

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($p < 0.001$); 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)02-0001-10

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, Jilin 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, Jilin 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): 2024-00-00

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

http://stbxb.alljournal.com.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

Online(www.cnki.net): 2024-00-00

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率也迅速变大;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。综上所述可知,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。

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(125°21'E, 43°52'N)人工模拟降雨大厅内进行。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5 cm,再以1.35 g/cm³体积质量装填15 cm黑土,最后以1.20 g/cm³体积质量再次装填20 cm黑土。土槽装填完成后,在距离土槽底部出口20 cm处向上部挖1条长、宽、深分别为100、10、5 cm的细沟。

降雨试验前1 d,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24 h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6~8 h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:

$$R_U = \sum_{i=1}^n \frac{M_i - m_i}{\rho} \quad (1)$$

式中: R_U 为坡面径流量,kg; 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:

$$S = \sum_{i=1}^n m_i \quad (2)$$

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:

$$R_r = \frac{q}{t} \quad (3)$$

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:

$$S_r = \frac{S_w}{t} \quad (4)$$

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 为产流时间,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:

$$R_R = \frac{R_{Ri}}{R_{Rl}} \times 100\% \quad (5)$$

$$E_R = \frac{S_{Ri}}{S_{Rl}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: R_R 、 E_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_{Ri} 、 R_{Rl} 为降雨、降雨+汇流的坡面径流量,L; S_{Ri} 、 S_{Rl} 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:

$$R_I = \frac{R_{Ii}}{R_{Rl}} \times 100\% \quad (7)$$

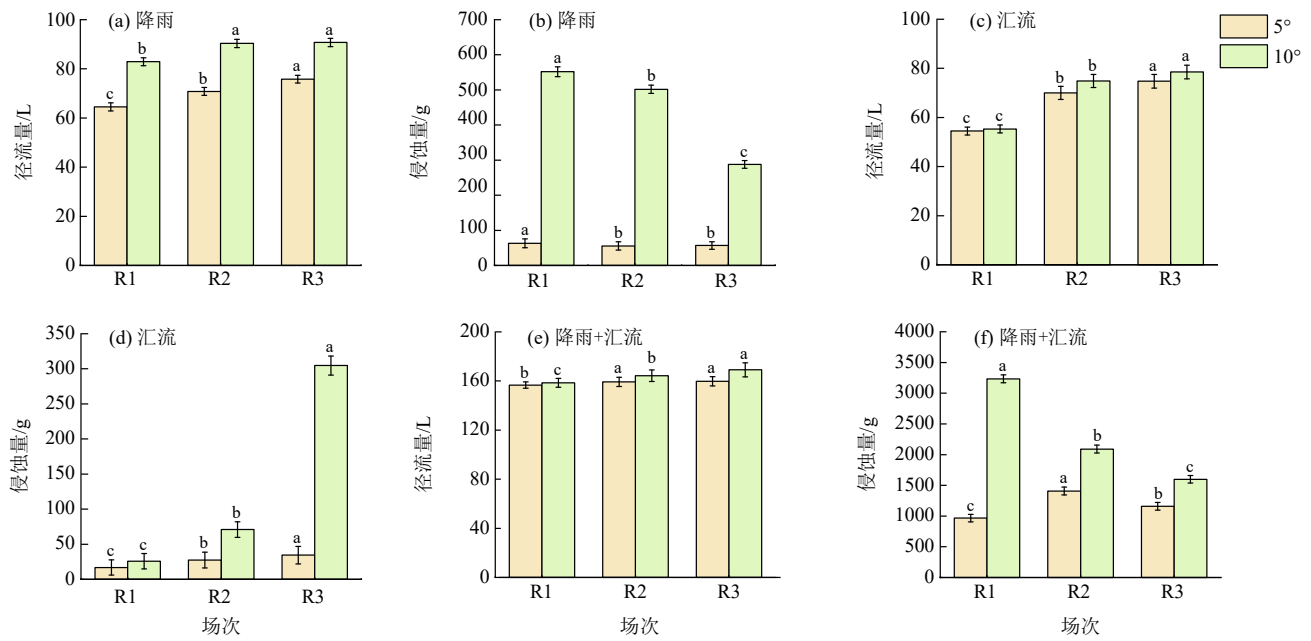
$$E_I = \frac{S_{Ii}}{S_{Rl}} \times 100\% \quad (8)$$

式中: R_I 、 E_I 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_{Rl} 为汇流、降雨+汇流的坡面径流量,L; S_{Ii} 、 S_{Rl} 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。



注:图中R1-R3、I1-I3、RI1-RI3分别代表降雨、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

Fig. 1 Runoff volume and erosion volume on black soil slopes under different treatments and simulated test sites

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。

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~4a及图2b~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~4c及图2d~4d的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。

表1 不同坡下降雨、汇流、降雨+汇流条件的初始产流时间

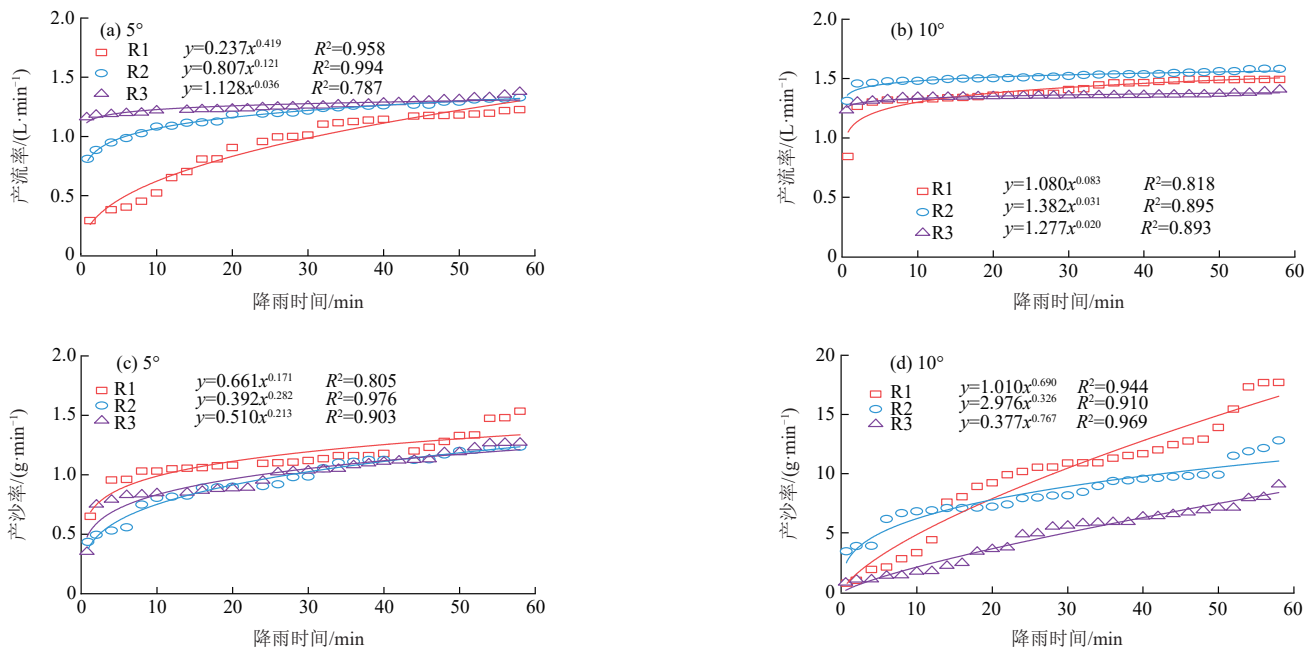
Table 1 Initial flow production time for rainfall, inflow, and rainfall + inflow conditions at different slopes		min		
坡度/ $(^{\circ})$	处理	第1场	第2场	第3场
5	降雨(R)	1.20	0.88	0.73
	汇流(I)	2.75	2.63	2.47
	降雨+汇流(RI)	1.25	0.75	0.75
10	降雨(R)	0.75	0.63	0.55
	汇流(I)	2.12	1.92	1.20
	降雨+汇流(RI)	1.05	0.62	0.60

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_V)、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($I_{SL,RI}$)进行相关性分析见表2。



注:图中R1、R2、R3分别代表降雨第1、2、3场模拟试验。下同。

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

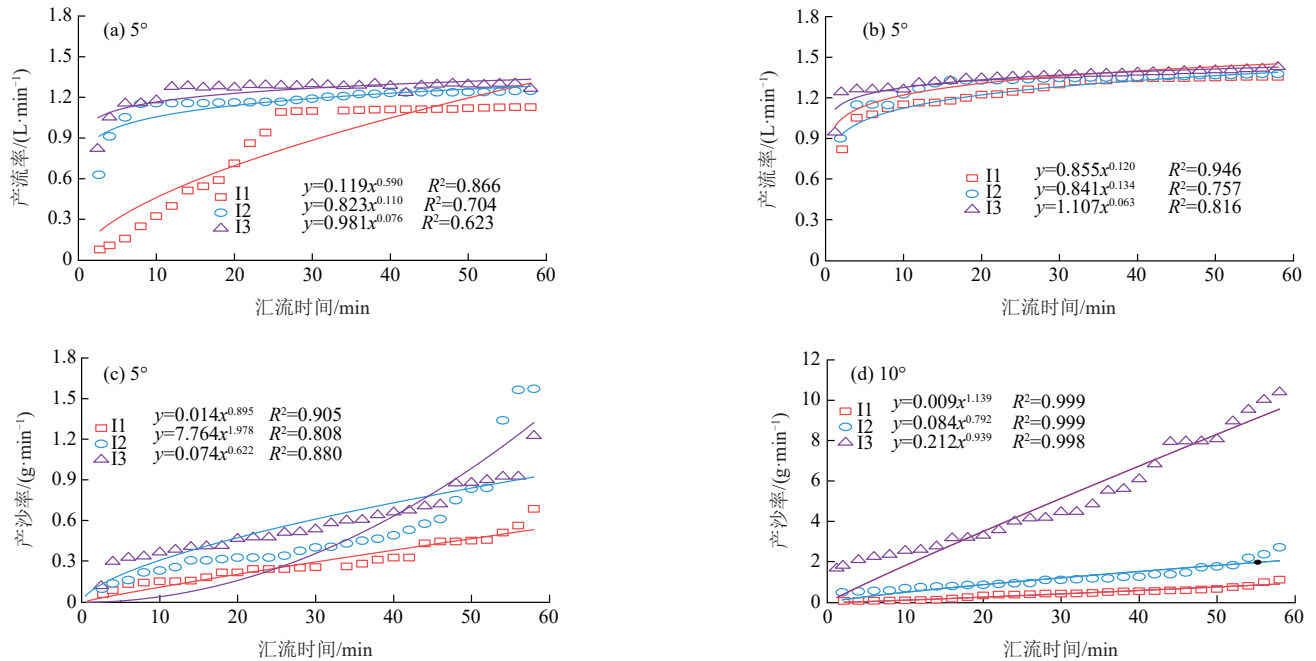


图 3 连续汇流条件的坡面产流率和产沙率随汇流时间的变化

Fig. 3 Changes in slope flow production rates and sand production rates with time of inflow for continuous inflow 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 $f(RI) > f(SL) > f(I_{SLRI})$ 。

经过对坡面径流量及侵蚀量进行无交互作用的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。

$$R_U = 1.741SL + 6.395RI + 44.983 \quad R^2 = 0.967 \quad (9)$$

$$S = 108.427SL + 114.647RI - 923.905 \quad R^2 = 0.817$$

$$(10)$$

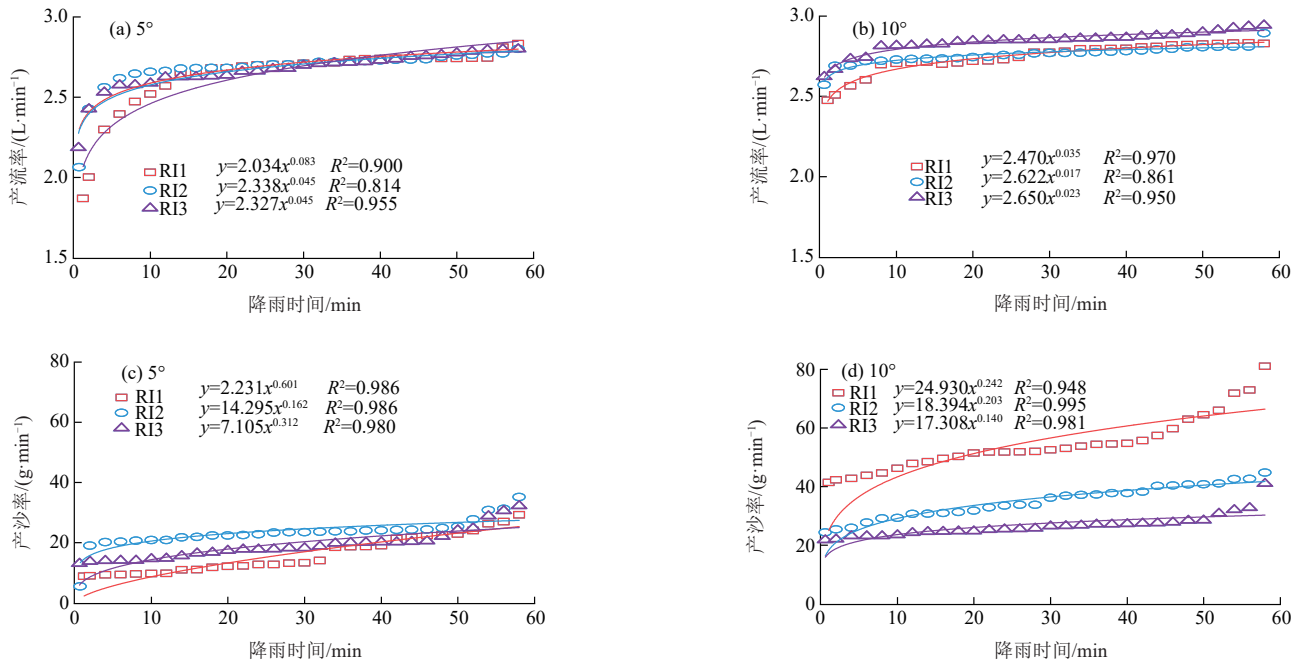
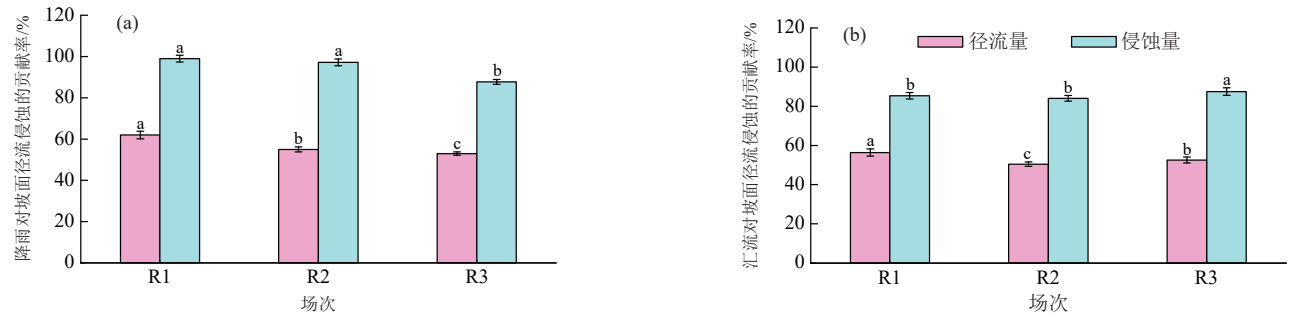


图 4 连续降雨+汇流条件的坡面产流率和产沙率随降雨时间的变化

Fig. 4 Changes in slope flow production rates and sand production rates with rainfall duration for continuous rainfall + inflow conditions



注:图(a)表示连续降雨在降雨+汇流中对坡面径流量和坡面侵蚀量的贡献率;图(b)表示连续汇流在降雨+汇流中对坡面径流量和坡面侵蚀量的贡献率;图中R1~R3和I1~I3分别代表相关降雨和汇流的第1,2,3场模拟试验;不同小写字母表示同一处理不同场次差异显著($p < 0.05$)。

图 5 不同场次降雨、汇流对坡面径流侵蚀的贡献率

Fig. 5 The contribution rate of rainfall and inflow to slope runoff erosion under different field conditions

表 2 径流侵蚀量与坡度、降雨汇流处理及其交互项的相关性分析与方差分析

Table 2 Correlation analysis and analysis of variance (ANOVA) of runoff erosion with slope, rainfall catchment treatment 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})
坡面径流量(R_U)	差异性 f	5.835*	266.160***	1.560
	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
坡面侵蚀量(S)	差异性 f	9.987**	37.859***	3.161
	差异性 p	0.008	<0.001	0.079
	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。

$$R_U = 45.525SL^{0.125}RI^{0.372} \quad R^2 = 0.902 \quad (11)$$

$$S = 6.745SL^{1.007}RI^{1.270} \quad R^2 = 0.879 \quad (12)$$

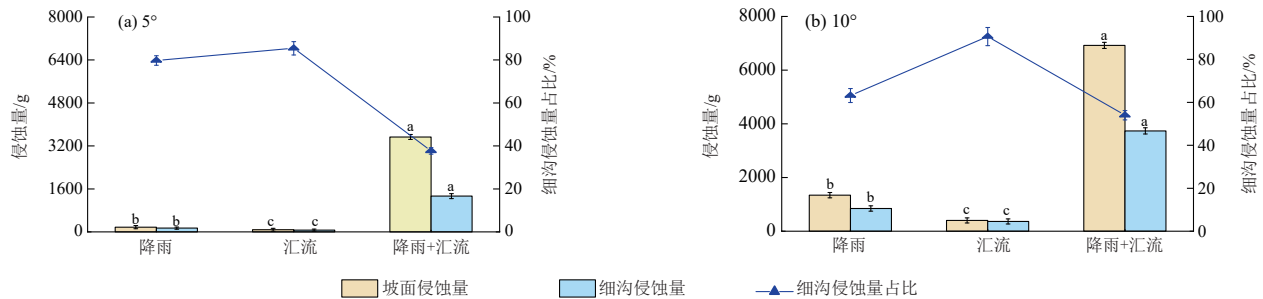
2.4 细沟侵蚀特征分析

由图 6 可知, 5° 坡度下, 降雨、汇流、降雨+汇流 3

种处理的细沟侵蚀量分别为 140.02、67.11、1 331.77 g, 各占坡面侵蚀量的 79.77%、85.45%、37.69%; 10° 坡度下, 不同处理的细沟侵蚀量分别为 847.79、363.79、3 737.55 g, 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。



注:不同小写字母表示同一坡度不同处理下的差异显著($p < 0.05$)。

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,导致坡面入渗率降低,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,其原因是由于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,导致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场降雨处理下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出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场对比,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]的研究中,随降雨延续,产沙率出现“多峰多谷”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,导致细沟沟岸不定坍塌,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,导致径流入渗速率减小^[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,随降雨历时的增加,细沟深的增加速率增大^[29],导致细沟侵蚀占比均>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入沟内,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展展望[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.
WEN L L, WANG J H, REN M, 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 P F, ZHENG Z C, ZHANG X Z, 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

- 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, 沈海鹰, 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] 沈海鹰, 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] 娄宏宝, 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.
- LI X F, HUANG Y H, MENG S H, 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.
- [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 progress in 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*, 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-the-object 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.