

雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响

郑粉莉^{1,2} 边锋² 卢嘉¹ 覃超¹ 徐锡蒙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. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 基于人工模拟降雨试验,研究了雨型对东北黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响。根据典型黑土区侵蚀性降雨标准及雨型特征,试验设计了总降雨量相同(降雨量为87.5 mm)的5种不同雨型,即增强型(降雨过程中降雨强度分布为50-75-100-125 mm/h)、减弱型(降雨过程中降雨强度分布为125-100-75-50 mm/h)、峰值型(降雨过程中降雨强度分布为50-75-100-125-100-75-50 mm/h)、谷值型(降雨过程中降雨强度分布为100-75-50-75-100 mm/h)和均匀型(降雨过程中降雨强度保持75 mm/h不变),以及1个坡度(即顺坡垄作改横坡垄作的临界坡度5°)。结果表明,受前期预降雨的影响,各雨型处理的顺坡垄作坡面径流量差异较小,但坡面侵蚀量存在明显差异,其中峰值型雨型引起的坡面侵蚀量最大,分别是谷值型、减弱型、均匀型和增强型雨型处理下的1.20、1.63、1.78、1.80倍。引起侵蚀量较大的雨型(峰值型、谷值型和减弱型)在典型黑土区天然降雨中出现频次超过70%,这可能是该区夏季顺坡垄作坡面侵蚀作用强烈的重要原因之一。同一降雨强度在不同雨型中出现的时序不同,其产生的径流量和侵蚀量对总径流量和总侵蚀量的贡献率也不相同。除125 mm/h外,同一降雨强度出现在起始阶段产生的侵蚀量对坡面总侵蚀量的贡献率显著大于其出现在其他阶段对坡面总侵蚀量的贡献率。

关键词: 顺坡垄作; 雨型; 坡面侵蚀; 东北典型黑土区; 模拟降雨

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)02-0090-08

Effects of Rainfall Patterns on Hillslope Erosion with Longitudinal Ridge in Typical Black Soil Region of Northeast China

Zheng Fenli^{1,2} Bian Feng² Lu Jia¹ Qin Chao¹ Xu Ximeng¹

(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, China

2. College of Natural Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Longitudinal ridge, as one of the main tillage management, causes severe soil erosion on hillslope scale and makes great contribution to the soil loss in typical black soil region of Northeast China. Rainfall pattern is one of the main factors influencing hillslope erosion. The simulated experimental study was conducted to investigate the effects of rainfall patterns on hillslope erosion with longitudinal ridge in the typical black soil region. According to the erosive rainfall standard and rainfall pattern characteristics of natural rainfalls in the typical black soil region, the experimental design included five patterns of simulated rainfalls with the same total rainfall amount of 87.5 mm, covering intensive-type (rainfall intensity distribution was 50-75-100-125 mm/h), reduced-type (rainfall intensity distribution was 125-100-75-50 mm/h), peak-type (rainfall intensity distribution was 50-75-100-125-100-75-50 mm/h), valley-type (rainfall intensity distribution was 100-75-50-75-100 mm/h) and uniform-type (rainfall intensity was 75 mm/h), and the slope gradient was 5° which was the critical slope gradient of changing longitudinal ridge to contour cultivation. The results showed that total runoff volume

收稿日期: 2015-05-06 修回日期: 2015-08-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571263)

作者简介: 郑粉莉(1960—),女,研究员,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究,E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

had little difference among five rainfall patterns, while obvious differences in soil loss were observed. Soil loss of the peak-type treatment was 1.20, 1.63, 1.78 and 1.80 times higher than those of the valley-type, reduced-type, uniform-type and intensive-type treatments, respectively. Occurring frequency of three rainfall patterns (peak-type, valley-type and reduced-type) occupied more than 70% of total natural rainfall events, which could be one of the key reasons caused severe hillslope soil erosion with longitudinal ridge in this region. The time sequences of rainfall intensity in each rainfall pattern had great effects on runoff, soil erosion and their contribution rates to total runoff and soil loss. Except for 125 mm/h rainfall intensity, rainfall intensities occurred at the initial stage of the rainfall pattern had more contributions to total soil loss, compared with the rainfall intensities appeared at the middle stage and the end stage.

Key words: longitudinal ridge; rainfall pattern; hillslope erosion; typical black soil region of Northeast China; simulated rainfall

引言

我国黑土区总面积 103 万 km², 其中典型黑土区面积为 11.78 万 km²。典型黑土区的水土流失面积达 4.47 万 km², 占该区总面积的 37.9%, 而农地面积占该区总面积的 83.1%^[1]。目前该区仍大量存在顺坡垄作的农耕地, 加剧了坡面土壤侵蚀^[2-4]。有关研究结果表明, 黑土层的平均厚度已由 20 世纪 50 年代的 60~80 cm 下降至目前的 20~40 cm, 且有约 10% 的农耕地黑土层流失殆尽, 出现“破皮黄”现象^[5], 严重威胁着国家粮食安全。因此, 开展典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀机理研究将为黑土区土壤侵蚀防治提供重要的科学依据。

研究表明, 耕作方式对坡面土壤侵蚀有重要影响。紫色土坡耕地研究结果表明^[6-7], 随着降雨强度和坡度的增大, 顺坡垄作坡面侵蚀率可达平坡耕作坡面侵蚀率的 30 余倍; 东北黑土区的研究结果表明^[8-9], 顺坡垄作明显加剧了坡面侵蚀过程, 在各耕作措施中水土流失量最大。降雨量相同或相似的两场降雨, 降雨过程中降雨强度组合的不同对径流量的影响不显著, 而对侵蚀量的影响却差别很大^[10-12]。郑粉莉等^[13]利用黄土区野外径流场的多年观测资料把侵蚀性降雨按峰值降雨强度在降雨过程中出现的顺序概化为突发型、峰值型和均匀型 3 种雨型, 并指出在侵蚀性降雨雨型中, 突发型引起的侵蚀量最大, 其次为峰值型, 而均匀型引起的侵蚀量最小。国外类似的研究也表明, 峰值降雨强度出现在降雨前期的雨型引起的土壤侵蚀量比峰值降雨强度出现在后期的雨型高 40%^[14]。东北典型黑土区的研究结果表明^[12], 分布于雨型起始位置的降雨强度产生的径流量对坡面总径流量的贡献率较小, 而其产生的侵蚀量对总侵蚀量的贡献率较大。

综上所述, 现有的研究大多集中在比较相同降

雨强度下顺坡垄作对坡面侵蚀的影响, 而雨型对坡面侵蚀的影响研究多以平坡耕作坡面为主, 缺乏有关不同雨型下顺坡垄作对坡面侵蚀的影响研究。为此, 本文基于人工模拟降雨试验, 研究雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀过程的影响, 比较分析不同降雨格局下坡面侵蚀过程的特征, 为东北典型黑土区农田土壤侵蚀防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

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系统, 由中国科学院水利部水土保持研究所研制, 降雨高度 16 m, 满足所有降雨雨滴达到终点速度。该模拟降雨系统可模拟的降雨强度范围为 25~300 mm/h, 降雨均匀度大于 80%, 最大持续降雨时间 12 h。降雨试验区有效降雨面积 9 m × 4 m^[15]。试验土槽采用 8 m (长) × 3 m (宽) × 0.6 m (深) 的固定式液压升降钢槽, 中间用 PVC 板隔成 2 个 1.5 m 宽的试验土槽。

试验土壤取自吉林省榆树市刘家镇合心村南城子屯 (44°43'N, 126°11'E) 顺坡垄作坡耕地表面 0~20 cm 的耕层土壤。榆树市位于我国东北典型黑土区的中心地带, 主要土壤类型为黑土^[16], 采集的试验土壤为研究区内典型黑土, 具有较好的代表性。该区顺坡垄作坡耕地主要种植作物为玉米, 采样时间为玉米种植前的 3 月份。首先随机选取一农户耕地, 随机选取 6 垄宽度的耕地进行采样, 用铁锹在所选耕地表面采集 0~20 cm 的耕层土壤, 并将采集土样装入编织袋后运回实验室。待试验土样风干后, 剔除杂物 (秸秆、玉米根系等), 并将大土块沿自然纹理掰开成小于 4 cm 的土块, 在整个土样处理过程中不进行研磨和过筛处理以保护试验用土原有的结

构^[17]。试验土壤颗粒分级划分标准采用美国农业部制,土壤质地属于粉壤土,其中,粘粒(粒径小于 $2\ \mu\text{m}$)、粉粒($50\sim 2\ \mu\text{m}$)与砂粒($2\ 000\sim 50\ \mu\text{m}$)的质量分数分别为 20.3% 、 76.4% 和 3.3% ,pH值(水浸提法,水土质量比 $2.5:1$)为 6.39 ,土壤有机质(重铬酸钾氧化-外加加热法)质量比为 $24.18\ \text{g/kg}$ 。

1.2 试验设计

根据东北黑土区侵蚀性降雨标准^[18]($I_5 = 1.34\ \text{mm/min}$, $5\ \text{min}$ 瞬时雨量为 $6.7\ \text{mm}$),结合试验实际情况,共设计4个降雨强度(50 、 75 、 100 、 $125\ \text{mm/h}$,即 0.83 、 1.25 、 1.67 、 $2.08\ \text{mm/min}$)。通过对研究区野外2012—2014年内的天然降雨过程的分析发现,本研究区5种降雨雨型皆以不同的比例出现,其中以峰值型、谷值型、减弱型和增强型雨型所占比例较大,分别为 28.9% 、 24.9% 、 23.0% 和 17.7% ,而均匀型雨型所占比例较小,其值为 5.8% ,说

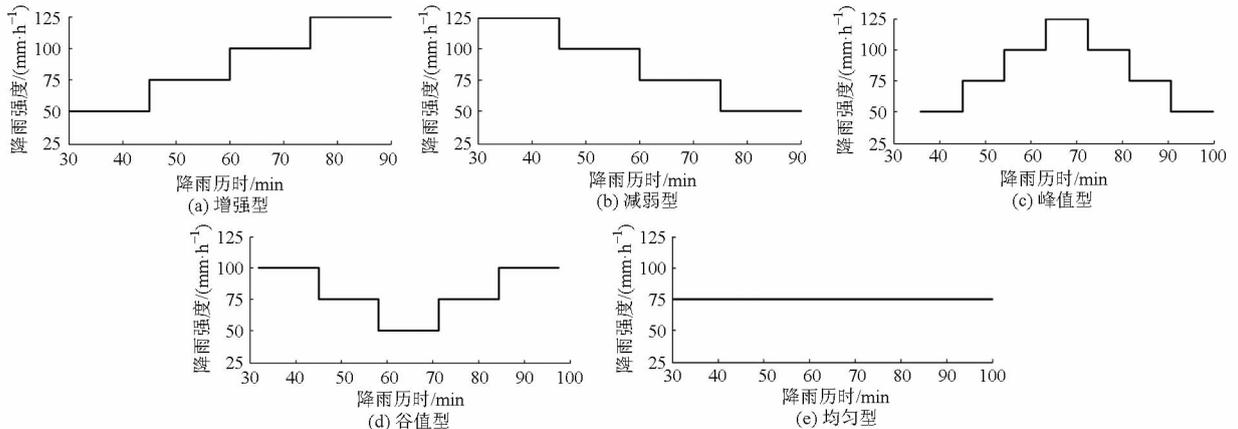


图1 试验设计

Fig.1 Experimental design

1.3 试验步骤

将野外采集的耕层土壤剔除杂物(秸秆、根系等),并将大土块按照土壤节理自然分成稍小的土块,对试验所填土壤不过筛不研磨以保持土壤的原有结构。为保证模拟降雨过程试验土槽有良好的透水性,试验土槽底部均匀打孔,并在底部装 $5\ \text{cm}$ 细沙。根据对典型黑土区的实地调查和相关文献查阅,黑土耕层土壤容重为 $1.15\sim 1.25\ \text{g/cm}^3$,犁底层土壤容重为 $1.28\sim 1.48\ \text{g/cm}^3$ ^[5]。所以,本研究设计的耕层土壤容重为 $1.20\ \text{g/cm}^3$,犁底层土壤容重为 $1.35\ \text{g/cm}^3$ 。沙层之上分为耕层和犁底层填装,按容重 $1.35\ \text{g/cm}^3$ 填充 $10\ \text{cm}$ 厚的粘黄土,用于模拟坡耕地的犁底层。粘黄土层之上按容重 $1.20\ \text{g/cm}^3$ 填充 $20\ \text{cm}$ 厚的黑土层,模拟耕层。为了保证填土的均匀性,采用分层填土法,每 $5\ \text{cm}$ 为一层。装入试验土槽前,测定土壤含水率,计算每层所需的土壤质量,每层填土均采取边填充边压实方法,并将接触

面打毛处理,减少边界效应的影响及土壤分层现象,使下垫面土壤条件的变异性达到最小。填装好试验土槽后,按照垄高 $15\ \text{cm}$ 、垄间距为 $65\ \text{cm}$ 制作顺坡垄。

明这5种降雨雨型在典型黑土区均具有代表性。因此本研究共设计了5种雨型(图1),分别为增强型(降雨强度分布为 $50-75-100-125\ \text{mm/h}$)、减弱型(降雨强度分布为 $125-100-75-50\ \text{mm/h}$)、峰值型(降雨强度分布为 $50-75-100-125-100-75-50\ \text{mm/h}$)、谷值型(降雨强度分布为 $100-75-50-75-100\ \text{mm/h}$)和均匀型(降雨强度始终保持 $75\ \text{mm/h}$)。对于各种雨型,总降雨量设计为 $87.5\ \text{mm}$,以均匀型雨型作为对照,研究在总降雨量相同的情况下雨型对顺坡垄作坡面土壤侵蚀过程的影响。

根据野外调查结果和相关文献资料^[19],设计顺坡垄间距 $65\ \text{cm}$,垄高 $15\ \text{cm}$,在典型黑土区具有较好的典型性和代表性。黑土区农耕地的地面坡度一般为 $3^\circ\sim 5^\circ$ ^[20],此外,根据陈雪等^[19]将顺坡垄作改横坡垄作的临界坡度定为 5° ,因此本研究设计的坡度为 5° 。

面打毛处理,减少边界效应的影响及土壤分层现象,使下垫面土壤条件的变异性达到最小。填装好试验土槽后,按照垄高 $15\ \text{cm}$ 、垄间距为 $65\ \text{cm}$ 制作顺坡垄。

由于试验地表处理皆为裸露的顺坡垄作,为了保证在每场降雨试验前试验土槽土壤含水率及其在剖面上分布的相对一致,正式降雨前一天,用纱网覆盖试验土槽,然后用 $30\ \text{mm/h}$ 降雨强度进行预降雨直至坡面产流为止,用纱网覆盖试验土槽的目的主要是减少雨滴打击对土壤颗粒分散的影响,削弱土壤表层的结皮作用^[21]。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 $12\ \text{h}$ 后正式降雨,使水分自由下渗以接近自然状态下的土壤水分分布状况。正式降雨试验前测定坡面表层土壤平均含水率为 $28.3\% \pm 1.1\%$ 。为了保证降雨均匀度和准确度,试验中变换降雨强度时都要对降雨强度进行率定,当降雨均匀

度大于 85%, 实测降雨强度与目标降雨强度的差值小于 5% 时方可进行后续正式降雨。正式降雨开始后观察坡面产流情况, 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。降雨结束后, 称取径流泥沙质量, 静置去除径流样的上层清液, 然后放入 105℃ 干燥箱, 干燥后测得泥沙质量, 计算产流量和产沙量。

2 结果与讨论

2.1 雨型对顺坡垄作坡面径流总量和侵蚀总量的影响

在总降雨量相同的情况下, 不同雨型下顺坡垄作坡面径流量存在较小的差异(表 1), 由大到小的顺序为增强型、均匀型、峰值型、减弱型、谷值型, 其中, 增强型雨型坡面径流总量为均匀型的 1.06 倍, 而减弱型、峰值型和谷值型雨型坡面径流总量则分别为均匀型雨型的 93.5%、95.4% 和 89.9%。造成不同雨型下顺坡垄作坡面径流量差异较小的原因主要是前期预降雨使各雨型下坡面表层土壤水分接近饱和(土壤含水率为 28.3%), 导致降雨过程中土壤入渗很快达到稳定入渗阶段。试验表明(表 1), 各雨型处理下, 入渗量仅占降雨量的 16.5% ~ 29.0%, 说明大部分降雨转化为地表径流。

表 1 不同雨型下顺坡垄作坡面径流量和侵蚀量

Tab. 1 Total runoff volume and soil loss under different rainfall patterns

雨型	总径流量/mm	总入渗量/mm	总侵蚀量/kg
增强型	73.1 ± 1.7	14.4 ± 1.7	7.2 ± 1.2
减弱型	64.6 ± 5.1	22.9 ± 5.1	8.0 ± 1.8
峰值型	66.0 ± 0.1	21.5 ± 0.1	13.0 ± 2.0
谷值型	62.1 ± 4.8	25.4 ± 4.8	10.9 ± 4.1
均匀型	69.1 ± 2.0	18.4 ± 2.0	7.3 ± 1.3

注: 数据为平均值 ± 标准差。

与雨型对坡面径流量的影响不同, 雨型对坡面

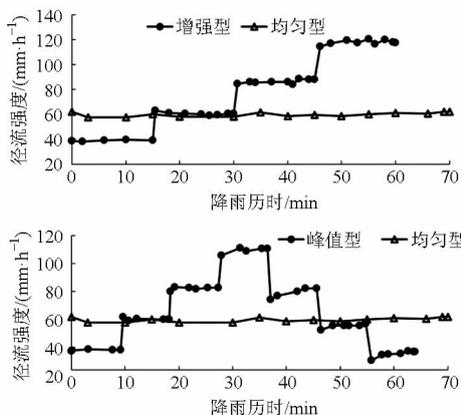


图 2 不同雨型下径流强度随降雨历时变化

Fig. 2 Runoff rate varies with rainfall duration under different rainfall patterns

侵蚀量有明显影响。不同雨型下坡面侵蚀总量由大到小的顺序为峰值型、谷值型、减弱型、均匀型、增强型, 其中, 峰值型雨型引起的侵蚀总量最大, 为均匀型雨型的 1.78 倍, 而增强型雨型下的坡面侵蚀总量与均匀型雨型下的侵蚀量基本相同。峰值型和谷值型雨型中降雨强度变化频次较多, 顺坡垄作土壤表面形成的结皮处在不断地破坏形成的动态变化过程中^[22], 虽然结皮的形成在短期内会造成坡面被剥蚀和搬运的物质减少, 但是一旦结皮破坏会迅速增加坡面被剥蚀和搬运的物质, 因而造成这 2 种雨型下坡面侵蚀较大。减弱型与均匀型雨型初始降雨强度较大, 对坡面土壤打击作用强, 形成了相对致密的结皮物质抑制产沙^[23-25], 特别是在后期降雨强度变小后, 由于雨滴打击力和径流剥蚀能力的减弱, 结皮更难被破坏, 最终导致总侵蚀量较小。

研究结果还表明(表 1), 研究区天然降雨中频次出现较多的降雨雨型(峰值型、谷值型和减弱型)在本试验中造成的顺坡垄作坡面侵蚀量较大, 这也可能是典型黑土区夏季顺坡垄作坡面水蚀作用强烈的主要原因之一。

2.2 雨型对顺坡垄作坡面土壤侵蚀过程的影响

2.2.1 不同雨型下坡面径流强度的动态变化过程

均匀型雨型的径流强度在 57.7 ~ 62.0 mm/h 之间变化, 而其他雨型下的径流强度变化过程与雨型中降雨强度变化过程保持一致(图 2)。通过比较各雨型与均匀型雨型的径流强度可以发现, 在 75 mm/h 的降雨强度下, 增强型雨型、峰值型雨型上升阶段和谷值型雨型上升阶段的平均径流强度与均匀型雨型的径流强度基本一致, 分别为均匀型径流强度的 104.2%、96.4% 和 97.3%; 而峰值型雨型的下降阶段、谷值型和减弱型雨型的平均径流强度均略小于均匀型雨型, 其值分别为均匀型径流强度的 84.8%、86.0% 和 88.5%。可见, 在模拟降雨过程中由于同一降雨强度在不同雨型中出现的时序不

同,从而导致坡面径流过程的不同。

2.2.2 不同雨型下坡面侵蚀率的动态变化过程

增强型、减弱型、峰值型和谷值型4种变降雨强度雨型的坡面侵蚀率表现出与径流强度大致相同的趋势,即坡面侵蚀率的变化与降雨强度的变化趋势一致(图3)。

对于增强型和峰值型雨型,降雨强度由50 mm/h增加到75 mm/h时,坡面侵蚀率变化较小,但当降雨强度达到100 mm/h时,侵蚀率呈急速上升的趋势。这主要是由于较小降雨强度出现在降雨初期时,雨滴能量较小,雨滴打击力和径流搬运能力较弱,坡面侵蚀量较小;而当降雨强度增加到100 mm/h时,雨滴打击力和径流搬运能力急剧增加,致使被分散和剥离的土壤颗粒增多,从而导致坡面侵蚀率急剧增加。对于减弱型和谷值型雨型,当降雨强度由100 mm/h减小至75 mm/h时,侵蚀率则呈急速下降的趋势。这是由于降雨初期的大降雨强度导致土壤被压实,顺垄垄坡表面形成了相对致密的结皮层,土壤抗蚀能力增强;另外,当降雨强度减小到75 mm/h

时,雨滴打击力与径流剥蚀和搬运能力也相对减弱,从而造成侵蚀率呈急剧下降趋势。由此可见,无论是降雨强度增大过程还是减小过程,顺坡垄作坡面侵蚀率在75~100 mm/h降雨强度之间均存在突变,降雨强度变化对顺坡垄作坡面侵蚀的影响十分显著。已有研究表明^[17],降雨强度由50 mm/h增大到100 mm/h时,黑土平整坡面的侵蚀量增大4.2倍,因此,在典型黑土区土壤侵蚀防治中,瞬时大降雨强度需要得到更多的注意。

对比相同降雨强度下峰值型和谷值型雨型的侵蚀率发现(图3),同一降雨强度出现在较早降雨时序引起的侵蚀率比其出现在较晚时序引起的侵蚀率大,而且均匀性降雨的侵蚀速率也随着降雨历时呈缓慢下降的趋势。造成这种现象的主要原因是降雨初期阶段,由于雨滴打击导致地表松散的颗粒物质较多,供给地表径流搬运的物质也较多,从而使侵蚀率较大;而在降雨后期阶段,随着降雨过程的进行,顺垄垄坡表面形成相对稳定的结皮层,使表层土壤抗剪强度增加,土壤分散能力减弱,从而使坡面侵蚀率减小。

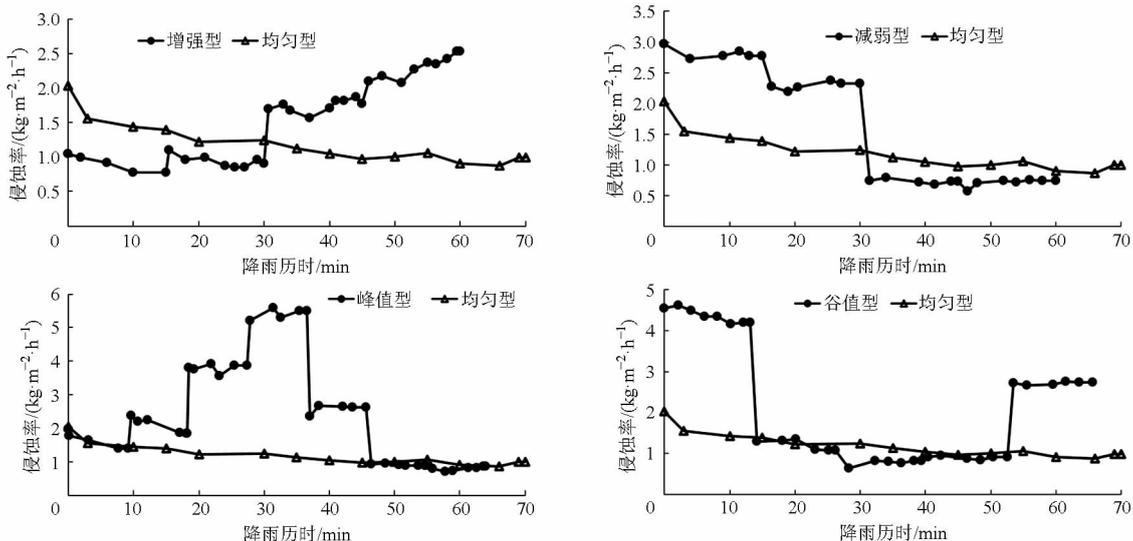


图3 不同雨型下侵蚀速率随降雨历时变化

Fig.3 Soil erosion rates varies with rainfall duration under different rainfall patterns

由图2和图3可以发现,4种变降雨强度雨型的侵蚀率变化过程较径流强度变化过程的波动性大。主要原因有两方面:①径流的汇集使顺垄垄沟内出现明显的细沟下切沟头,而细沟沟头的溯源侵蚀使垄沟内断续细沟形成连续细沟,导致坡面侵蚀量增加^[26];此外,随着降雨过程的进行,垄沟集中水流进一步下切形成更深一级的细沟沟槽,细沟内股流对垄沟侧壁的掏涮作用也进一步加剧了沟壁坍塌^[27],从而使侵蚀产沙量增大(图4)。②由于结皮的形成抑制了侵蚀的发生,更重要的是沟头溯源侵蚀和沟壁坍塌产生相对较大的土块沉积在垄沟内,临时阻止了坡面侵蚀物质的搬运;然后一旦由于

径流汇集且足够搬运这些较大土块,则会使坡面侵蚀率瞬间急剧增加。正是这两方面的综合作用使得坡面侵蚀率呈现较大的波动特征。

2.3 降雨强度在各雨型中的降雨时序对顺坡垄作坡面径流和泥沙的影响

雨型不同,同一降雨强度在不同雨型中的降雨时序不同,其产生的各变降雨强度阶段的径流量及其对次降雨总径流量的贡献率不同(表2)。

除50 mm/h外,同一降雨强度在不同雨型出现的时序对径流贡献率的影响不显著(表2)。这主要是因为前期预降雨使各雨型下坡面表层土壤水分接近饱和(土壤含水率为28.3%),导致降雨过程中土



图 4 顺垄垄沟内的细沟侵蚀

Fig. 4 Rill erosion in longitude ridge furrow

表 2 同一降雨强度在各雨型中的降雨时序与其相应的径流量和侵蚀量及其贡献率

Tab. 2 Time sequences of rainfall intensity in each rainfall pattern and its runoff and soil loss as well as contribution rates to total runoff and soil loss

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	雨型	降雨 时序	径流量/ mm	贡献率/ %	侵蚀量/ kg	贡献率/ %
50	峰值型	起始阶段	5.8 ^a	8.8 ^a	1.3 ^a	10.0 ^a
	谷值型	中间阶段	4.4 ^a	7.1 ^b	0.5 ^a	4.6 ^b
	减弱型	结束阶段	5.1 ^a	7.9 ^b	0.5 ^a	6.4 ^b
75	均匀型	起始阶段	9.0 ^a	13.0 ^a	1.0 ^a	13.0 ^a
	增强型	第 2 阶段	9.4 ^a	12.8 ^a	0.7 ^a	10.1 ^{ab}
	谷值型	第 2 阶段	7.8 ^a	12.5 ^a	0.9 ^a	8.5 ^{bc}
100	减弱型	第 3 阶段	8.0 ^a	12.4 ^a	0.5 ^a	6.7 ^c
	谷值型	起始阶段	12.1 ^a	19.5 ^a	3.5 ^a	32.1 ^a
	减弱型	第 2 阶段	11.2 ^a	17.4 ^a	1.6 ^a	20.4 ^{bc}
125	峰值型	第 3 阶段	12.3 ^a	18.7 ^a	2.9 ^a	22.5 ^b
	谷值型	结束阶段	10.9 ^a	17.6 ^a	2.0 ^a	18.2 ^c
	减弱型	起始阶段	15.0 ^a	23.3 ^a	2.2 ^{ab}	27.5 ^a
125	峰值型	中间阶段	15.6 ^a	23.6 ^a	4.0 ^a	30.6 ^a
	增强型	结束阶段	16.7 ^a	22.8 ^a	1.7 ^b	22.9 ^a

注:同一降雨强度下同一列数值后不同字母表示在不同雨型间达到 $P < 0.05$ 水平的显著差异。

壤入渗很快达到稳定入渗阶段,70%以上的降雨均转化为坡面径流。

次降雨过程中,除 125 mm/h 外,各降雨强度在不同雨型出现的时序对侵蚀贡献率的影响存在显著差异。50、75、100 mm/h 降雨强度出现在雨型起始阶段的侵蚀贡献率大于出现在其他阶段的贡献率,其分别为出现在其他阶段贡献率的 1.31~2.17 倍(表 2)。这与前人的研究结果一致^[12]。但对于 125 mm/h 降雨强度,其出现在减弱型雨型起始阶段的侵蚀贡献率与其出现在峰值型雨型中间阶段和出

现在增强型雨型结束阶段的侵蚀贡献率无显著差异。

对于 50 mm/h 降雨强度,出现在峰值型雨型起始阶段的侵蚀贡献率为 10.0%,而其出现在谷值型雨型中间阶段和减弱型雨型结束阶段的侵蚀贡献率分别为 4.6% 和 6.4%,分别为峰值型雨型起始阶段侵蚀贡献率的 46.1% 和 63.5%。对于 75 mm/h 降雨强度,其出现在均匀型雨型起始阶段的侵蚀贡献率分别为增强型、谷值型和减弱型雨型中间阶段侵蚀贡献率的 1.31、1.59、1.96 倍。对于 100 mm/h 降雨强度,其出现在谷值型雨型起始阶段的侵蚀贡献率分别为减弱型和峰值型雨型中间阶段和谷值型雨型结束阶段侵蚀贡献率的 1.57、1.43、1.76 倍。其原因主要是降雨起始阶段,由于雨滴打击导致地表松散的颗粒物质增多,供给地表径流搬运的物质也较多,从而使侵蚀率较大;而在降雨后期阶段,降雨前期较大的降雨强度对坡面的压实作用以及坡面形成相对稳定的结皮层使土壤抗侵蚀能力增加,而此时降雨强度减小又使得雨滴侵蚀和径流侵蚀能力减小,从而导致侵蚀率减小。

而对于 125 mm/h 降雨强度,其在不同雨型中出现的时序对侵蚀贡献率的影响无显著差异。其原因是该降雨强度的雨滴侵蚀和径流侵蚀能力大,径流搬运能力也较大,因而无论其出现在降雨过程中的任何时段,皆能分散、剥蚀土壤颗粒,搬运和携带侵蚀物质,使侵蚀量增大。

3 结论

(1)在前期预降雨的影响下,不同雨型顺坡垄作坡面径流量存在较小的差异,其中,谷值型雨型径流总量最小,分别为其他雨型的 85.0%~96.1%。均匀型雨型的径流强度变化在 57.7~62.0 mm/h 之间,而其他雨型的径流强度变化过程与降雨强度变化过程保持一致。在模拟降雨过程中由于同一降雨强度在不同雨型中出现的时序不同,从而导致坡面径流过程不同。

(2)不同雨型间的坡面侵蚀总量存在明显差异,峰值型的坡面侵蚀总量最大,分别是谷值型、减弱型、均匀型和增强型的 1.20、1.63、1.78、1.80 倍,其中,侵蚀总量较大的雨型(峰值型、谷值型和减弱型)在典型黑土区天然降雨中所占频次超过 70%,这可能是典型黑土区夏季顺坡垄作坡耕地水蚀作用强烈的主要原因之一。

(3)由于垄沟内细沟的形成以及沟头溯源侵蚀和沟壁崩塌作用造成相对较大的土块在垄沟的临时堵塞和瞬间冲刷搬运,不同雨型坡面侵蚀率动态变

化过程的波动性明显大于径流过程的波动性。同一降雨强度出现在较早降雨时序所引起的侵蚀率比出现在较晚时序时引起的侵蚀率大。此外,顺坡垄作坡面侵蚀率在 75 ~ 100 mm/h 降雨强度之间均存在突变,降雨强度变化对顺坡垄作坡面侵蚀的影响十分显著。

(4) 同一降雨强度在不同雨型中的出现时序不

同,其引起坡面径流量和侵蚀量对坡面总径流量和总侵蚀量的贡献率也不同。除 50 mm/h 外,同一降雨强度在不同雨型出现的时序对径流贡献率的影响不显著。除 125 mm/h 外,同一降雨强度出现在起始阶段产生的侵蚀量对坡面总侵蚀量的贡献率显著大于其出现在其他阶段对坡面总侵蚀量的贡献率。

参 考 文 献

- 刘宝元, 阎百兴, 沈波, 等. 东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 1-8.
Liu Baoyuan, Yan Baixing, Shen Bo, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for cultivated land in the Northeastern black soil area of China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(1): 1-8. (in Chinese)
- 赵玉明, 姜洪涛, 王世界. 东北黑土区不同地形垄向坡度的相对水土保持效益研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(5): 28-34.
Zhao Yuming, Jiang Hongtao, Wang Shijie. Study on relative soil and water conservation benefits in different terrain conditions in black soil area of northeast China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(5): 28-34. (in Chinese)
- 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.
Shen Changpu, Gong Zhenping, Wen Jintao. Comparison study on soil and water loss of cross ridge and longitudinal ridge [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005, 25(4): 48-50. (in Chinese)
- 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.
Fan Haoming, Cai Qiangguo, Cui Ming. Soil erosion developed with the vertical belts in the gentle hilly black soil regions in Northeast China [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6): 8-11. (in Chinese)
- 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.
- 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.
Wang Yongqiang, Wang Yukuan, Fu Bin, et al. Study of soil erosion in areas of purple soil under various cultivation systems [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(3): 333-335. (in Chinese)
- 严冬春, 王安邦, 龚长文, 等. 紫色土陡坡耕地顺坡垄作条件下的土壤及其流失特征[J]. 山地学报, 2014, 32(3): 314-319.
Yan Dongchun, Wen Anbang, Gong Changwen, et al. Characteristics of purple soil and soil loss on down-slope furrow tillage sloping farmland [J]. Journal of Mountain Science, 2014, 32(3): 314-319. (in Chinese)
- 张少良, 刘威, 张兴义, 等. 黑土区典型小流域土壤侵蚀空间格局模拟研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(4): 224-227.
Zhang Shaoliang, Liu Wei, Zhang Xingyi, et al. Spatial pattern prediction of soil erosion in small typical watersheds in black earth region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(4): 224-227. (in Chinese)
- 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.
Song Yue, Zhang Zhongxue. The effect of different tillage measures on soil erosion in slope farmland in black soil region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(2): 14-16. (in Chinese)
- Frauenfeld B C, Truman G. Variable rainfall intensity effects on runoff and interrill erosion from two coastal plain ultisols in Georgia [J]. Soil Science, 2004, 169(2): 143-154.
- Parsons A J, Stone P M. Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on interrill runoff and erosion [J]. CATENA, 2006, 67(1): 68-78.
- 温磊磊, 郑粉莉, 杨青森, 等. 雨型对东北黑土区坡耕地土壤侵蚀影响的试验研究[J]. 水利学报, 2012, 43(9): 1084-1091.
Wen Leilei, Zheng Fenli, Yang Qingsen, et al. Effects of rainfall patterns on hillslope farmland erosion in black soil region of Northeast China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(9): 1084-1091. (in Chinese)
- 郑粉莉, 唐克丽, 白红英. 子午岭林区不同地形部位开垦裸露地降雨侵蚀力的研究[J]. 水土保持学报, 1994, 8(1): 26-31.
Zheng Fenli, Tang Keli, Bai Hongying. Study on the rainfall erosivity on the reclaimed and bare land of different topographical of Ziwuling forest area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 8(1): 26-31. (in Chinese)
- Flanagan D C, Foster G R, Moldenhauer W C. Storm pattern effect on infiltration, runoff, and erosion [J]. Transactions of the ASAE, 1988, 31(2): 414-420.
- 郑粉莉, 赵军. 人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 177-178.
Zheng Fenli, Zhao Jun. A brief introduction on the rainfall simulation laboratory and equipment [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(4): 177-178. (in Chinese)
- 阎百兴, 杨育红, 刘兴土, 等. 东北黑土区土壤侵蚀现状与演变趋势[J]. 中国水土保持, 2008(12): 26-30.
Yan Baixing, Yang Yuhong, Liu Xingtu, et al. Current status and evolution trend of soil erosion in Northeastern black soil area of

- China [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2008(12): 26 - 30. (in Chinese)
- 17 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.
Li Guifang, Zheng Fenli, Lu Jia, et al. Effects of rainfall and topography on soil erosion processes of black soil hillslope [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4): 147 - 154. (in Chinese)
- 18 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.
Gao Feng, Zhan Min, Zhan Hui. Study on criteria of erosive rain in farmland of chernozem in Heilongjiang Province [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1989(11): 21 - 23. (in Chinese)
- 19 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.
Chen Xue, Cai Qiangguo, Wang Xueqiang. Suitability of soil and water conservation measures on sloping farmland in typical black soil regions of Northeast China [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(5): 44 - 49. (in Chinese)
- 20 贾洪雷, 马成林, 李慧珍, 等. 基于美国保护性耕作分析的东北黑土区耕地保护[J]. *农业机械学报*, 2010, 31(6): 28 - 34.
Jia Honglei, Ma Chenglin, Li Huizhen, et al. Study on subsoiling technique for conservation tillage field [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 31(6): 28 - 34. (in Chinese)
- 21 卜崇峰, 吴淑芳, 张兴昌, 等. 东北黑土结皮发育过程[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 357 - 362.
Bu Chongfeng, Wu Shufang, Zhang Xingchang, et al. Development processes of crust in black soil region of Northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 357 - 362. (in Chinese)
- 22 陈正发, 夏清, 史东梅, 等. 基于模拟降雨的土壤表土结皮特征及坡面侵蚀响应[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 6 - 11.
Chen Zhengfa, Xia Qing, Shi Dongmei, et al. Soil surface crust characteristic and response feature to slope erosion base on simulation rainfall [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 6 - 11. (in Chinese)
- 23 Bu C, Gale W J, Cai Q, et al. Process and mechanism for the development of physical crusts in three typical Chinese soils [J]. *Pedosphere*, 2013, 23(3): 321 - 332.
- 24 高燕, 郑粉莉, 王彬, 等. 土壤结皮对黑土区坡面产流产沙的影响[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(4): 17 - 20.
Gao Yan, Zheng Fenli, Wang Bin, et al. Effects of soil crust on runoff and sediment on hillslope in black soil region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(4): 17 - 20. (in Chinese)
- 25 吴发启, 范文波. 土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3(2): 97 - 101.
Wu Faqi, Fan Wenbo. Effects of soil encrustation on rainfall infiltration, runoff and sediment generation [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(2): 97 - 101. (in Chinese)
- 26 和继军, 吕焯, 官辉力, 等. 细沟侵蚀特征及其产流产沙过程试验研究[J]. *水利学报*, 2013, 44(4): 398 - 405.
He Jijun, Lü Ye, Gong Huili, et al. Experimental study on rill erosion characteristic and its runoff and sediment yield process [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(4): 398 - 405. (in Chinese)
- 27 Wells R R, Momm H G, Rigby J R, et al. An empirical investigation of gully widening rates in upland concentrated flows [J]. *CATENA*, 2013, 101: 114 - 121.

(上接第 184 页)

- 13 李一平, 邱利, 唐春燕, 等. 湖泊水动力模型外部输入条件不确定性和敏感性分析[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(2): 410 - 416.
Li Yiping, Qiu Li, Tang Chunyan, et al. Uncertainty and sensitivity analysis of input conditions in large shallow lake hydrodynamic model [J]. *China Environment Science*, 2014, 34(2): 410 - 416. (in Chinese)
- 14 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- 15 Bloesch J. A review of methods used to measure sediment resuspension [J]. *Hydrobiologia*, 1994, 284(1): 13 - 18.
- 16 Zhuang Ping, McBride M B, Xia Hanping, et al. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(5): 1551 - 1561.
- 17 弓晓峰, 陈春丽, 周文斌, 等. 鄱阳湖底泥中重金属污染现状评价[J]. *环境科学*, 2006, 27(4): 732 - 736.
Gong Xiaofeng, Chen Chunli, Zhou Wenbin, et al. Assessment on heavy metal pollution in the sediment of Poyang Lake [J]. *Environment Science*, 2006, 27(4): 732 - 736. (in Chinese)
- 18 Bing Haijian, Wu Yanhong, Liu Enfeng, et al. Assessment of heavy metal enrichment and its human impact in lacustrine sediments from four lakes in the mid-low reaches of the Yangtze River, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(7): 1300 - 1309.