坡面总径流量和总侵蚀量的对比

在 50,100 mm/h 降雨强度下,斜坡垄作断垄前,其坡面径流量和侵蚀量皆明显小于顺坡垄作试验处理;但在 45 min 的降雨过程中,由于斜坡垄作发生断垄现象,使斜坡垄作坡面的总侵蚀量大于顺坡垄作,但坡面总径流量仍小于顺坡垄作。具体为在 45 min 的降雨试验中,50,100 mm/h 降雨强度下的斜坡垄作坡面的径流速率分别是顺坡垄作的 0.85,0.95 倍,但侵蚀速率前者分别是后者的 1.24,1.03 倍(表 1)。由表 1 可知,在 2 个降雨强度下,斜坡垄作坡面径流量和泥沙量存在以断垄时间为界的突变现象,且斜坡垄作断垄后坡面平均径流速率和平均侵蚀速率明显增加,因而造成在 45 min 降雨过程中,斜坡垄作和顺坡垄作的坡面总侵蚀量明显增加。具体为在 50,100 mm/h 降雨强度下,斜坡垄作断垄前坡面的平均径流速率分别是顺坡垄作的 8.42%和 3.75%,平均侵蚀速率分别是顺坡垄作的 0.46%和 0.35%;而斜坡垄作断垄后,在 2 种降雨强度下,45 min 降雨过程中坡面平均径流速率分别是顺坡垄作的 1.33,1.47 倍,平均侵蚀速率前者分别是后者的 2.03,1.62 倍。这是由于斜坡垄作在断垄前能很好地拦蓄径流泥沙,断垄后侵蚀方式以细沟侵蚀为主,相应的汇流作用增强,侵蚀强度也随之增大。

表 1 不同降雨强度下斜坡垄作和顺坡垄作坡面的总径流量和总侵蚀量

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	垄作 方式	总径 流量/mm	平均径流速率/ (mm·h ⁻¹)	总侵蚀量/kg	平均侵蚀速率/ (kg·m ⁻² ·h ⁻¹)
50	顺坡垄作	21.4	28.5	19.49	2.17
	斜坡垄作	18.1	24.1	24.23	2.69
	斜坡垄作断垄前	0.7	2.4	0.04	0.01
	斜坡垄作断垄后	17.4	38.0	24.19	4.40
100	顺坡垄作	52.1	69.4	50.96	5.66
	斜坡垄作	49.6	66.1	52.64	5.85
	斜坡垄作断垄前	0.7	2.6	0.05	0.02
	斜坡垄作断垄后	48.9	102.2	52.59	9.16

2 种垄作方式下坡面的总径流量和总侵蚀量均随降雨强度的增加而增大。与 50 mm/h 降雨强度相比,100 mm/h 降雨强度下斜坡垄作坡面总径流量和总侵蚀量分别增加 1.74,1.17 倍,顺坡垄作坡面

总径流量和总侵蚀量分别增加 1.43, 1.61 倍。当降雨强度为 50 mm/h 时, 斜坡垄作断垄前坡面总径流量和总侵蚀量分别较顺坡垄作减少 86.6%, 99.5%; 而斜坡垄作断垄后坡面总径流量较顺坡垄作增加 7.9%, 尤其是坡面总侵蚀量前者较后者增加 1.2 倍。当降雨强度为 100 mm/h 时, 斜坡垄作断垄前坡面总径流量和总侵蚀量分别较顺坡垄作减少 94.9%, 99.7%; 但其断垄后坡面总径流量较顺坡垄作增加 27.3%, 尤其是坡面总侵蚀量前者较后者增加 60.1%。

横坡垄作能有效减少土壤侵蚀和地表径流的发生^[19-20], 但一旦横坡垄作发生断垄, 坡面土壤侵蚀方式由片蚀向细沟侵蚀演变, 这时垄丘土体就成为坡面侵蚀泥沙的主要来源^[21-22]。王磊等^[8]研究结果表明, 对于 50 mm/h 降雨强度, 斜坡垄作较横坡垄作坡面总径流量和总侵蚀量分别增加 44, 2 422 倍(此时横坡垄作坡面总径流量和总侵蚀量分别为 0.40 mm 和 0.01 kg), 其原因是该降雨强度下横坡垄作不发生断垄。而对于 100 mm/h 降雨强度, 横坡垄作和斜坡垄作均发生断垄现象, 斜坡垄作较横坡垄作的坡面总径流量增加 0.27 倍, 但总侵蚀量减小 0.04 倍; 而两者在断垄前坡面总径流量和侵蚀总量差异较小, 且坡面 90% 以上的径流泥沙均来自断垄后。由于斜坡垄作较横坡垄作更容易发生断垄, 因此, 建议在东北黑土应尽可能布设横坡垄作。

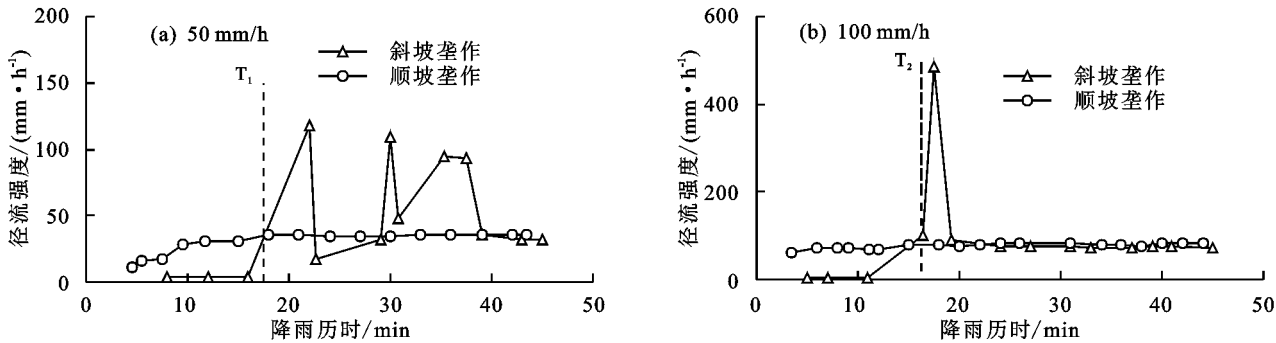
2.2 斜坡垄作和顺坡垄作坡面土壤侵蚀过程比较

2.2.1 斜坡垄作和顺坡垄作坡面径流强度动态变化比较 在 50 mm/h 降雨强度下, 斜坡垄作径流强度随降雨历时变化从断垄开始发生突变(图 2)。斜坡

垄作坡面在降雨历时为 17.5 min 发生断垄, 断垄前坡面径流强度很小, 而断垄后坡面径流强度从 17.5~22 min 期间内逐渐增加, 直至出现第 1 个峰值, 其值为 117.3 mm/h。其原因是发生断垄后垄沟内所蓄积水沿断垄路径迅速下泄, 造成单位时间内径流量急剧增加。22 min 降雨历时后, 坡面径流强度逐渐减小, 坡面径流强度变化为 16~50 mm/h。随后, 随着垄沟溢流和断垄的继续进行, 坡面径流强度在 30 min 出现了第 2 峰值, 其值为 109.5 mm/h。此后坡面径流强度又开始下降, 但维持在较高水平, 其值变化为 50~90 mm/h, 然后在 35.4 min 出现第 3 个峰值, 此后径流强度稳定在 32.5 mm/h。对于顺坡垄作试验处理, 坡面径流强度随降雨历时变化幅度较小, 其呈现先增加后趋于稳定的变化趋势, 坡面径流强度变化范围为 11.0~36.0 mm/h。

当降雨强度为 100 mm/h 时, 斜坡垄作坡面在降雨历时为 16.3 min 时发生断垄, 断垄前坡面径流量接近 0, 而断垄后在降雨历时为 17.4 min 时出现坡面径流强度为 486.1 mm/h 的最大峰值, 此后坡面径流强度稳定在 70.1~88.6 mm/h。其原因是斜坡垄作在降雨历时为 18 min 时所有坡面基本全部断垄, 从断垄出现到所有断垄形成仅发生在 2.5 min 之内; 之后径流强度随降雨历时变化特点与顺坡垄作类似。对于顺坡垄作试验处理, 坡面径流强度随降雨历时变化幅度较小, 其值变化为 61.1~83.3 mm/h。

总体而言, 当降雨强度从 50 mm/h 增加到 100 mm/h 时, 2 种垄作方式坡面径流强度整体均大幅增大, 斜坡垄作断垄前的径流强度变化值明显低于顺坡垄作。



注: T₁表示 50 mm/h 雨强下斜坡垄作发生断垄的时间, T₂表示 100 mm/h 雨强下斜坡垄作发生断垄的时间; 虚线左侧表示断垄前, 虚线右侧表示断垄后。

图 2 不同降雨强度下斜坡垄作和顺坡垄作坡面径流强度的变化

2.2.2 斜坡垄作和顺坡垄作坡面侵蚀速率动态变化比较 斜坡垄作坡面侵蚀速率随降雨历时变化与径流强度随降雨历时变化具有较好的一致性(图 3), 降雨过程中坡面侵蚀速率的变化由于断垄的发生出现峰值。50 mm/h 降雨强度下, 斜坡垄作坡面侵蚀速率在降雨历时为 30 min 时达到最大, 其值为 21.3

kg/(m²·h), 此后坡面侵蚀速率由于后续断垄的出现以及所有断垄基本形成, 出现 2 个峰值, 其分别是降雨历时为 30.7 min 时的 5.2 kg/(m²·h) 和对应降雨历时为 37.5 min 时的 16.3 kg/(m²·h)。此后坡面侵蚀速率在降雨历时 45 min 时稳定在 1.6 kg/(m²·h)。对于顺坡垄作试验处理, 坡面侵蚀速率随降雨历时先

逐渐增加后又趋于减小;在降雨历时为 39 min 时,其坡面侵蚀速率稳定在 $1.47 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

当降雨强度为 $100 \text{ mm}/\text{h}$ 时,斜坡垄作坡面侵蚀速率变化与坡面径流强度随降雨历时变化类似,其坡面侵蚀速率在降雨历时为 17.4 min 时达到最大,其值为 $83.5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

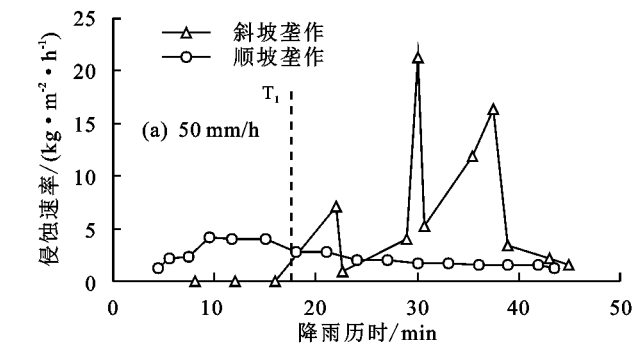


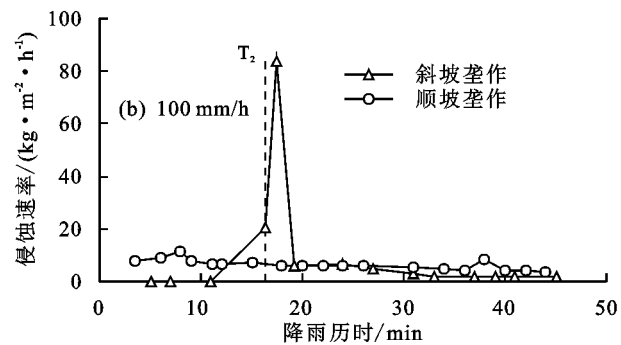
图 3 不同降雨强度下斜坡垄作和顺坡垄作坡面侵蚀速率的变化

斜坡垄作发生断垄后坡面侵蚀方式由片蚀演变为细沟侵蚀,且随着坡面上下断垄的联通,坡面径流汇流量急剧增大,使坡面径流侵蚀能力也急剧增大,从而导致坡面侵蚀速率很好地响应断垄,坡面侵蚀速率出现 1 个或多个峰值。峰值出现的多少受断垄过程以及坡面所有断垄部位连通性的影响。如在 $50 \text{ mm}/\text{h}$ 降雨强度下,斜坡垄作在降雨历时为 17.5 min 开始发生断垄,之后土槽下部逐渐发生断垄并经历 8 min 后试验土槽中部的断垄部位与下部断垄部位连通;在降雨历时为 28 min 时试验土槽上部开始断垄并与试验土槽下部断垄部位连通,从而坡面侵蚀速率出现了 3 个峰值。在 $100 \text{ mm}/\text{h}$ 降雨强度下,斜坡垄作坡面在降雨历时为 14.5 min 时试验土槽自下而上的断垄部位全部连通,故而坡面侵蚀速率仅出现 1 个侵蚀速率为 $83.5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的峰值。

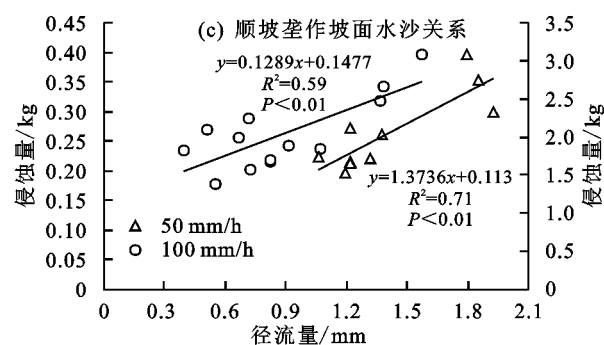
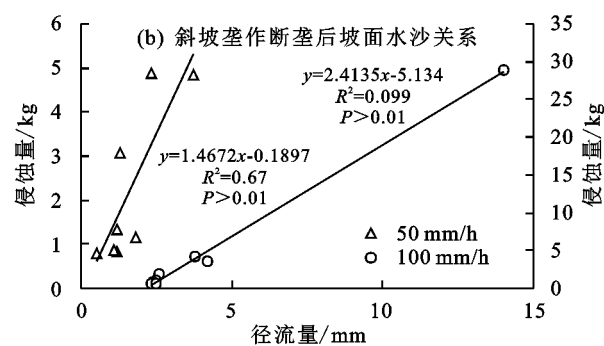
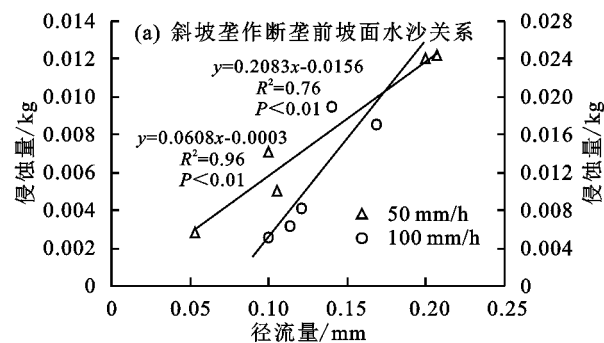
2.3 斜坡垄作和顺坡垄作坡面水沙关系分析

由图 4 可知, $50, 100 \text{ mm}/\text{h}$ 降雨强度下斜坡垄作断垄前坡面的径流量和侵蚀量存在极显著的线性关系 ($P < 0.01$), 而断垄后两者的相关关系不显著 ($P > 0.05$)。顺坡垄作在 2 种降雨强度下坡面的径流量和侵蚀量存在极显著的线性关系。由于斜坡垄作增加了地表糙率和径流拦蓄能力, 故其在断垄前坡面径流量和侵蚀量很小(图 4a), 坡面平均侵蚀速率仅为 $0.01 \sim 0.02 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; 而当发生断垄时, 斜坡垄作坡面径流的含沙量迅速增大, 表现为 2 种降雨强度下水沙关系方程的斜率也明显增大, 说明此时斜坡垄作坡面侵蚀量随径流量的增加呈大幅度增加(图 4b), 坡面平均侵蚀速率达到 $4.40 \sim 9.16 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。对于顺坡垄作, 随着降雨强度的增大, 坡面侵蚀量随径流量的增幅也随之增大, 坡面平均侵蚀速率为 $2.17 \sim 5.66 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。总体而言, 2 种降雨强度下斜坡垄作

$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 且在断垄 2.5 min 内坡面断垄全部形成。此后, 坡面侵蚀速率逐渐减小, 在降雨历时为 37 min 后其值稳定在 $1.7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。对于顺坡垄作试验处理, 坡面侵蚀速率随降雨历时变化幅度较小, 在降雨历时为 40 min 时, 其值稳定在 $4.1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。



断垄后坡面的侵蚀量随径流量的增加增幅最大, 顺坡垄作次之, 而斜坡垄作断垄前的增幅最小。



注:图中左侧纵坐标代表 $50 \text{ mm}/\text{h}$ 雨强对应的侵蚀量;右侧纵坐标代表 $100 \text{ mm}/\text{h}$ 雨强对应的侵蚀量。

图 4 不同降雨强度下斜坡垄作和顺坡垄作坡面的水沙关系

3 结论

(1) 斜坡垄作在 $50, 100 \text{ mm}/\text{h}$ 降雨强度下均产

生断垄,断垄前坡面径流量和侵蚀量很小,且坡面 90%以上的径流泥沙均来自断垄后。与顺坡垄作坡面相比,50 mm/h 降雨强度下斜坡垄作坡面总径流量减少 15.4%,但坡面总侵蚀量增加了 24.3%;100 mm/h 降雨强度下斜坡垄作坡面总径流量较顺坡垄作坡面减少 4.8%,但坡面总侵蚀量增加 3.3%。

(2)斜坡垄作径流强度和侵蚀速率随降雨历时的变化均从断垄开始发生突变。50,100 mm/h 降雨强度下斜坡垄作断垄前的径流强度和侵蚀速率随降雨历时变化值均低于顺坡垄作,其坡面平均径流强度分别为顺坡垄作的 8.42%和 3.75%,平均侵蚀速率分别为顺坡垄作的 0.46%和 0.35%;而断垄后斜坡垄作坡面平均径流强度分别是顺坡垄作的 1.33,1.47 倍,平均侵蚀速率前者分别为后者的 2.03,1.62 倍。

(3)50,100 mm/h 降雨强度下,斜坡垄作断垄前坡面的径流量和侵蚀量存在极显著相关的线性关系($P < 0.01$),而断垄后两者的相关关系不显著($P > 0.05$)。顺坡垄作在 2 个降雨强度下坡面的径流量和侵蚀量均存在极显著的线性相关关系($P < 0.01$)。

参考文献:

- [1] 刘兴土,阎百兴.东北黑土区水土流失与粮食安全[J].中国水土保持,2009(1):17-19.
- [2] 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.
- [3] Gao C S, Wang J G, Zhang X Y, et al. The evolution of organic carbon in Chinese mollisol under different farming systems: Validation and prediction by using century model [J]. Agricultural Sciences in China, 2008,7(12): 1490-1496.
- [4] 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.
- [5] Xu X, Zheng F L, 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.
- [6] 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.
- [7] 张少良,张兴义,刘晓冰,等.典型黑土侵蚀区不同耕作措施的水土保持功效研究[J].水土保持学报, 2009,23

- (3):11-15.
- [8] 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.
- [9] 罗键,尹忠,郑子成,等.不同降雨条件下紫色土横坡坡面地表微地形变化特征[J].中国农业科学,2016,49(16):3162-3173.
- [10] 安娟,于妍,吴元芝.降雨类型对褐土横坡坡面土壤侵蚀过程的影响[J].农业工程学报,2017,33(24):150-156.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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):19-21.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] He J, Li H, Kuhn N J, et al. Effect of ridge tillage, no-tillage, and conventional tillage on soil temperature, water use, and crop performance in cold and semi-arid areas in Northeast China [J]. Australian Journal of Soil Research,2010,48(8):737-744.
- [17] Evelyn M, Wildhagen H, Quintern M, et al. Spatial patterns of soil biological and physical properties in a ridge tilled and a ploughed Luvisol [J]. Soil and Tillage Research,2009,105(1):88-95.
- [18] 温美丽,刘宝元,魏欣,等.冻融作用对东北黑土容重的影响[J].土壤通报,2009,40(3):492-495.
- [19] 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.
- [20] 安娟,高开通,丁柳,等.横坡垄作下雨型对褐土坡面细沟侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2019,33(1):32-38.
- [21] 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.
- [22] 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 and Tillage Research,2014,136:1-8.