DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2025.02.016 CSTR:32310.14.stbcxb.2025.02.016

王婷婷,沈海鸥,梁羽石,等.不同坡度条件下连续降雨及汇流对黑土坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2025,39(2):12-20,29.

WANG Tingting, SHEN Haiou, LIANG Yushi, et al. Effects of continuous rainfall and runoff under different slope conditions on hillslope soil erosion in the black soil region [J].Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2):12-20, 29.

不同坡度条件下连续降雨及汇流对黑土坡面侵蚀的影响

王婷婷¹,沈海鸥¹,梁羽石¹,刘建祥²,赵强³,王雪滢¹,田立¹

(1.吉林农业大学资源与环境学院,长春 130118; 2.水利部松辽水利委员会察尔森水库管理局, 内蒙古自治区,内蒙古兴安盟 137400; 3.吉林省土壤肥料总站,长春 130022)

摘 要:[目的]为探究不同坡度及降雨径流条件下坡面细沟侵蚀特征。[方法]采用连续模拟降雨和上 方汇流试验的方法,研究2种坡度(5°、10°)和3种降雨径流阶段(降雨、汇流、降雨+汇流)下坡面侵蚀过 程。[结果]坡面径流量和侵蚀量随坡度的增加而增加,在5°坡度下降雨条件的坡面径流量和侵蚀量分别 是汇流条件的1.06、2.23倍,而在10°坡度下其坡面径流量和侵蚀量分别是汇流条件的1.26、3.34倍。产流 率随时间变化均呈先增加后趋于平稳的变化特征,初始产流时间随降雨次数的递增和坡度的增加不断提 前,且稳定产流率和产沙率也呈增大趋势。同一坡度下,连续降雨坡面径流量和坡面侵蚀量的贡献率均随 降雨次数的递增不断降低;连续汇流条件下坡面径流量的贡献率第1场次最大,为56.40%,而坡面侵蚀量 的贡献率第3场次最大,为87.50%。相关性分析表明,坡面径流量和侵蚀量与降雨汇流处理、坡度-降雨汇 流处理的交互作用均呈极显著相关(*p*<0.001);方差分析发现,降雨汇流处理对坡面径流量和侵蚀量的影 响极显著(*p*<0.001),坡度对坡面径流量和侵蚀量的影响较显著(*p*<0.01)。2种坡度下细沟侵蚀量分别占 坡面侵蚀量的37.69%~85.45%和53.99%~90.65%,且细沟侵蚀量随坡度的升高而逐渐增加。[结论]研究 结果有助于深入理解细沟侵蚀机理,对东北黑土区的水土流失防治具有重要意义。

关键词:细沟侵蚀;坡度;降雨;汇流;东北黑土区

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2025)02-0012-09

Effects of Continuous Rainfall and Runoff under Different Slope Conditions on Hillslope Soil Erosion in the Black Soil Region

WANG Tingting¹, SHEN Haiou¹, LIANG Yushi¹, LIU Jianxiang², ZHAO Qiang³, WANG Xueying¹, TIAN Li¹

(1.College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2.Charlson Reservoir Authority of Song-Liao Water Resources Commission, Xingan League, Inner Mongolia 137400, China;

3. Soil and Fertilizer General Station of Jilin Province, Changchun 130022, China)

Abstract: **[Objective]** To investigate the characteristics of rill erosion on slopes under different slope gradients and rainfall-runoff conditions. **[Methods]** Continuous simulated rainfall and upper slope inflow tests were conducted to study the erosion processes on slopes with two slope gradients (5° and 10°) and across three rainfall-runoff stages (rainfall, inflow, and rainfall+inflow). **[Results]** The volumes of slope runoff and erosion increased with slope gradient. Under rainfall conditions at a 5° slope, the runoff and erosion volumes were 1.06 and 2.23 times of those under inflow conditions, respectively, while at a 10° slope, the runoff and erosion volumes were 1.26 and 3.34 times of those under inflow conditions. The runoff rate initially increased over time and then tended to stabilize. The initial runoff production time occurred earlier with increasing rainfall frequency and slope gradient, with both the stable runoff rate and sediment yield rate increasing correspondingly. Under the same slope gradient, the contribution rates of slope runoff and erosion under continuous rainfall conditions decreased with each additional

收稿日期:2024-10-08 修回日期:2024-10-31 录用日期:2024-11-07 网络首发日期(www.cnki.net):2025-02-18 资助项目:国家自然科学基金项目(42401007);吉林省自然科学基金优秀青年基金项目(20240101024JJ);吉林省"黑土粮仓"科技会战"揭榜挂 帅"重点项目(JJKH20240457HT)

第一作者:王婷婷(1999—),女,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:3212985682@qq.com

通信作者:梁羽石(1995—),男,讲师,博士,硕士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:lukeliang@jlau.edu.cn

rainfall event. Under continuous inflow conditions, the contribution rate of slope runoff was the highest during the first event, reaching 56.40%, while the contribution rate of slope erosion was the highest during the third event, being 87.50%. Correlation analysis revealed that slope runoff and erosion were highly significantly correlated with the rainfall inflow treatments and the interaction between slope gradient and rainfall inflow treatments (p < 0.001). Variance analysis indicated that the effects of rainfall inflow treatments on slope runoff and erosion were highly significant (p < 0.001), while the effects of slope gradient were moderately significant (p < 0.01). Rill erosion accounted for 37.69%—85.45% and 53.99%—90.65% of the total slope erosion at the two slope gradients, respectively, with rill erosion increasing as the gradient increased. [Conclusion] The findings contribute to a deeper understanding of the mechanisms of rill erosion and hold significant implications for soil and water conservation efforts in the black soil region of Northeast China.

Keywords: rill erosion; slope gradient; rainfall; inflow; black soil region

Received: 2024-10-08 **Revised**: 2024-10-31 **Accepted**: 2024-11-07

东北黑土区是我国重要的商品粮生产基地,在 粮食安全与农业高质量发展中占据主导地位^[1]。然 而,长期高强度的开发利用和掠夺式经营已使得土 壤侵蚀尤为强烈,黑土质量出现严重退化,土地生产 力迅速下降^[2]。细沟侵蚀是黑土区坡面侵蚀过程中 最普遍的侵蚀形式之一,细沟侵蚀量可占坡耕地总 侵蚀量的70%以上^[3],是引发黑土地"薄、瘦、硬"问 题的主要原因,严重阻碍农业生产与生态保护的协 调共进。细沟侵蚀标志着坡面侵蚀的结束和沟道侵 蚀的开始^[4]。准确把握细沟侵蚀特征的演变规律,是 理解坡面侵蚀过程、推进水土流失防治的必要基础, 开展东北黑土区的坡面细沟侵蚀研究迫在眉睫。

目前,关于黑土区坡面细沟侵蚀的定量研究已 取得一定进展。针对黑土区特有长缓坡地形发育的 坡面汇流,伴随细沟形成过程的不断深入,分散薄层 水流快速发展为片状集中径流[5],坡面侵蚀动力显著 增强,产生的泥沙量也增加数十倍[6]。裴冠博等[7]基 于室内模拟降雨试验分析坡面细沟形态发现,细沟 的发育形成受到降雨、径流、地形等条件的共同作 用,降雨强度、降雨历时、汇流量、坡度等诸多因素对 细沟侵蚀起决定性影响。通过总结归纳东北黑土区 的细沟侵蚀特征,张光辉等^[8]研究指出,降雨强度的 持续增加不断加剧细沟侵蚀程度,坡面径流挟沙力 及输沙量也迅速变大;也有研究^[9]表明,坡面细沟径 流量及侵蚀量均随降雨强度的提升而持续增多,且 细沟侵蚀产流率与降雨历时呈显著正相关[10];结合 坡面侵蚀过程分析,土壤侵蚀量在细沟出现后突然 陡增^[11],细沟侵蚀量可占坡面侵蚀总量的50%~ 70%,在极端降雨条件下甚至能增长至90%^[12]。 SHEN 等^[13]研究表明,当5°~10°坡面上产生细沟侵 蚀时,土壤侵蚀量将显著升高1.7~6.9倍。综上可 知,学者们在细沟侵蚀对多种地形和降雨条件的响

应过程方面已开展大量研究,并针对其坡面产流产 沙效应进行较为系统的阐述,但现阶段关于不同坡 度条件及降雨径流阶段的坡面细沟侵蚀研究还不够 充分,坡度、降雨和汇流条件及其交互作用下细沟侵 蚀对坡面侵蚀过程的影响研究仍鲜见报道。

Online(www.cnki.net):2025-02-18

鉴于此,为分析坡度、降雨汇流处理及其交互作 用对坡面侵蚀过程的综合影响,本研究基于模拟降 雨和上方汇流试验,设计不同坡度(5°、10°)和降雨径 流阶段(降雨、汇流、降雨+汇流)及二者组合的试验 处理,通过开展连续3场次室内模拟试验,揭示不同 处理下的细沟径流量与侵蚀量变化,厘清降雨及汇 流强度对坡面侵蚀过程的贡献程度,以期为深化细 沟侵蚀机理研究提供理论支撑,并为黑土区水土流 失防治措施的布设优化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置与材料

试验于2023年5—10月在国家级水土保持监测点 吉林省长春市青沟小流域综合观测站(43°52′N, 125°21′E)人工模拟降雨天厅内进行。试验降雨设备 为下喷式人工模拟降雨系统,降雨支架顶部距地面 6 m,降雨均匀度>85%,降雨覆盖面积为6 m×3 m, 降雨强度为30~165 mm/h,试验土槽规格为长2 m,宽 0.5 m,深 0.5 m,其可调节坡度为0~30°^[14]。试验土样 采自典型黑土耕地,测得土壤体积质量为1.20 g/cm³, 有机质为21.8 g/kg,黏粒、粉粒、砂粒分别占土壤总体 机械组成的21.2%、47.9%和30.9%。

1.2 试验设计

根据东北黑土区地形和降雨过程特点,设计2种 坡度(5°、10°)和3种降雨径流阶段(降雨、汇流、降雨+ 汇流)下的完全组合试验处理,对黑土坡面土壤侵蚀 发育特征进行研究。具体内容为:1)降雨,在90 mm/h 的降雨强度下,对5°、10°坡度的土槽进行连续3场降雨 处理;2)汇流,在90 mm/h(1.5 L/min)的汇流强度下, 对5°、10°坡度的土槽进行连续3场汇流处理;3)降雨+ 汇流,在90 mm/h的降雨强度和90 mm/h(1.5 L/min) 的汇流强度下,对5°、10°坡度的土槽同时进行连续3 场降雨+汇流处理。其中90 mm/h降雨强度符合东 北黑土区有代表性的侵蚀性降雨强度^[15],且连续3场 降雨、汇流及降雨+汇流条件保持一致。每场降雨/ 汇流历时 60 min,总降雨/汇流历时 180 min。每个试 验处理分别进行3次重复。

1.3 试验步骤

为方便排水并模拟耕地犁底层,在试验土槽底部铺 满天然细沙5cm,再以1.35g/cm³体积质量装填15cm 黑土,最后以1.20g/cm³体积质量再次装填20cm黑土。 土槽装填完成后,在距离土槽底部出口20cm处向上部 挖1条长、宽、深分别为100、10、5cm的细沟。

降雨试验前1d,采用30 mm/h的降雨强度进行 预降雨,至坡面刚产流为止;静置24h后进行降雨强 度或汇流强度率定,当降雨强度或汇流强度差值 <5%、降雨均匀度>85%时,揭开土槽上方塑料布 进行正式试验。坡面开始产流后,记录初始产流时 间,同时在集流口处接取径流泥沙样品,每次取样时 间间隔2 min。每场试验过程中均使用精度1 mm的 钢尺测量细沟中的径流宽和径流深及细沟的基本形 态(长、宽、深)等参数,其中细沟宽和细沟深以1 cm 步长逐一测定,每场至少测量3次。

试验结束后,称取径流泥沙样品质量,将其放置在 取样桶内静置6~8h后,倒掉上层清液,将剩余的泥沙 转移至已知质量的小碗内,并将其放置在恒温为 105℃的烘箱中烘干,称取泥沙干重,径流泥沙样品质 量和泥沙干重用于计算坡面径流量和坡面侵蚀量。

1.4 数据处理与分析

本研究中,细沟侵蚀量的计算是用各试验时段测量的细沟体积(长×宽×深)乘以土壤体积质量^[16]。

坡面径流量的计算公式为:

$$R_{\rm U} = \sum_{i=1}^{n} \frac{M_i - m_i}{\rho}$$
(1)

式中:*R*_U为坡面径流量,L;*M*_i为样品总重,g;*m*_i为泥沙 干重,g;*ρ*为水的密度;*i*为样品编号;*n*为样品数量。

坡面侵蚀量的计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^{n} m_i \tag{2}$$

式中:S为坡面侵蚀量,g;m_i为泥沙干重,g;i为样品 编号;n为样品数量。

产流率指各时段所收集的径流量与产流时间的

比值,即坡面在单位时间内的产流量。计算公式为:

$$R_{\rm r} = \frac{q}{t} \tag{3}$$

式中: R_r 为产流率,L/min;q为一定时间段内的产流 量,L;t为产流时间,min。

产沙率是指单位时间内因侵蚀产生的泥沙量。 计算公式为:

$$S_{\rm r} = \frac{S_{\rm w}}{t} \tag{4}$$

式中: S_r 为产沙率, $g/\min;S_w$ 为一定时间段内的产沙量,g;t为产沙时间,min。

降雨在降雨+汇流中对黑土区坡面径流和侵蚀 的贡献率计算公式为:

$$R_{\rm R} = \frac{R_{\rm Ri}}{R_{\rm RI}} \times 100\%$$
 (5)

$$E_{\rm R} = \frac{S_{\rm Ri}}{S_{\rm RI}} \times 100\% \tag{6}$$

式中: $R_{\rm R}$ 、 $E_{\rm R}$ 分别为降雨在降雨+汇流中对坡面径流 量、坡面侵蚀量的贡献率; $R_{\rm Ri}$ 、 $R_{\rm RI}$ 为降雨、降雨+汇 流的坡面径流量,L; $S_{\rm Ri}$ 、 $S_{\rm RI}$ 为降雨、降雨+汇流的坡 面侵蚀量,g;*i*为降雨处理的1、2、3场次。

汇流在降雨+汇流中黑土区坡面径流和侵蚀的 贡献率计算公式为:

$$R_{\rm I} = \frac{R_{\rm li}}{R_{\rm RI}} \times 100\% \tag{7}$$

$$E_{\rm I} = \frac{S_{\rm Ii}}{S_{\rm RI}} \times 100\% \tag{8}$$

式中: R_1 、 E_1 分别为汇流在降雨+汇流中对坡面径流量、坡面侵蚀量的贡献率; R_{II} 、 R_{RI} 为汇流、降雨+汇流的坡面径流量,L; S_{II} 、 S_{RI} 为汇流、降雨+汇流的坡面侵蚀量,g;i为汇流处理的1、2、3场次。

2 结果与分析

2.1 连续降雨及汇流对黑土坡面径流侵蚀特征的 影响

2.1.1 黑土坡面径流侵蚀总量变化 当坡度一定时,降雨、汇流、降雨+汇流3种不同处理下的径流量均随着入渗过程的不断推进而逐渐提高,且汇流条件的径流量增长率最大(图1a、图1c和图1e);随着坡度的增加,不同处理下的径流量分别增加50.39%、4.75%、3.37%。在坡度为5°、10°的连续模拟降雨试验中,降雨、汇流、降雨+汇流处理下的径流量从第1场到第3场分别增长17.45%、37.25%、2.01%和9.47%、41.92%、6.72%;同时,降雨条件下的径流量分别是汇流条件下的1.06、1.26倍。因此,降雨对径流量的影响明显高于汇流,且3种处理的径流量均随坡度的提升而增大。

http://stbcxb.alljournal.com.cn



注:R1-R3、I1-I3、RI1-RI3分别表示降雨、汇流、降雨+汇流的第1、2、3场模拟试验;不同小写字母表示同一坡度不同场次下的差异显著(p<0.05)。

图1 不同处理及模拟试验场次下黑土坡面径流量与侵蚀量



表1

当坡度一定时(5°、10°),降雨条件的侵蚀量随场次 的递增而逐渐降低(图1b),下降幅度分别为9.96%、 47.84%;汇流条件的侵蚀量随场次的增加均持续变大 (图1d),增长率分别为105.37%、1084.95%,降雨条 件下的侵蚀量分别是汇流条件下的2.23、3.34倍。总 体来看,随着坡度提升,不同场次侵蚀量的变化幅度也 趋于增大;10°坡度下降雨、汇流、降雨+汇流条件的侵 蚀量分别是5°坡度的7.64、5.11、1.96倍。

第2期

2.1.2 黑土坡面径流侵蚀过程变化 由表1可知, 3种处理的初始产流时间随着坡度的增加均逐渐变 早,产流时间分别缩短31.32%、33.25%、13.69%。 由图2a~图4a及图2b~图4b可知,降雨、汇流、降 雨+汇流3种处理下,产流率随着时间的变化均呈先 增加后趋于平稳的变化特征;当坡度从5°提高为10°, 其稳定产流率分别增加15.38%、11.03%、3.26%。 可见,随坡度的增加,稳定产流率增大,初始产流时 间提前,且初始产流时间随降雨次数的递增而提前。

从图 2c~图 4c 及图 2d~图 4d 的乘幂回归方程中 可以看出,降雨、汇流、降雨+汇流处理的产沙率均 与时间变化呈正相关,其回归方程的 *R*²均>0.8,建立 的幂函数方程对观测值的拟合度较高,能够较好地 模拟坡面产沙率与时间的关系;其中降雨条件下的 产沙率呈波浪式递增趋势。10°坡度下 3 种处理的产 沙率分别是 5°坡度的 5.17~8.74、1.53~8.84、2.54~ 3.31倍。综上可知,不同处理的产沙率均随时间和坡 度的增加而变大。

 Table 1
 Initial flow production time for rainfall, inflow, and

 rainfall + inflow conditions at different slopes

不同坡度下降雨、汇流、降雨+汇流条件的初始产流时间

坡度/(°)	61 TH	初始产流时间/min			
	处理	第1场	第2场	第3场	
	降雨(R)	1.20	0.88	0.73	
5	汇流(I)	2.75	2.63	2.47	
	降雨+汇流(RI)	1.25	0.75	0.75	
	降雨(R)	0.75	0.63	0.55	
10	汇流(I)	2.12	1.92	1.20	
	降雨+汇流(RI)	1.05	0.62	0.60	

2.2 降雨和汇流对黑土坡面土壤侵蚀影响的贡献

分析

由图 5a可知,不同场次降雨在降雨+汇流中对坡面 径流量和坡面侵蚀量均随降雨场次的递增而降低。由 图 5b可知,不同场次条件下汇流在降雨+汇流中对坡面 径流量的贡献率中第1场次的贡献率最大,为56.40%, 而对坡面侵蚀量的贡献率中第3场次的贡献率最大,为 87.50%。不同场次条件下降雨和汇流在降雨+汇流中 对坡面径流量贡献率均超过50%,而对坡面侵蚀量的贡 献率均超过80%。因此,降雨和汇流在降雨+汇流中对 坡面径流量、坡面侵蚀量的贡献均十分显著。

2.3 径流侵蚀量与坡度、不同处理的交互作用分析

分别对坡面径流量(*R*_U)、侵蚀量(*S*)与降雨汇流处 理(RI)、坡度(SL)及坡度-降雨汇流处理的交互作用 (*I*_{SLRI})进行相关性分析见表2。



图 2 连续降雨条件下坡面产流率和产沙率随降雨时间的变化

Fig. 2 Variation of slope flow production rate and sand production rate with rainfall duration under continuous rainfall conditions







由表2可知,R_U、S与RI、I_{SLRI}均呈极显著相关,但 与SL的相关性并不显著。通过方差分析可知,RI对 R_U、S的影响极显著,SL对R_U、S的影响较显著,但 I_{SLRI}对R_U、S没有显著性影响;坡面径流量和侵蚀量 与坡度、降雨汇流处理及二者交互作用因子相关差 异系数表现为f(RI)>f(SL)>f(I_{SLRI})。 线性回归拟合可得方程(9)和(10),引入交互作用后 通过非线性拟合可得方程(11)和(12)。对比可得, 坡面径流量的线性拟合较为准确,而坡面侵蚀量的 非线性拟合较为准确。由此可知,交互作用对于径 流量及侵蚀量的影响虽不显著,但对于二者仍有一 定的影响,并且对侵蚀量的影响大于对径流量的 影响。

经过对坡面径流量及侵蚀量进行无交互作用的

http://stbcxb.alljournal.com.cn







图5 不同场次降雨、汇流对坡面径流侵蚀的贡献率



Fable 2	Correlation analysis and an	alysis of variance	(ANOVA) of	runoff erosion wi	ith slope, rainfall	catchment t	reatment
	and its interaction term						

指标	统计参数	坡度(SL)	降雨汇流处理(RI)	坡度×降雨汇流处理(I _{SLRI})
	差异性f	5.835^{*}	266.160***	1.560
坡面径流量($R_{\rm U}$)	差异性p	0.033	< 0.001	0.250
	相关性r	0.103	0.978***	0.739***
	相关性p	0.685	< 0.001	< 0.001
	差异性f	9.987**	37.859***	3.161
₩五 月 畑县(C)	差异性p	0.008	< 0.001	0.079
收回 (公里(3)	相关性r	0.310	0.849***	0.831***
	相关性p	0.211	< 0.001	<0.001

注:*表示在p<0.05水平上显著相关;**表示在p<0.01水平上较显著相关;***表示在p<0.001水平上极显著相关。

 $R^2 = 0.879$

$R_{\rm u} = 1.741 \text{SL} + 6.395 \text{RI} + 44.983 \ R^2 = 0.967 \ (9)$ =108 427 SI $\pm 114 647$ BI $- 923 905 R^{2} = 0.817(10)$

$$S = 108.427 \text{SL} + 114.647 \text{RI} - 923.905 \ R^2 = 0.817(10)$$

$$R = 45.525 \text{SL}^{0.125} \text{PI}^{0.372} \qquad R^2 = 0.902 \qquad (11)$$

$$R_{\rm U} = 45.525 {\rm SL}^{\rm outs} {\rm RI}^{\rm outs} \qquad R^2 = 0.902 \qquad (11)$$

 $S = 6.745 \text{SL}^{1.007} \text{RI}^{1.270}$

由图6可知,5°坡度下,降雨、汇流、降雨+汇流3

2.4 细沟侵蚀特征分析

种处理的细沟侵蚀量分别为140.02、67.11、1331.77g, 各占坡面侵蚀量的 79.77%、85.45%、37.69%;10°坡度

13

http://stbcxb.alljournal.com.cn

(12)

下,不同处理的细沟侵蚀量分别为847.79、363.79、 3737.55g,各占坡面侵蚀量的63.19%、90.65%、 53.99%。10°坡度下的细沟侵蚀量分别是5°坡度的 6.05、5.42、2.81倍。因此,当坡度一定时,不同处理下 细沟侵蚀量的比重大小为汇流>降雨>降雨+汇 流;当坡度增加时,不同处理的细沟侵蚀量均增加。



图 6 5°、10°坡度下不同处理的细沟侵蚀特征的影响

Fig. 6 Effect of different treatments on rill erosion characteristics at 5° and 10° slopes

3 讨论

3.1 连续降雨及汇流与坡度交互条件下坡面径流侵 蚀特征分析

不同处理下径流量均随着场次增加而逐渐提 高,其原因是随着时间延长,土壤体积分数增加,逐 渐达到饱和状态,导致径流量增加^[17]。其中汇流条 件径流量的增长率最大,是因为汇流所产生的水流 迅速聚集在细沟内,大量减少其与坡面的接触面积, 进而减少蒸发量和入渗量。降雨对径流量的影响均 大于汇流条件,是由于降雨过程中雨滴打击破坏土 壤结构,堵塞孔隙,坡面入渗率降低,径流量增大[18]; 且降雨对坡面土壤侵蚀量的影响也大于汇流条件, 与姜义亮等^[19]的试验中雨强(汇流速率)由50 mm/h 增加至100 mm/h时的研究结果一致,其原因是本试 验供试土壤为黑土,由于黑土黏性大,所以仅有汇流冲 刷时,随着时间的延长,使坡面表层粗糙化,表层细颗 粒被汇流所产生的径流冲走,粗颗粒逐渐富集,汇流过 程的侵蚀量降低,而在降雨过程中,雨滴打击土壤表层 破坏土壤结构,击碎土壤大颗粒,使表层土壤粗糙度变 大,增大降雨过程中的侵蚀量^[20]。

产流率随着降雨(汇流)历时的变化呈先增加后 趋于平稳趋势。随着降雨(汇流)场次的递增,初始 产流时间提前,产流率变化不明显,但产流过程中产 流率呈不同阶段的变化,与TAO等^[21]的研究结果相 似。即在降雨、汇流、降雨+汇流初期,土壤体积分 数迅速增大,导致土壤入渗能力显著下降,当土壤含 水率达到饱和时,入渗率趋于稳定,产流率也趋于平 衡。当坡度一定时,初始产流时间随场次增加而提 前,与王子吟等^[22]进行连续4场降雨处理时的初始产 流时间变化结果一致。初始产流时间从降雨开始到 集流口处开始接到径流样品所消耗的时间,由于场 次增加,土壤入渗能力下降,坡面产流能力提高,因 此,与前1场相比,初始产流时间缩短。降雨条件下 的产沙率随降雨历时的增加呈波浪式增加,与崔钦 凯等^[23]的研究结果相似。主要由于随着降雨历时的 延续,细沟持续遭受水流冲刷与浸泡,细沟沟岸不定 时坍塌,使产沙率增长不平稳。

随着坡度的增加,坡面径流量、侵蚀量及稳定产 流率、产沙率均增加,坡面的初始产流时间也随之提 前。由于坡度增大使得坡面水流流速增大,径流入 渗速率减小^[17],使水分入渗深度减小,流入集流口的 水流增多,因此,坡面径流量、稳定产流率均增加。 随着坡度的增加,地表径流增大,有利于坡面土壤的 冲刷,使坡面侵蚀物质被及时带走^[24],增加坡面侵蚀 量和产沙率。也有研究^[25-26]表明,坡度越大,初始产 流时间越小。分析其原因,在相同坡长的情况下,坡 度越陡水流受到的重力越大,因此,初始产流时间也 越短,在本试验中也能得到验证。

3.2 细沟侵蚀特征分析

本研究表明,不同处理下对细沟侵蚀特征的影 响大小为汇流>降雨>降雨+汇流。汇流条件下, 细沟侵蚀占比均超过85%,是因为随时间推移,坡面 径流迅速汇聚并通过沟头流入细沟,水流的一部分 势能转化为冲刷土壤的动能,也提高水流搬运土壤 的能力,导致沟头处的径流流量及流速增大,增加水 流的输沙能力,细沟两侧坡面径流流量及流速减小, 加剧沟头溯源侵蚀,使细沟侵蚀量占比增大^[27-28];在 降雨条件下,随着降雨历时的增加,细沟深的增加速 率增大^[29],细沟侵蚀占比均>60%,但由于地表径流 在坡面分布较为均匀,径流在细沟两侧既沿沟岸流 人沟内,又沿坡面向下流动,因此,细沟内的径流量 及流速相对汇流条件较小,降雨条件下的细沟侵蚀 占比小于汇流;而降雨+汇流条件下,细沟侵蚀占比 未达到50%,是因为总水量增多使细沟两侧坡面、沟 头上方坡面片蚀量和细沟侵蚀量均增加,但其对细 沟两侧坡面、沟头上方坡面径流剪切力和水流流速 的影响大于细沟,使坡面片蚀占主导地位^[30],最终导 致细沟侵蚀量的占比在3种处理方式中最小。

4 结论

1)随着坡度的增加,径流量和侵蚀量均趋于增加。 不同处理的产流率随着时间变化均呈先增加后趋于平 稳的变化特征,而初始产流时间和产沙率均与时间变 化呈正相关。说明在东北黑土区防治降雨、汇流、降 雨+汇流对坡面土壤侵蚀的影响尤为重要。

2)连续降雨条件下坡面径流量和坡面侵蚀量的 贡献率均随降雨次数的递增不断降低;连续汇流条件 下坡面径流量的贡献率中第1场次最大,而坡面侵蚀 量的贡献率中第3场次最大。说明降雨第1场次和汇 流第3场次是黑土区防治坡面土壤径流侵蚀的关键。

3)相关性分析发现,坡面径流量和侵蚀量与降 雨汇流处理、坡度-降雨汇流处理的交互作用均呈极 显著相关;方差分析发现,降雨汇流处理对坡面径流 量和侵蚀量的影响极显著,坡度对坡面径流量和侵 蚀量的影响较显著。

4)当坡度为5°时,细沟侵蚀量占坡面侵蚀量的 37.69%~85.45%,当坡度为10°时,细沟侵蚀量占坡面 侵蚀量的53.99%~90.65%。细沟侵蚀量占比随坡度 的增加而逐渐增加,表明坡度越大细沟侵蚀越严重。 研究结果可为东北黑土坡面侵蚀治理提供科学依据。

参考文献:

- [1] 韩晓增,邹文秀.东北黑土地保护利用研究足迹与科技研发展望[J].土壤学报,2021,58(6):1341-1358.
 HAN X Z, ZOU W X. Research perspectives and footprint of utilization and protection of black soil in Northeast China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1341-1358.
- [2] 温磊磊,王教河,任明,等.东北黑土区水土流失综合治 理成效[J].中国水土保持,2021(6):4-7.
 WENLL, WANGJH, RENM, et al. Effect of comprehensive control of soil and water loss in black soil area of Northeast China [J]. Soil and Water Conservation in China,2021(6):4-7.
- [3] KOPYŚĆ P T. Analysis of erosion rill development under rainfall events using structure-from-motion photogrammetry: A case study from Kielce (Holy Cross Mts., Poland) [J].Journal of Mountain Science, 2022, 19(5):

1231-1244.

 [4] 吴淑芳,刘勃洋,雷琪,等.基于三维重建技术的坡面细 沟侵蚀演变过程研究[J].农业工程学报,2019,35(9): 114-120.

WU S F, LIU B Y, LEI Q, et al. Evolution process of slope rill erosion based on 3D photo reconstruction technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(9):114-120.

- [5] WANG X, ZHAO X L, ZHANG Z X, et al. Assessment of soil erosion change and its relationships with land use/cover change in China from the end of the 1980s to 2010[J].Catena, 2016, 137:256-268.
- [6] HE J J, SUN L Y, GONG H L, et al. Laboratory studies on the influence of rainfall pattern on rill erosion and its runoff and sediment characteristics [J]. Land Degradation and Development, 2017, 28(5):1615-1625.
- [7] 裴冠博,龚冬琴,付兴涛.晋西黄绵土坡面细沟形态及其 对产流产沙的影响[J].水土保持学报,2017,31(6): 79-84.

PEI G B, GONG D Q, FU X T. Rill morphology and its effect on runoff and sediment yield on loessal soil slope in western Shanxi Province[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6):79-84.

- [8] 张光辉,杨扬,刘瑛娜,等.东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J].水土保持学报,2022,36(2):1-12. ZHANG G H, YANG Y, LIU Y N, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of Northeast China[J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(2):1-12.
- [9] 司英凡,俞琳琳,朱家润.不同水土保持措施下径流小区 产流产沙与降雨关系研究[J].中国水土保持,2023 (11):39-42.

SI Y F, YU L L, ZHU J R. Relationship between rainfall and runoff and sediment in runoff plots with different soil and water conservation measures [J]. Soil and Water Conservation in China, 2023(11): 39-42.

- [10] 王鹏飞,郑子成,张锡洲,等.玉米季横垄坡面细沟侵蚀 特征及其影响因素[J].土壤学报,2016,53(4):869-880.
 WANG PF, ZHENG ZC, ZHANG XZ, et al. Characteristics and influencing factors of rill erosion in slope land with contour ridges during maize growing season[J].Acta Pedologica Sinica,2016,53(4):869-880.
- [11] 李熙,刘强,江世雄,等.典型红壤区输变电工程堆积体边 坡细沟侵蚀特征[J].长江科学院院报,2023,40(9):61-67.
 LI X, LIU Q, JIANG S X, et al. Characteristics of rill erosion of deposit slope formed by power transmission project in a typical red soil region in China[J].Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40 (9):61-67.

[12] MIAO C Y, ASHOURI H, HSU K L, et al. Evaluation alljournal.com.cn

of the PERSIANN-CDR daily rainfall estimates in capturing the behavior of extreme precipitation events over China [J]. Journal of Hydrometeorology, 2015, 16(3): 1387-1396.

- [13] SHEN H O, WEN L L, HE Y F, et al. Rainfall and inflow effects on soil erosion for hillslopes dominated by sheet erosion or rill erosion in the Chinese mollisol region [J].Journal of Mountain Science, 2018, 15(10):2182-2191.
- [14] 刘殿民,沈海鸥,武佳龙,等.黑土坡面垄侧少耕措施的 土壤侵蚀特征分析[J].水土保持学报,2022,36(4):1-6.
 LIU D M, SHEN H O, WU J L, et al. Analysis of soil erosion characteristics of half-ridge less tillage measure on the black soil hillslope[J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(4):1-6.
- [15] 沈海鸥,刘健,王宇,等.降雨强度和坡度对黑土区土质 道路路面侵蚀特征的影响[J].水土保持学报,2017,31
 (6):123-126.
 SHEN H O, LIU J, WANG Y, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on soil erosion characteristics

of farmland unpaved road in black soil region [J].Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6):123-126.

[16] 耿华杰,郑粉莉,赵录友,等.降雨、汇流和坡度对黑土浅 沟坡面侵蚀影响的试验研究[J].水土保持学报,2024, 38(2):57-67.

GENG H J, ZHENG F L, ZHAO L Y, et al. An experimental study on effects of rainfall, inflow and slope gradient on ephemeral gully slope erosion in Chinese mollisol region[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2):57-67.

[17] 康宏亮,王文龙,薛智德,等.冲刷条件下黄土丘陵区浅 沟侵蚀形态及产流产沙特征[J].农业工程学报,2016, 32(20):161-170.

KANG H L, WANG W L, XUE Z D, et al. Erosion morphology and runoff generation and sediment yield on ephemeral gully in Loess Hilly Region in field scouring experiment [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (20): 161-170.

- [18] 娄义宝,史东梅,江娜,等.土壤侵蚀对坡耕地土壤水分及入渗特性影响[J].土壤学报,2020,57(6):1399-1410.
 LOU Y B, SHI D M, JIANG N, et al. Effects of soil erosion on soil moisture and infiltration characteristics of slope farmland[J].Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(6): 1399-1410.
- [19] 姜义亮,郑粉莉,温磊磊,等.降雨和汇流对黑土区坡面 土壤侵蚀的影响试验研究[J].生态学报,2017,37(24): 8207-8215.

JIANG Y L, ZHENG F L, WEN L L, et al. An experimental study on the impacts of rainfall and inflow on hillslope soil erosion in typical black soil regions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(24):8207-8215.

- [20] LIAO Y S, YUAN Z J, ZHUO M N, et al. Coupling effects of erosion and surface roughness on colluvial deposits under continuous rainfall [J]. Soil and Tillage Research, 2019, 191:98-107.
- [21] TAO W H, WU J H, WANG Q J. Mathematical model of sediment and solute transport along slope land in different rainfall pattern conditions [J]. Scientific Reports, 2017,7:e44082.
- [22] 王子吟,魏育超,李镇,等.连续降雨条件下工程堆积体 产流产沙对砾石含量的响应[J].水土保持通报,2024, 44(2):91-100.
 WANG Z Y, WEI Y C, LI Z, et al. Response of runoff and sediment yield to gravel content in engineered deposit slopes under continuous rainfall conditions[J].Bulletin of
- Soil and Water Conservation, 2024, 44(2):91-100. [23] 崔钦凯,刘俊娥,陈浩,等.草被覆盖、雨强和坡度对黄土 坡面径流含沙量的影响[J].水土保持学报, 2023, 37 (5):40-47.

CUI Q K, LIU J E, CHEN H, et al. Influence of grass coverage, rain intensity and slope on sediment concentration of runoff on loess slope[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5):40-47.

[24] 王照润,高建恩,周凡凡,等.坡度对降雨径流挟沙能力 影响的模拟试验[J].水土保持学报,2023,37(1): 97-102.

WANG Z R, GAO J E, ZHOU F F, et al. Simulation experimental study on the impact of slope gradients on sediment carrying capacity of rainfall runoff[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1):97-102.

[25] 陈泽勋,吴英杰,王文君,等.不同放牧条件下坡面初始 产流时间和径流流速变化特征[J].水土保持研究, 2023,30(3):62-68.

CHEN Z X, WU Y J, WANG W J, et al. Characteristics of initial yield time and velocity of runoff under different grazing conditions [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3):62-68.

[26] 陆淑宁,张泽瑜,李荣融,等.等高耕作对不同坡度坡面 土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2023,37(2): 37-44.

LU S N, ZHANG Z Y, LI R R, et al. Effects of contour tillage on soil erosion process in different slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2): 37-44.

[27] 厉晓峰,黄钰涵,孟书翰,等.黄绵土坡面细沟侵蚀剥蚀 能力试验[J].水土保持学报,2023,37(1):84-89.
LIXF, HUANGYH, MENGSH, et al. Laboratory study of detachment capacity under rill erosion on the loess slope[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(1):84-89.

- [17] FAN C H, ZHAO L S, HOU R, et al. Quantitative analysis of rainwater redistribution and soil loss at the surface and belowground on karst slopes at the microplot scale[J].Catena, 2023, 227:e107113.
- [18] AO L M, XU Q X, ZHOU Y C, et al. Rock surface flow accelerates rill erosion of excavated slopes in karst mining areas[J].Catena, 2024, 236:e107739.
- [19] CHEN H, ZHANG X P, ABLA M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2018, 170:141-149.
- [20] DUNKERLEY D. Rain event properties in nature and in rainfall simulation experiments: A comparative review with recommendations for increasingly systematic study and reporting[J].Hydrological Processes, 2008, 22(22): 4415-4435.
- [21] AN J, ZHANG Y Q, WANG Y Y. Rainstorm pattern effects on the size distribution of soil aggregate in eroded sediment within contour ridge systems [J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(4): 2192-2206.
- [22] YAN Y J, DAI Q H, YUAN Y F, et al. Effects of rainfall intensity on runoff and sediment yields on bare slopes in a karst area, SW China[J].Geoderma,2018,330:30-40.
- [23] ZHOU H, GAN F L, DAI Q H, et al. Migration of dissolved carbon on bare karst slopes in soil in response to natural rainfall events[J].Geoderma, 2023, 436:e116527.
- [24] LIANG Y, GAO G Y, LIU J B, et al. Runoff and soil loss responses of restoration vegetation under natural rainfall patterns in the Loess Plateau of China: The role of rainfall intensity fluctuation[J].Catena, 2023, 225:e107013.
- [25]何江湖,张科利.西南喀斯特地区地下水土流失研究综述[J].泥沙研究,2022,47(5):66-73.
 HE J H, ZHANG K L. A review of underground soil loss in karst area of the southwest China[J]. Journal of Sediment Research,2022,47(5):66-73.
- [26] 李晋,熊康宁,王仙攀.喀斯特地区小流域地下水土流失观测研究[J].中国水土保持,2012(6):38-40.
 LIJ, XIONG K N, WANG X P. Observation of subter-

(上接第20页)

[28] 刘冉,余新晓,蔡强国,等.坡长对坡面侵蚀、搬运、沉积 过程影响的研究进展[J].中国水土保持科学(中英文), 2020,18(6):140-146.

LIU R, YU X X, CAI Q G, et al. Research progressin the effect of slope length on slope erosion transportation and deposition processes [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(6):140-146.

[29]姚怡航,张展,李永红,等.基于无人机贴近摄影测量的 坡面细沟侵蚀及形态演化研究[J].水土保持通报, ranean soil and water loss of karst area[J].Soil and Water Conservation in China, 2012(6):38-40.

- [27] WANG S, FU Z Y, CHEN H S, et al. Mechanisms of surface and subsurface runoff generation in subtropical soil-epikarst systems: Implications of rainfall simulation experiments on karst slope [J]. Journal of Hydrology, 2020,580:e124370.
- [28] ZHANG M J, ZHANG W, ZHANG K L, et al. Centennial scale temporal responses of soil magnetic susceptibility and spatial variation to human cultivation on hillslopes in northeast China [J]. Soil and Tillage Research, 2023, 234:e105865.
- [29] 高鹏宇, 詹振芝, 蒋芳市, 等. 坡度和流量对崩积体坡面 细沟水流输沙能力的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32 (3):68-73.

GAO P Y, ZHAN Z Z, JIANG F S, et al. Effects of slop and flow on sediment transport capacity of the colluvial deposit for rill flow in Benggang [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(3):68-73.

- [30] PENG X D, DAI Q H. Drivers of soil erosion and subsurface loss by soil leakage during karst rocky desertification in SW China[J].International Soil and Water Conservation Research, 2022, 10(2):217-227.
- [31] SOHRT J, RIES F, SAUTER M, et al. Significance of preferential flow at the rock soil interface in a semi-arid karst environment[J].Catena,2014,123:1-10.
- [32] ZHOU J, FU B J, GAO G Y, et al. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semiarid environment in the Loess Plateau, China[J].Catena, 2016,137:1-11.
- [33] HE S J, WANG Z L, WANG D G, et al. Spatiotemporal variability of event-based rainstorm: The perspective of rainfall pattern and concentration[J].International Journal of Climatology, 2022, 42(12):6258-6276.
- [34] WESTRA S, FOWLER H J, EVANS J P, et al. Future changes to the intensity and frequency of shortduration extreme rainfall [J]. Reviews of Geophysics, 2014,52(3):522-555.

2023,43(6):142-147.

YAO Y H, ZHANG Z, LI Y H, et al. Slope rill erosion and morphological evolution based on UAV nap-of-theobject photogrammetry [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6):142-147.

[30] XU X M, ZHENG F L, WILSON G V. Flow hydraulics in an ephemeral gully system under different slope gradients, rainfall intensities and inflow conditions [J]. Catena,2021,203:e105359.