DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.02.004
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 Huajie, ZHENG Fenli, ZHAO Luyou, 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.

降雨、汇流和坡度对黑土浅沟坡面侵蚀影响的试验研究

耿华杰[1]，郑粉莉[1,2]，赵录友[2]，王 伦[1]，赵 婷[1]，秦琪珊[1]，安小兵[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)

摘　要:[**目的**]为研究降雨、汇流和坡度对浅沟侵蚀的影响,实施精确的水土保持措施。[**方法**]通过室内模拟降雨和汇流试验,设计 2 个降雨强度(50,100 mm/h)和 2 个坡度(3°,7°),并在 4 种降雨强度和坡度组合下设置 5 个依次增加的汇流强度(15,30,45,60,75 L/min),分析降雨、汇流和坡度及其交互作用对浅沟坡面侵蚀的影响,明确浅沟侵蚀对坡面侵蚀的贡献。[**结果**](1)坡度和汇流强度对浅沟坡面侵蚀的影响均大于降雨强度。当降雨强度由 50 mm/h 增加到 100 mm/h 时,3°和 7°对应的坡面侵蚀量分别增加52.3%～81.8%和 29.4%～88.4%;而当坡度从 3°增大到 7°,50,100 mm/h 降雨强度对应的坡面侵蚀量分别增加 114.3%～395.5%和 130.0%～320.9%;当汇流强度由 15 L/min 增加至 75 L/min,坡面侵蚀量增加 4.6～13.5 倍。同时,汇流强度的增加加剧坡度对坡面侵蚀的作用,而减弱降雨强度对坡面侵蚀的影响。(2)降雨、汇流、坡度双因子和三因子交互作用对浅沟坡面侵蚀的影响以汇流强度—坡度交互作用和降雨强度—汇流强度—坡度三者的交互作用的影响最大,其次为降雨强度—汇流强度交互作用,而以降雨强度—坡度的交互作用的影响最小。(3)不同试验条件下,浅沟侵蚀量占坡面侵蚀量的比例平均在 85%以上,且其比例随汇流强度和坡度的增加呈增大趋势。(4)坡面侵蚀速率与水流流速、径流剪切力和水流功率之间均表现为极显著正相关,与阻力系数之间呈显著负相关;且坡面侵蚀速率与水流功率相关关系最优。[**结论**]研究结果为基于侵蚀动力因子和地形因子及其交互作用的浅沟侵蚀预测模型开发、浅沟侵蚀贡献分离和浅沟侵蚀机理研究提供了科学依据。

关键词: 浅沟侵蚀; 降雨强度; 汇流; 坡度; 东北黑土区
中图分类号:S157.1　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1009-2242-(2024)01-0057-11

An Experimental Study on Effects of Rainfall, Inflow and Slope Gradient on Ephemeral Gully Slope Erosion in Chinese Mollisol Region

GENG Huajie[1], ZHENG Fenli[1,2], ZHAO Luyou[2], WANG Lun[1], ZHAO Ting[1], QIN Qishan[1], AN Xiaobing[1]
(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. *Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: [**Objective**] In order to investigate the effects of rainfall intensity, inflow rate and slope gradient on hillslope ephemeral gully erosion and implement precise soil and water conservation measures. [**Methods**] This research established two rainfall intensities (50 and 100 mm/h) and two slope gradients (3° and 7°), and five inflow rates under four combinations of two rainfall intensities and two slope gradients to assess the influences of rainfall intensity, inflow rate, slope gradient and their interaction on slope soil erosion with ephemeral gully, and to quantify the contribution of ephemeral gully erosion to slope erosion. [**Results**] (1) The impact of slope gradient and inflow rate on slope soil erosion was greater than that of rainfall

收稿日期:2023-06-08　**修回日期:**2023-08-10　**录用日期:**2023-08-31　**网络首发日期(**www.cnki.net**):**2024-01-08
资助项目:国家自然科学基金面上项目(42177326)
第一作者:耿华杰(1997—),男,在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 664420423@qq.com
通信作者:郑粉莉(1960—),女,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

intensity. Under the five inflow rates, when the rainfall intensity increased from 50 mm/h to 100 mm/h, the slope erosion on the slopes of 3° and 7° increased by 52.3%～81.8% and 29.4%～88.4%, respectively; when the slope gradient increased from 3° to 7°, the slope erosion increased by 114.3%～395.5% and 130.0%～320.9%, respectively; when the inflow rate increased from 15 L/min to 75 L/min, the slope erosion increased by 4.6～13.5 times. The increase of inflow rate aggravated slope gradient influence on slope erosion while weakened rainfall intensity impacts on slope erosion. (2) The combined effects of rainfall intensity, inflow rate, and slope gradient, and inflow rate-slope gradient interactions on slope erosion were the larger impact, followed by the rainfall intensity-inflow rate interaction, and the interplay between rainfall intensity and slope gradient had the lowest impact. Ephemeral gully erosion accounted for over 85% of total slope erosion under various experimental conditions, which increased with inflow rate and slope gradient. (4) The slope erosion rates a positive correlation existed with the flow velocity, shear stress and stream power. Conversely, a negative correlation was observed with the friction coefficient. Among the parameters, the correlation between slope erosion rate and stream power was best. [**Conclusion**] The research results provide a scientific basis for the development of ephemeral gully erosion prediction model, the separation of ephemeral gully erosion contribution and the study of ephemeral gully erosion mechanism based on erosion dynamic factors and topographic factors and their interaction.

Keywords: ephemeral gully erosion; rainfall intensity; inflow rate; slope gradient; Chinese Mollisol region

Received: 2023-06-08 **Revised**: 2023-08-10 **Accepted**: 2023-08-31 **Online**(www.cnki.net): 2024-01-08

浅沟侵蚀是导致耕地土壤退化和作物减产的重要原因[1]。已有研究[2]表明,在我国黄土高原丘陵沟壑区,浅沟侵蚀占塿坡土壤侵蚀量的35%～70%;在欧洲和美国等[3-4]地区,浅沟侵蚀对坡面侵蚀的贡献在50%以上。浅沟发育需要一定的降雨径流提供足够的侵蚀动力,而降雨强度、上方汇流强度和坡度共同决定径流量和径流动能的大小[5]。降雨对浅沟侵蚀的影响主要表现在降雨强度和降雨能量方面[6],武敏等[7]研究发现,坡下部浅沟侵蚀量随降雨强度的增大而增加;郑粉莉等[8]也指出,坡面侵蚀方式和侵蚀产沙分配规律是由降雨强度和降雨能量共同决定的。上方汇流强度反映降雨强度和上方汇水面积的综合影响,是坡面浅沟侵蚀动力的重要来源[9]。有研究[10-11]发现,坡面上方水流明显加快浅沟发育过程,造成浅沟侵蚀量增加。坡度通过影响径流汇集及其侵蚀能量影响坡面浅沟侵蚀,浅沟侵蚀强度随坡度的增大而增加[12-13]。此外,XU等[14]研究发现,浅沟侵蚀量随降雨强度、上方汇流和坡度的增大而增加,且上方汇流比降雨强度更有效增加径流流速,其对浅沟侵蚀贡献可达29.5%～74.1%。

已有研究[15]表明,我国东北黑土区坡耕地浅沟分布十分广泛,年浅沟侵蚀体积可达118～199 m^3/km^2。浅沟作为黑土区坡耕地最常见的侵蚀类型,其发生发展过程造成大量黑土层流失,影响坡耕地的数量和质量,进而影响区域粮食产能[16-17]。而目前黑土区浅沟侵蚀研究主要集中在浅沟分布和形态特征描述等方面[15,18-20],而黑土区特有长缓坡地形形成的坡面汇流对浅沟侵蚀过程的影响研究相对较少,尤其是降雨强度、汇流强度、坡度及其交互作用对浅沟侵蚀的影响研究还鲜见报道。据此,本研究基于室内模拟试验,分析降雨强度、汇流强度、坡度及其交互作用对浅沟侵蚀过程的影响,加深对浅沟侵蚀机理的认识,为东北黑土区坡面侵蚀治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

供试土壤取自位于典型厚层黑土区的黑龙江省齐齐哈尔市克山县(125°10′57″—126°08′18″E,47°50′51″—48°33′47″N)。坡耕地0—20 cm表层土壤,土壤质地为粉质黏土,用吸管法测得其颗粒组成为黏粒(<0.002 mm)占40.6%,粉粒(0.002～0.05 mm)占48.7%,砂粒(0.05～2 mm)占10.7%。土壤密度为1.09～1.30 g/cm^3,pH 5.9左右(水浸提法,水土质量比2.5∶1),有机质含量为37.0 g/kg(重铬酸钾氧化—外加热法)。

室内模拟试验于2022年3—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,降雨设备为侧喷式降雨系统,降雨高度16 m,满足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,降雨雨滴分

布于 0.2～3.8 mm,降雨均匀度＞90%,最大持续降雨时间 12 h,有效降雨面积为 9 m×4 m[21]。

试验装置系统由恒压箱、稳流槽和试验土槽组成。恒压箱装有排水管,保证试验过程中设计汇水流量的稳定,恒压箱与稳流槽之间用供水管相连接。供水管设有独立阀门调节流量大小。稳流槽安置在试验土槽上方,其内部设有消能装置(隔板),使水流均匀流入试验土槽,以保证恒压箱的来水平稳流入试验土槽。试验土槽为 8 m(长)×2 m(宽)×0.7 m(深)的固定式液压升降钢槽,坡度调节范围 0～30°,坡度调节步长为 0.5°,钢槽底部每 1 m 长排列 4 个孔径为 2 cm 的排水孔,以保证降雨试验过程中排水良好。试验土槽下方共设有 5 个集流口,其中两侧集流口用于收集坡面径流泥沙,中间垂直分布的 3 个集流口用于收集浅沟沟槽在不同阶段所产生的径流泥沙(图 1)。

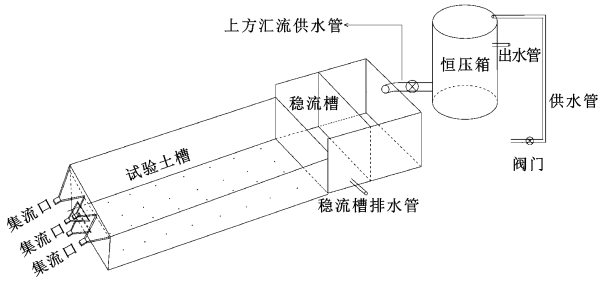


图 1　试验装置示意

Fig. 1　Experimental device

1.2　试验设计

基于东北黑土区侵蚀性降雨标准中 5 min 瞬时雨强为 I_5=80.4 mm/h,实测短历时瞬时降雨强度最大值为 103 mm/h[22],本研究设计 2 个降雨强度,为 50,100 mm/h。基于本课题组在黑龙江省克山县野外大型浅沟径流场(面积为 600 m^2)次降雨观测结果,本研究设计 5 个汇流强度(15,30,45,60,75 L/min)以模拟不同降雨强度下坡面不同汇水面积产生的汇流量。具体来说,对于 50 mm/h 降雨强度,设计的 5 个汇流强度(15,30,45,60,75 L/min)对应的上方汇流面积分别为 60,120,180,240,300 m^2;对于 100 mm/h 降雨强度,设计的 5 个汇流强度对应的上方汇流面积分别为 30,60,90,120,150 m^2。设计的汇流强度的计算公式为:

$$IR=\alpha A\cos(S)RI \tag{1}$$

式中:IR 为上方汇流强度(L/min);A 为汇水面积(m^2);RI 为降雨强度(mm/min);α 为径流系数,取值为 0.30[23];S 为水力坡度(m/m)。

黑土区坡耕地坡度大多为 3°～7°[24],并基于课题组调查的浅沟集水区坡度多集中在 2°～10°的结果,本研究设计的 2 组地面坡度分别为 3°,7°。另外,课题组连续 3 年在每年 4 月下旬对 39 条翻耕后的浅沟沟槽进行调查后发现,浅沟宽度和深度分别变化于 8～25,5～15 cm,据此在 8 m 长、2 m 宽和 0.7 m 深的试验土槽中部设计长度为 6 m、宽度为 10 cm 和深度为 8 cm 的浅沟雏形。具体试验设计见表 1。

表 1　试验设计

Table 1　Experimental design

坡度/(°)	降雨强度/(mm·h^{-1})	汇流强度/(L·min^{-1})
3	50	15,30,45,60,75
	100	15,30,45,60,75
7	50	15,30,45,60,75
	100	15,30,45,60,75

注:每场试验重复 2 次。

1.3　试验步骤

(1)将供试土壤采集后去除根系残落物和秸秆等,并对直径＞3 mm 的土块,按照其自然节理掰成较小的土块后进行风干以备试验所用。由于黑土具有良好的土壤结构,因此本研究对供试土壤不进行研磨处理,以尽量保持土壤原有的结构。

(2)试验土槽填土时,在土槽底部预先铺设 10 cm 厚的细沙,以保证试验土槽具有良好的透水性。然后在 10 cm 细沙层之上将 20 cm 按 5 cm 为 1 层共分为 4 层分层装填,并按野外测定的犁底层土壤密度(1.35 g/cm^3)装填黏黄土,模拟 20 cm 犁底层。待犁底层填好后,将其上部 30 cm 深度按 5 cm 分为 6 层,按野外测定的耕层土壤密度(1.20 g/cm^3)装填黑土,模拟 30 cm 耕层。需要说明的是,在装填试验土槽前,先测定试验土壤质量含水量,然后根据设计的土壤密度和实测的土壤含水量计算各土层所需要的黏黄土或黑土质量。此外,装填试验土槽时,在试验土槽上方横向方向架设宽为 25 cm 木板,用于试验人员踩踏木板上装填试验土槽,以尽量减小人为因素对试验土层的压踏作用。采取边填土边压实方法,并每装填 5 cm 的土层后,用 2 m 长的刮板对土层进行刮平,然后用 1 cm 长的毛刷抓毛土层表面后再继续填装上 1 层,防止土层之间出现分层现象,以保证填土的均匀性和整体性。

(3)为了使所有试验处理的初始土壤含水量保持一致,正式降雨试验前,选用 30 mm/h 降雨强度进行预降雨至坡面产流[25],随后用塑料布覆盖试验土槽并静置 24 h 使土壤水分充分再分布。

(4)正式降雨试验前对设计的降雨强度和汇流强度进行率定,当实测降雨强度和汇流流量与设计的降雨强度和汇流强度的绝对误差＜10%后,将试验土槽坡度调节到设计的坡度(3°和 7°)方可进行试验。每

场试验历时取决于浅沟发育过程，试验历时约为120 min。

试验过程分为3个阶段：①前30 min为仅有降雨阶段（50或100 mm/h降雨强度），每2 min用15 L塑料桶收集径流泥沙样，共计15个径流泥沙样，并用秒表记录采样时间。②当模拟降雨产生的坡面径流稳定后，进入汇流阶段。首先以15 L/min汇流强度进行上方汇流，待坡面径流稳定后，用15 L塑料桶按1 min收集径流泥沙样，分别收集5个径流泥沙样。③随后停止上方汇流，在仅有降雨（50或100 mm/h降雨强度）下待坡面径流稳定后用15 L塑料桶在2个浅沟侧方坡面的集流口和浅沟沟槽集流口分别收集5个径流泥沙样，作为下一汇流阶段坡面径流和侵蚀量的参考值。此后依次重复上述步骤，分别进行30，45，60，75 L/min汇流强度的模拟试验。

（5）试验过程中，在仅有降雨阶段和每个汇流阶段均采用高锰酸钾染色剂法分别沿坡长方向每隔1 m测量浅沟沟槽的水流流速，用测尺每隔20 cm测量水深和浅沟形态参数（宽度和深度），在浅沟长度、宽度和深度发育快速阶段进行加密测量，并详细记录其所在的坡面位置。

（6）每次试验结束，对收集的所有径流泥沙样品进行称重，然后静置24 h后倒出上部清液，并将泥沙样品倒入铝盒在105 ℃烘箱内烘干24 h，称重并计算土壤侵蚀量。

1.4 数据处理

本研究中所描述的坡面侵蚀量是指沟槽两侧坡面、浅沟沟头上方坡面和浅沟沟槽侵蚀量的总和，坡面总侵蚀量的计算是通过各试验时段收集的径流量乘以含沙量的总和。浅沟侵蚀量的计算是用各试验时段测量的浅沟体积（长×宽×深）乘以土壤容重。

试验过程中由染色剂测得的径流表层流速乘以相应的修正系数作为坡面径流平均流速，其表达式为：

$$V = KV_s \tag{2}$$

式中：V 为平均流速（m/s）；V_s 为坡面径流最大流速（m/s）；K 为修正系数（层流和过渡流取值为0.67，紊流为0.80[26]）。本研究中浅沟水流均属于紊流，因此 K 值取0.80。

Darcy—Weisbach阻力系数表征坡面径流阻力，其表达式为[27]：

$$f = \frac{8gRJ}{V_2} \tag{3}$$

式中：f 为阻力系数；g 为重力加速度（980 cm/s^2）；R 为水力半径（cm）；J 为水力坡度，近似为坡度的正弦值。

径流剪切力是剥离土壤的主要动力，其表达式为[28]：

$$\tau = \gamma RJ \tag{4}$$

式中：τ 为径流剪切力（Pa）；γ 为水的重度（N/m^3）。

水流功率即单位面积水体势能随时间的变化率，可表征一定高度的水体顺坡流动时所具有的势能，其表达式为[28]：

$$\omega = \tau V \tag{5}$$

式中：ω 为水流功率[N/(m·s)]。

本研究中，使用Excel 2019软件对数据进行预处理后，采用SPSS 26.0软件进行Pearson相关性分析和回归分析，采用Excel 2019和Origin 2021软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 降雨强度、汇流强度和坡度对坡面径流和侵蚀的影响

2.1.1 坡面径流量和侵蚀量随降雨强度、汇流强度和坡度的变化特征 降雨强度、汇流强度和坡度对坡面侵蚀的影响大于其对坡面径流的影响（表2）。在坡度为3°和7°时，100 mm/h降雨强度较50 mm/h降雨强度的坡面径流量分别增加12.3%～51.0%和13.2%～48.7%，其对应的坡面侵蚀量分别增加52.3%～81.8%和29.4%～88.4%。当汇流强度由15 L/min增加至75 L/min，坡面径流量增加155.6%～247.0%，对应的坡面侵蚀量增加4.6～13.5倍。当坡度从3°增大到7°，50，100 mm/h降雨强度下的坡面径流量分别增加4.5%～8.0%和5.0%～6.3%，坡面侵蚀量分别增加114.3%～395.5%和130.0%～320.9%。

从表2还可以看出，汇流强度增加导致坡度对坡面侵蚀的作用更加明显。当坡度由3°增加到7°时，15 L/min汇流作用使坡面侵蚀量在50，100 mm/h降雨强度条件下分别增加1.1，1.3倍，而75 L/min汇流作用使坡面侵蚀量在对应2种降雨强度下分别增加3.9，3.2倍，其增加幅度分别为2.8，1.9倍。相反地，汇流强度增加导致降雨强度对坡面侵蚀的作用减弱。当降雨强度从50 mm/h增加到100 mm/h时，15 L/min汇流作用使坡面侵蚀量在3°，7°条件下分别增加71.4%，86.7%，而75 L/min汇流作用使坡面侵蚀量在对应2种坡度下分别增加52.3%，29.4%，其减少幅度分别为19.1%，57.3%。

表 2　降雨强度、汇流强度和坡度对坡面径流量和侵蚀量的影响

Table 2　Effects of rainfall intensities, inflow rates and slope gradients on the slope runoff and erosion

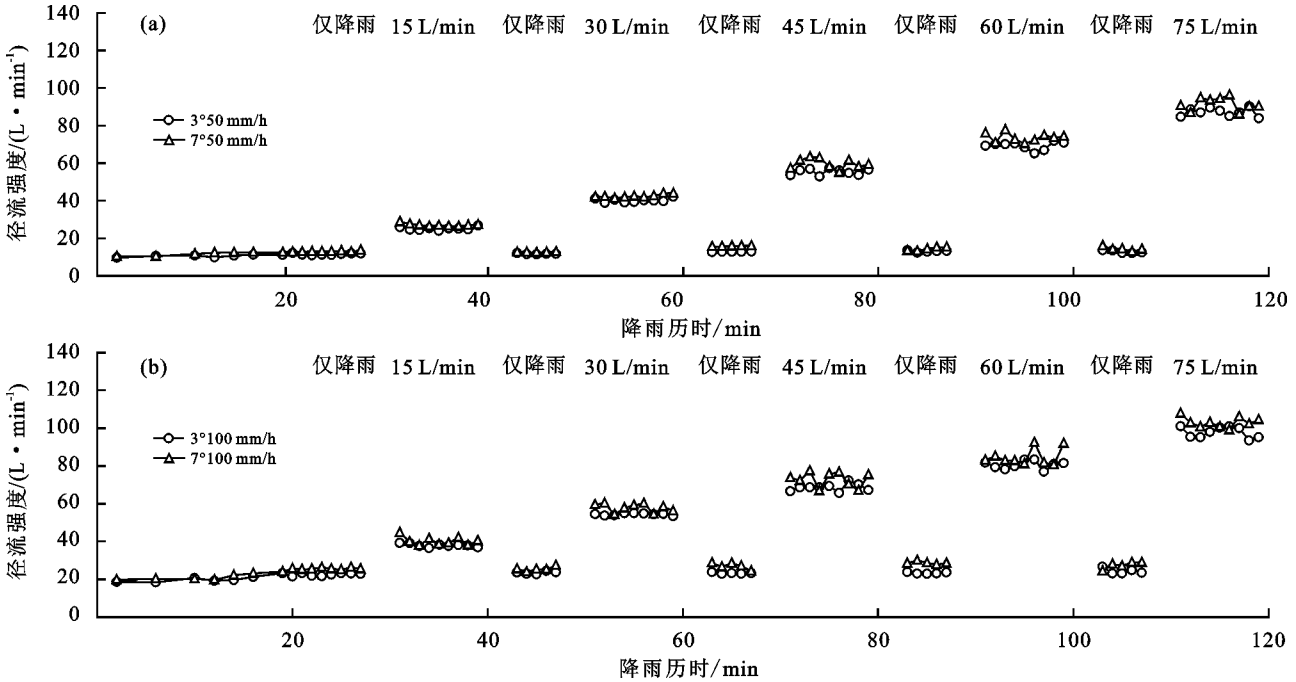
坡度/(°)	降雨强度/(mm·h^{-1})	汇流强度/(L·min^{-1})	坡面径流量/(L·min^{-1})	坡面侵蚀量/(kg·min^{-1})
3	50	15	25.1±1.3	0.7±0.1
		30	40.1±2.4	1.1±0.2
		45	55.3±2.9	2.0±0.3
		60	69.3±3.1	3.4±0.5
		75	87.1±3.4	4.4±1.0
	100	15	37.9±1.5	1.2±0.2
		30	54.4±2.4	2.0±0.2
		45	68.6±4.2	3.2±0.3
		60	80.6±4.7	5.3±0.9
		75	97.8±5.4	6.7±1.3
7	50	15	27.1±1.7	1.5±0.2
		30	42.4±1.9	2.7±0.3
		45	59.1±2.7	6.9±0.8
		60	73.6±3.5	14.8±2.0
		75	91.0±4.1	21.8±3.2
	100	15	40.3±3.3	2.8±0.3
		30	57.8±3.8	4.6±0.7
		45	72.9±6.5	13.0±2.2
		60	84.6±6.7	20.7±4.6
		75	103.0±8.8	28.2±4.7

注:表中数据为平均值±标准差。下同。

2.1.2　坡面径流过程和侵蚀过程随降雨强度、汇流强度和坡度的变化特征　在 50,100 mm/h 降雨强度和 3°,7°坡度下,坡面汇流对坡面径流过程的影响非常明显,但在 2 种降雨强度和 2 种坡度下,坡面径流强度在 5 种坡面汇流前后的变化均不明显(图 2)。对于无上方汇流,50,100 mm/h 降雨强度、3°坡度下坡面径流强度变化分别为 10.9～13.7,21.5～26.7 L/min,7°坡度下坡面径流强度变化分别为 12.5～16.0,24.0～30.1 L/min。对于有上方汇流,在 2 种降雨强度下,5 种汇流强度在 3°坡面对应的径流强度的变化分别为 24.0～90.3,36.6～101.1 L/min,7°坡度下坡面对应的径流强度的变化分别为 26.3～95.9,37.9～107.9 L/min。

从图 2 还可看出,当上方汇流强度为 15,30 L/min 时,在 2 种坡度和 2 种降雨下坡面径流强度变化较为平稳;而当上方汇流强度为 45,60,75 L/min 时,坡面径流强度出现明显的波动现象。

与坡面径流过程类同,坡面汇流对坡面侵蚀过程的影响非常明显,但在 2 种降雨强度和 2 种坡度下,坡面侵蚀速率在 5 种坡面汇流前后的变化均不明显(图 3)。对于无上方汇流,50,100 mm/h 降雨强度、3°坡度下坡面侵蚀速率变化分别为 0.4～0.7,0.6～1.6 kg/min,7°坡度下坡面侵蚀速率变化分别为0.9～1.7,1.0～3.5 kg/min。对于有上方汇流,在 2 种降雨强度、3°坡度下坡面对应的侵蚀速率变化分别为 0.6～5.2,1.0～7.2 kg/min,7°坡度下坡面对应的侵蚀速率变化分别为 1.3～24.0,2.5～31.6 kg/min。



注:3° 50 mm/h 表示坡度为 3°、降雨强度为 50 mm/h;3° 100 mm/h 表示坡度为 3°、降雨强度为 100 mm/h;7° 50 mm/h 表示坡度为 7°、降雨强度为 50 mm/h;7° 100 mm/h 表示坡度为 7°、降雨强度为 100 mm/h。下同。

图 2　降雨强度、汇流强度和坡度对坡面径流强度的影响

Fig. 2　Effect of rainfall intensities, inflow rates and slope gradients on slope runoff rates

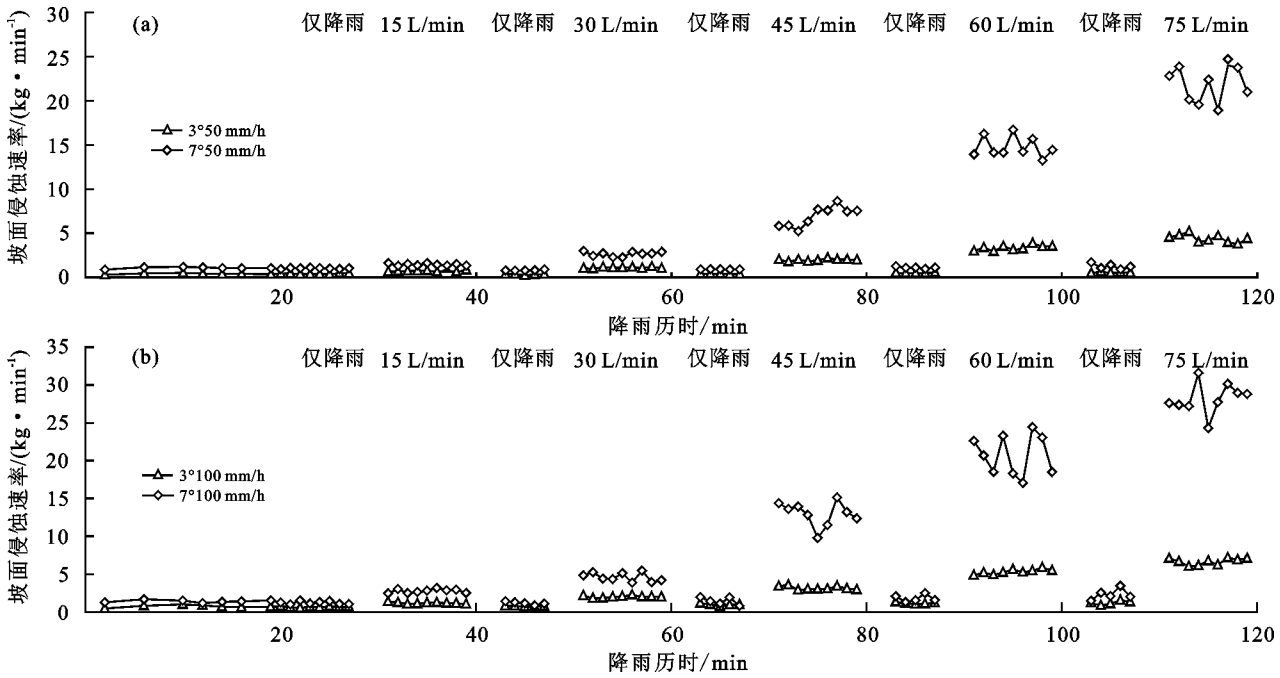


图 3 降雨强度、汇流强度和坡度对坡面侵蚀速率的影响

Fig. 3 Effect of rainfall intensities, inflow rates and slope gradients on slope erosion rates

从图 3 还可以看出，2 种降雨强度，7°坡度下坡面侵蚀速率随汇流强度增大而增长的过程可分为 2 个阶段，即缓慢增加阶段和快速增长阶段。当汇流强度为 15，30 L/min，坡面侵蚀速率分别从由 1.3～1.6，2.5～3.2 kg/min 增加到 2.3～3.0，3.9～5.2 kg/min，其增幅分别为 76.9%～87.5%，56.0%～62.5%；而汇流强度由 30 L/min 增加至 75 L/min 时，坡面侵蚀速率由 2.3～3.0，3.9～5.2 kg/min 增加至 18.9～24.0，24.3～31.6 kg/min，其增幅分别为 7.0～7.2，5.1～5.2 倍。

2.1.3 *降雨强度、汇流强度和坡度交互作用对坡面侵蚀的影响* Pearson 相关性分析结果表明，坡面侵蚀速率（Er）与降雨强度（RI）、汇流强度（IR）和坡度（S）及其交互作用之间均呈显著或极显著的正相关关系。在降雨、汇流和坡度单因子对坡面侵蚀速率影响中，以坡面汇流强度（IR）的影响最大（$r=0.67$，$p<0.01$），其次为坡度（S）（$r=0.48$，$p<0.01$），而降雨强度（RI）的影响最小（$r=0.27$，$p<0.05$）。在降雨强度—汇流强度—坡度交互作用对坡面侵蚀速率影响中，以汇流强度—坡度二者交互作用（I_{IRS}）的影响（$r=0.92$，$p<0.01$）和降雨强度—汇流强度—坡度三者交互作用（I_{RIIRS}）的影响（$r=0.91$，$p<0.01$）最大，其次为降雨强度—汇流强度交互作用（I_{RIIR}）（$r=0.67$，$p<0.01$），而以降雨强度—坡度交互作用（I_{RIS}）最小（$r=0.48$，$p<0.01$）。与降雨强度、汇流强度和坡度单因子对坡面侵蚀速率的影响相比，除汇流强度外，汇流强度—坡度双因子和降雨强度—汇流强度—坡度三因子交互作用对坡面侵蚀的影响均大于单因子的影响。

汇流强度的大小在一定程度上代表汇水面积（坡长）的大小，其与坡度的交互作用代表地形因子对坡面侵蚀的影响。由此可见，对于东北典型厚层黑土区，地形因子对浅沟坡面侵蚀的影响非常显著。这是因为坡面浅沟沟槽对降雨和上方汇流的汇集作用，使得浅沟沟槽的水深远大于 3 倍的雨滴直径，削弱降雨强度对坡面侵蚀的影响[29]，加剧坡面浅沟水流的侵蚀能力和搬运能力，加之在浅沟坡面，浅沟沟槽是侵蚀发生的主要区域，因而导致坡面汇流和坡度对坡面侵蚀有较大影响。

2.2 浅沟侵蚀对坡面侵蚀的影响

浅沟侵蚀量由试验过程中测量的浅沟体积乘以土壤容重而获得。不同试验处理下，浅沟侵蚀量占坡面侵蚀量的比例平均在 85%以上（表 3），且随汇流强度和坡度的增加而增加，但其随降雨强度的增加变化不明显（$p<0.01$）（表 3 和图 4）。

表 3 不同试验处理下浅沟侵蚀对坡面土壤侵蚀的贡献

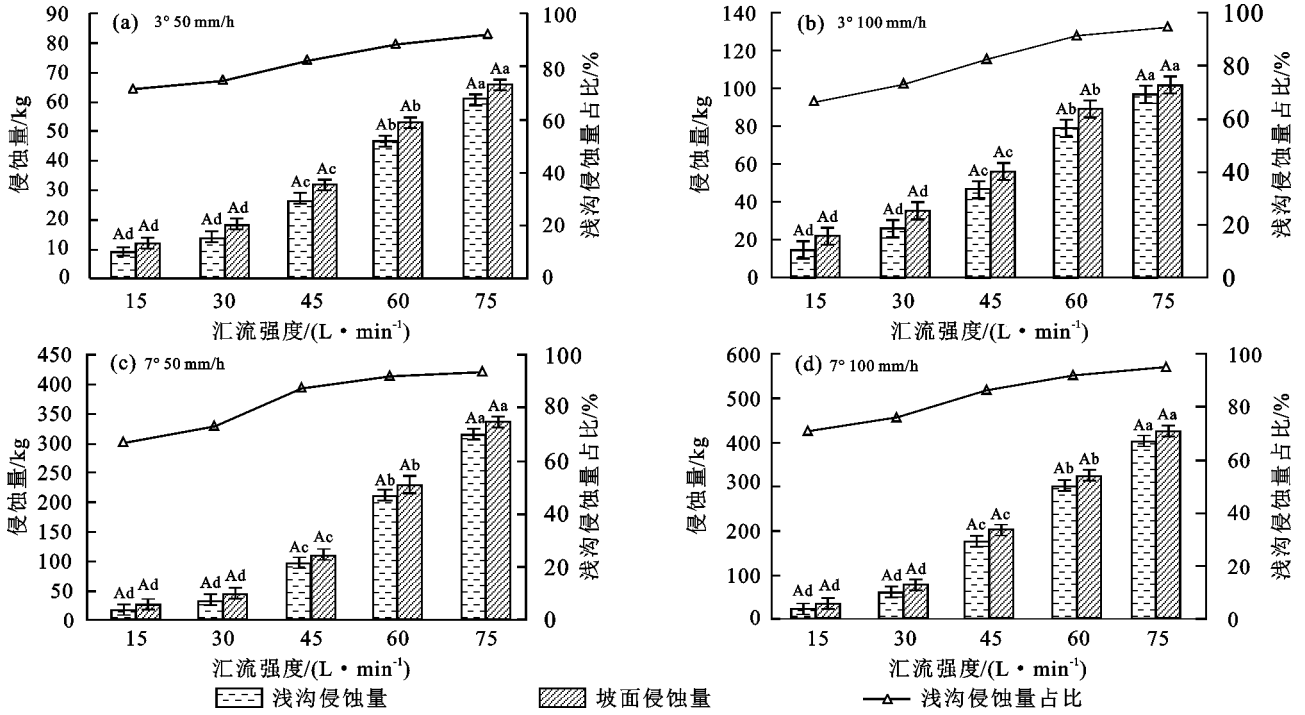
Table 3 Contribution of ephemeral gully erosion to slope erosion

坡度/(°)	降雨强度/(mm·h⁻¹)	浅沟侵蚀量/kg	坡面侵蚀量/kg	浅沟侵蚀量占比/%
3	50	165.3±29.5	191.6±33.5	86.3
	100	272.7±37.8	319.4±48.1	85.4
7	50	685.2±88.9	761.7±105.1	90.0
	100	993.5±150.2	1 107.1±179.8	89.7

在 50，100 mm/h 降雨强度、3°坡度下坡面侵蚀

量分别为 191.6,319.4 kg,浅沟侵蚀量分别为 165.3,272.7 kg,对应的浅沟侵蚀量分别占坡面侵蚀量的 86.3%,85.4%;在 7°坡度,2 种降雨强度下,坡面侵蚀量分别为 761.7,1 107.1 kg,浅沟侵蚀量分别为 685.2,993.5 kg,对应的浅沟侵蚀量分别占坡面侵蚀量的 90.0%和 89.7%。

此外,当汇流强度从 15 L/min 增加至 75 L/min 时,2 种降雨强度,3°坡度下坡面浅沟侵蚀量占坡面侵蚀量的比例由 66.4%增加到 94.7%,7°坡度下坡面浅沟侵蚀量占坡面侵蚀量的比例由66.7%增加到95.1%。



注:图中不同大写字母表示相同汇流强度下浅沟侵蚀量和坡面侵蚀量之间差异显著,不同小写字母表示不同汇流强度下浅沟侵蚀量/坡面侵蚀量差异显著($p<0.05$)。

图 4　不同汇流强度下浅沟侵蚀量对坡面侵蚀量的贡献

Fig. 4　Contribution of ephemeral gully erosion to slope erosion at different inflow rates

2.3　浅沟水流水力学和水动力学参数随降雨强度、汇流强度和坡度的变化特征

浅沟水流流速、径流剪切力和水流功率均随降雨强度、汇流强度、坡度的增大而增加,而阻力系数呈相反趋势(图 5),且汇流强度和坡度对浅沟水流流速、径流剪切力和水流功率的影响大于降雨强度。相同降雨强度和坡度下,当汇流强度由 15 L/min 增加至 75 L/min,水流流速增加 26.6%～73.4%(图 5a),径流剪切力增加 41.1%～78.0%(图 5c),水流功率增加 66.7%～214.3%(图 5d);而阻力系数减少 25.0%～33.3%(图 5b)。相同降雨强度和汇流强度下,坡度由 3°增加到 7°时,水流流速增加 22.9%～61.3%,径流剪切力增加 86.4%～124.5%,水流功率增加 131.2%～263.9%。而在 2 种降雨强度和坡度下,阻力系数分别以 30 L/min 或 45 L/min 汇流强度为突变点,在 50 mm/h 降雨强度下,当汇流强度小于 45 L/min 时,3°坡度时阻力系数大于 7°坡度,而当汇流强度大于 45 L/min 时,3°坡度时阻力系数小于 7°坡度;同样在 100 mm/h 降雨强度下,当汇流强度小于 30 L/min 时,3°坡度时阻力系数大于 7°坡度,而当汇流强度大于 30 L/min 时,3°坡度时阻力系数小于 7°坡度。整体上,当降雨强度由 50 mm/h 增加到 100 mm/h 时,水流流速、径流剪切力和水流功率呈增加趋势。但对于 7°坡度,在 75 L/min 汇流强度时,50 mm/h 降雨强度下径流剪切力和水流功率大于 100 mm/h 降雨强度,其原因可能是在此阶段 100 mm/h 降雨强度下的浅沟沟壁崩塌较 50 mm/h 降雨强度剧烈,导致水流宽度增加而水深减小,从而使径流剪切力和水流功率减小。

3　讨 论

3.1　降雨强度、汇流强度和坡度对径流和侵蚀的影响

坡面径流强度随降雨强度、汇流强度和坡度的增大而增加。由于本研究中前期降雨使土壤充分饱和,加之雏形浅沟对坡面水流的汇集作用,导致降雨强度和上方汇流强度的增加使坡面径流动能增加[5]。此外,坡度增大也使径流量有所增加,其原因为坡度增大使得坡面水流流速增大(图 5),而坡面流速的增加使径流入渗速率有所减小,因此径流量略有增加[30-31]。浅沟坡面侵蚀量随降雨强度、汇流强度和坡度的增大也呈增加的趋势。当降雨强度由 50 mm/h

增加至 100 mm/h，坡面侵蚀量增加 29.4%～88.4%；当汇流强度由 15 L/min 增加至 75 L/min，坡面侵蚀量增加 4.6～13.5 倍；坡度由 3°增加到 7°，坡面侵蚀量增加 114.3%～395.5%。此前的研究结果[12,32-34]也表明，降雨强度、汇流强度和坡度的增大导致浅沟坡面侵蚀速率出现不同程度的增加。此外，降雨强度、汇流强度和坡度之间的交互作用分析结果表明，汇流强度—坡度交互作用以及降雨强度—汇流强度—坡度交互作用对浅沟侵蚀的影响大于降雨强度，且汇流强度—坡度交互作用大于汇流强度—降雨强度交互作用，其原因为雏形浅沟的存在及试验过程中的浅沟不断发育使得大部分坡面径流汇集到浅沟沟槽内，降雨强度对浅沟侵蚀的贡献主要以增加径流强度的方式体现。当浅沟沟槽内径流深度大于 3 倍雨滴直径时，雨滴动能被消耗，进而削弱雨滴溅蚀作用的影响[29,35]。坡度通过改变降雨与坡面的夹角和降雨接收区域面积影响径流动能，综合作用于侵蚀动力；同时坡度增加导致坡面土壤颗粒沿坡面向下方的分量增加，土体稳定性降低，泥沙搬运过程加快，且易形成下切沟头，下切沟头溯源侵蚀导致浅沟发育进程加快，沟底下切和沟壁崩塌更快发生，因此浅沟坡面侵蚀速率明显增加[30]。汇流强度—坡度交互作用和降雨强度—汇流强度—坡度交互作用对坡面侵蚀速率影响较大，其原因为浅沟的不断发育导致降雨和上方汇流汇集在浅沟沟槽内，从而加强浅沟水流的侵蚀和搬运能力，使得浅沟侵蚀过程加剧，进而导致侵蚀量增加。另外，坡度的增加导致径流侵蚀加大，这也加速浅沟的发育过程，最终导致侵蚀量显著增加。7°坡度时，上方汇流强度大于 30 L/min 时浅沟坡面侵蚀速率显著增加，说明 30 L/min 的汇流强度可能是导致浅沟坡面侵蚀速率陡增的临界值。XU 等[14]的研究表明，当上方汇流面积达到临界值，浅沟坡面侵蚀速率显著增加。此外，不同试验处理下，当汇流强度为 45，60，75 L/min 时，坡面侵蚀速率波动明显，其原因是随着浅沟的发育，沟壁剧烈崩塌导致坡面侵蚀速率变化较大。

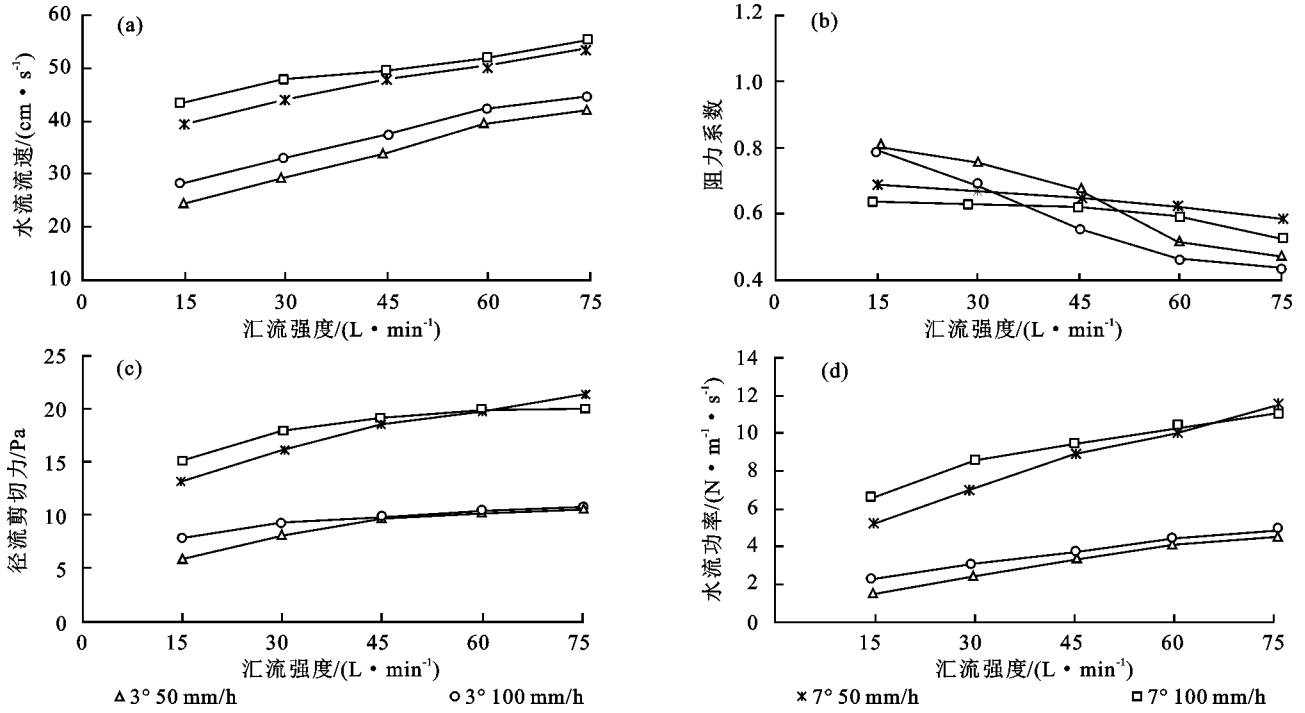


图 5 不同试验处理下浅沟沟槽水流水力学和水动力学参数随汇流强度的变化

Fig. 5 Changes in ephemeral gully hydraulic and hydrodynamic parameters with different inflow rates under different experimental treatments

3.2 坡面侵蚀速率与坡面水流水力学和水动力学参数的关系分析

坡面水流流速是表征土壤剥蚀能力和搬运能力的重要参数[36]，而水流沿坡面流动必然受到阻力的影响，其大小一方面对水流流速产生直接影响；另一方面，直接影响径流对土壤的有效侵蚀力[37]。径流剪切力是土壤被剥离的主要动力[28]，而水流功率与水流流速密切相关，水流功率可以较好地预测径流搬运能力[38]。因此，选取水流流速、阻力系数、水流剪切力和水流功率 4 个水力学和水动力学参数，分析降雨、汇流和坡度影响坡面侵蚀过程的原因。

3.2.1 *坡面浅沟发育与浅沟水流水力学和水动力学参数互馈关系* 本研究表明，7°坡度和 100 mm/h 降雨强度时，5 种汇流强度下浅沟水流流速较 3°坡度和 50 mm/h 降雨强度时增加 30.4%～79.0%。这是由于浅沟雏形的存在以及试验过程中浅沟的不断发育

为坡面径流汇集提供路径,且坡度增加使径流的重力势能更多转化为动能,因此坡面水流流速随着降雨强度、汇流强度和坡度的增加不断增大[32]。不同坡度下,阻力系数均随降雨强度和汇流强度的增大而减小,其原因是汇流强度增加使得浅沟水流流速增加,因此阻力系数减小。但坡度对阻力系数的影响较为复杂,在 50 或 100 mm/h 降雨强度下,当汇流强度分别小于 45 L/min 或 30 L/min 时,3°坡度的阻力系数大于 7°坡度,而当汇流强度大于 45 L/min 或 30 L/min 时,3°坡度的阻力系数小于 7°坡度。其原因为 7°坡度时,随着汇流强度增加,浅沟发育更加剧烈,导致浅沟形态变化更为复杂,使 7°坡度的阻力系数大于 3°坡度。径流剪切力和水流功率总体上随降雨强度、汇流强度和坡度的增大而增加。7°坡度时浅沟平均宽度与深度显著增加,宽深比整体呈增大趋势,因此水力半径增加,且 7°坡度时浅沟水流流速整体大于 3°坡度,因此径流剪切力和水流功率随降雨强度、汇流强度和坡度的增大而增加。但对于 7°坡度,在 75 L/min 汇流强度下,50 mm/h 降雨强度下径流剪切力和水流功率大于 100 mm/h 降雨强度,其原因是在 7°坡度和 75 L/min 汇流强度下,100 mm/h 降雨强度的浅沟沟壁崩塌较 50 mm/h 降雨强度时更加剧烈,导致过水断面宽度增加和水流深度变浅,从而使径流剪切力和水流功率减小。

3.2.2　*坡面侵蚀速率与坡面水流水力学和水动力学参数之间的关系*　Pearson 相关性分析结果表明,坡面侵蚀速率与坡面水流流速、径流剪切力和水流功率之间呈显著或极显著的正相关关系,相关系数分别为 0.749,0.778,0.830($p<0.01$);而与阻力系数呈显著负相关,相关系数为 -0.344($p<0.05$),此结果表明,与坡面水流流速和径流剪切力相比,坡面侵蚀速率与水流功率的关系最好。

坡面侵蚀速率与水流流速、径流剪切力和水流功率均呈显著正相关,说明降雨过程中一旦坡面产生径流,坡面径流沿坡长在浅沟沟槽内汇集,随着坡度增加,坡面水流流速增大,而坡面径流侵蚀能力与水流流速的三次方呈正比[39],故而水流流速的增加加剧坡面侵蚀过程,导致坡面侵蚀量增加,这也较好地解释了降雨、汇流和坡度加剧坡面侵蚀过程。此前的研究[40-41]结果也表明,随降雨强度、汇流强度和坡度的增加,径流剪切力和水流功率均有不同程度的增加;也有研究[42]表明,当土壤侵蚀以片蚀为主时,水流深度相对稳定,因此径流剪切力能更好地表征土壤侵蚀速率。而此研究中坡面雏形浅沟的存在以及试验过程中浅沟不断发育使浅沟形态变化较为复杂,导致水流深度变化复杂,尤其是 7°坡度时浅沟沟壁崩塌强烈导致浅沟宽度增加和径流流路变宽,使水流深度随径流量增加的趋势不明显。而与水深相比,坡面流速随径流量增加而增大,而水流功率主要与水流流速有关,因此用水流功率表征浅沟水流搬运能力较为合适。这也是坡面侵蚀速率与水流功率的相关性大于其与水流流速和径流剪切力相关性的主要原因。

3.3　研究结果对黑土区坡面侵蚀防控的意义

本研究表明,汇流强度和坡度的增加加剧浅沟坡面侵蚀过程,且浅沟坡面侵蚀量对汇流强度—坡度交互作用和降雨强度—汇流强度—坡度交互作用的响应更明显,说明在典型厚层黑土区汇流强度加大降雨和坡度对浅沟坡面侵蚀的影响。实施增加入渗和分散坡面径流保护性耕作措施,以及蓄排并重的工程措施对黑土地侵蚀防治至关重要。同时浅沟侵蚀量占坡面侵蚀量的 66.4%～95.1%,据此防治浅沟坡面侵蚀对黑土地侵蚀治理有重要意义。因此,建议采用保护耕作措施(免耕少耕、秸秆留茬覆盖、带状间作)与生物篱和反坡缓坡梯田等综合措施,增加降雨入渗,削减坡度,进而减小坡面径流,减缓坡面浅沟侵蚀的发生发展。

4　结 论

(1)降雨强度、汇流强度和坡度对坡面侵蚀的影响大于其对坡面径流的影响。坡度分别为 3°,7°时,100 mm/h 降雨强度较 50 mm/h 降雨强度的坡面径流量分别增加 12.3%～51.0%和 13.2%～48.7%,而其对应的坡面侵蚀量分别增加 52.3%～81.8%和 29.4%～88.4%。当汇流强度由 15 L/min 增加至 75 L/min,坡面径流量增加 155.6%～247.0%,而对应的坡面侵蚀量增加 4.6～13.5 倍。当坡度从 3°增大到 7°时,50,100 mm/h 降雨强度下的坡面径流量分别增加 4.5%～8.0%和 5.0%～6.3%,而对应的坡面侵蚀量分别增加 114.3%～395.5%和 130.0%～320.9%。汇流强度增加加剧坡度对坡面侵蚀的作用,而减弱降雨强度对坡面侵蚀的影响。

(2)坡面侵蚀速率与降雨强度、汇流强度和坡度及其交互作用之间均呈显著或极显著的正相关关系。在降雨、汇流和坡度单因子对坡面侵蚀速率影响中,以坡面汇流强度的影响最大,其次为坡度,而降雨强度的影响最小;在降雨强度—汇流强度—坡度交互作用对坡面侵蚀速率影响中,汇流强度—坡度二者交互作用和降雨强度—汇流强度—坡度三者交互作用对坡面侵蚀速率影响较大,其次为降雨强度—汇流强度交互作用,而以降雨强度—坡度交互作用最小。

(3)浅沟侵蚀量占坡面侵蚀量的比例平均在 85%以上,且随汇流强度和坡度的增加,浅沟侵蚀量

占坡面侵蚀量的比例也呈增加趋势。此外,当汇流强度从15 L/min增加至75 L/min时,2种降雨强度和坡度下,浅沟侵蚀量占坡面侵蚀量的比例由66.4%增加至95.1%。

(4)浅沟水流流速、径流剪切力和水流功率总体上均随降雨强度、汇流强度、坡度的增大而增加,而阻力系数呈相反趋势,且汇流强度和坡度影响大于降雨强度。坡面侵蚀速率与水流流速、径流剪切力和水流功率之间呈极显著正相关,相关系数分别为0.749,0.778和0.830;与阻力系数呈显著负相关,相关系数为-0.344。与水流流速和径流剪切力相比,坡面侵蚀速率与水流功率的相关关系最优。

参考文献:

[1] LIU G, ZHENG F L, WILSON G V, et al. Three decades of ephemeral gully erosion studies[J].Soil and Tillage Research,2021,212:e105046.

[2] 唐克丽,张科利,雷阿林.黄土丘陵区退耕上限坡度的研究论证[J].科学通报,1998,43(2):200-203.
TANG K L, ZHANG K L, LEI A L. Study and proof of the upper limit slope for cultivation in the hilly region of the Loess Plateau[J].Science Bulletin,1998,43(2):200-203.

[3] BENNETT S J, ALONSO C V, PRASAD S N, et al. Experiments on headcut growth and migration in concentrated flows typical of upland areas[J].Water Resources Research,2000,36(7):1911-1922.

[4] CAPRA A, LA S C. Medium-term evolution of some ephemeral gullies in Sicily (Italy)[J].Soil and Tillage Research,2015,154:34-43.

[5] DESMET P J, POESEN J, GOVERS G K, et al. Importance of slope gradient and contributing area for optimal prediction of the initiation and trajectory of ephemeral gullies[J].Catena,1999,37(3):377-392.

[6] 张科利.浅沟发育对土壤侵蚀作用的研究[J].中国水土保持,1991(4):17-19.
ZHANG K L. Study on the effects of shallow gully development on soil erosion[J].Soil and Conservation in China,1991(4):17-19.

[7] 武敏,郑粉莉,黄斌.黄土坡面汇流汇沙对浅沟侵蚀影响的试验研究[J].水土保持研究,2004,11(4):74-76,90.
WU M, ZHENG F L, HUANG B. Experiment study on upslope runoff effects on ephemeral gully erosion processes at loessial hillslope[J].Research of Soil and Water Conservation,2014,11(4):74-76,90.

[8] 郑粉莉,康绍忠.黄土坡面不同侵蚀带侵蚀产沙关系及其机理[J].地理学报,1998,53(5):422-428.
ZHENG F L, KANG S Z. Erosion and sediment yield in different zones of loess slopes[J].Acta Geographica Sinica,1998,53(5):422-428.

[9] 郑粉莉,徐锡蒙,覃超.沟蚀过程研究进展[J].农业机械学报,2016,47(8):48-59,116.
ZHENG F L, XU X M, QIN C. A review of gully erosion process research[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(8):48-59,116.

[10] 吴桐嘉,潘成忠,罗明杰,等.降雨和汇流条件下浅沟侵蚀过程试验研究[J].水土保持通报,2019,39(4):22-29.
WU T J, PAN C Z, LUO M J, et al. Experimental study on ephemeral gully erosion processes under simulated rainfall and silt-laden inflows[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2019,39(4):22-29.

[11] 郭军权,刘敏,王文龙.上方来水对浅沟侵蚀产沙的野外放水冲刷试验研究[J].水土保持学报,2012,26(3):49-52.
GUO J Q, LIU M, WANG W L. Experimental study on upslope runoff effects on ephemeral gully erosion processes[J].Journal of Soil and Water Conservation,2012,26(3):49-52.

[12] 徐锡蒙,郑粉莉,武敏.雨强和坡度对黄土陡坡地浅沟形态特征影响的定量研究[J].农业工程学报,2017,33(11):124-132.
XU X M, ZHENG F L, WU M. Quantification study of rainfall intensity and slope gradient impacts on ephemeral gully morphological characteristic on steep loessial hillslope[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering,2017,33(11):124-132.

[13] 武敏,郑粉莉.浅沟侵蚀过程及预报模型研究进展[J].水土保持研究,2004,11(4):113-116.
WU M, ZHENG F L. Research progress on ephemeral gully erosion process and its prediction model[J].Research of Soil and Water Conservation,2004,11(4):113-116.

[14] XU X M, ZHENG F L, WILSON G V, et al. Upslope inflow, hillslope gradient and rainfall intensity impacts on ephemeral gully erosion[J].Land Degradation and Development,2017,28(8):2623-2635.

[15] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等.东北漫岗黑土区浅沟侵蚀发育特征[J].地理科学,2009,29(4):545-549.
HU G, WU Y Q, LIU B Y, et al. Growth characteristics of ephemeral gully in rolling hills of black soils in northeast China[J].Scientia Geographica Sinica,2009,29(4):545-549.

[16] 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.

[17] WILSON G V, WELLS R, KUHNLE R, et al. Sediment detachment and transport processes associated with internal erosion of soil pipes[J].Earth Surface

Processes and Pandforms,2018,43(1):45-63.

[18] 甄怀才,张兴义,杨薇,等.沟壁坡度对侵蚀沟三维重建误差的影响[J].水土保持学报,2020,34(3):61-66,72.
ZHENG H C, ZHANG X Y, YANG W, et al. Influence of gully sidewall slope steepness on the error of 3D reconstruction in the erosion gully[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2020,34(3):61-66,72.

[19] TANG J, XIE Y, LIU C, et al. Effects of rainfall characteristics and contour tillage on ephemeral gully development in a field in Northeastern China[J]. Soil and Tillage Research,2022,218:e105312.

[20] 崔明,蔡强国,张永光,等.漫岗黑土区坡耕地中雨季浅沟发育机制[J].农业工程学报,2007,23(8):59-65.
CUI M, CAI Q G, ZHANG Y G, et al. Development of ephemeral gully during rainy season in the slope land in rolling-hill black-soil region of northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering,2007,23(8):59-65.

[21] 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 F L, ZHAO J. Brief introduction of artificial simulated rainfall hall and simulated rainfall equipment [J].Research of Soil and Water Conservation.2004,11(4):177-178.

[22] 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.
GAO F, ZHAN M, ZHAN H. Study on criteria of erosive rain in farmland of chernozem in Heilongjiang province.[J]. Soil and Water Conservation in China, 1989(11):19-21.

[23] WANG L, ZHENG F L, ZHANG X C, et al. Discrimination of soil losses between ridge and furrow in longitudinal ridge-tillage under simulated upslope inflow and rainfall[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 198:e104541.

[24] 范昊明,蔡强国,王红闪.中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J].水土保持学报,2004,18(2):66-70.
FAN H M, CAI Q G, WANG H S. Condition of soil erosion in phaeozem region of northeast China.[J].Journal of Soil and Water Conservation,2004,18(2):66-70.

[25] XU X M, 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.

[26] LI G, ABRAHAMS A D, ATKNSON J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow[J].Earth Surface Processes and Landforms, 1996,21(6):509-515.

[27] ABRAHAMS A, PARSONS A, LUK S H. Resistance to overland flow on desert hillslopes[J].Journal of Hydrology,1986,88(3):343-363.

[28] NEARING M A, BRADFORD J M, PARKER S C. Soil detachment by shallow flow at low slopes[J].Soil Science Society of America Journal,1991,55(2):339-344.

[29] GUY B T, DICKINSON W T, RUDRA R P. The roles of rainfall and runoff in the sediment transport capacity of interrill flow[J].Transactions of the ASAE, 1987,30(5):1378-1387.

[30] 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 for Agricultural Engineering,2016,32(20):161-170.

[31] 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):147-154,182.
LI G F, ZHENG F L, LU J, 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):147-154,182.

[32] 车小力,王文龙,郭军权,等.上方来水来沙对浅沟侵蚀产沙及水动力参数的影响[J].中国水土保持科学,2011,9(3):26-31.
CHE X L, WANG W L, GUO J Q, et al. Effects of up-slope runoff and sediment on ephemeral gully erosion sediment and hydraulic parameters[J].Science of Soil and Water Conservation,2011,9(3):26-31.

[33] 龚家国,庞金城,贾仰文,等.黄土区浅沟侵蚀影响因素对其侵蚀速率影响的模拟试验研究[J].水土保持研究,2011,18(1):7-11.
GONG J G, PANG J C, JIA Y W, et al. Experimental study on influencing factors of ephemeral gully erosion on losses slope[J].Research of Soil and Water Conservation,2011,18(1):7-11.

[34] 郭军权,王文龙.坡度对浅沟侵蚀产沙的野外放水冲刷试验影响[J].水土保持学报,2019,33(4):87-92,212.
GUO J Q, WANG W L. Experimental study on the effects of field scouring slope on ephemeral gully erosion and sediment yield[J].Journal of Soil and Water Conservation,2019,33(4):87-92,212.

(下转第 75 页)

aggregate fragments in Mollisols of Northeast China [J]. European Journal of Soil Science, 2022, 73(4): e13273.

[26] 吴普特,周佩华.地表坡度对雨滴溅蚀的影响[J].水土保持通报,1991,11(3):8-13, 28.
WU P T, ZHOU P H. The effect of land slope upon raindrop splash erosion[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,1991,11(3):8-13, 28.

[27] 相莹敏,张洪江,程金花,等.华北土石山区土壤溅蚀影响因素分析[J].中国水土保持科学,2016,14(2):120-126.
XIANG Y M, ZHANG H J, CHENG J H, et al. Factors influencing soil splash erosion in rocky mountain area of Northern China[J]. Science of Soil and Water Conservation,2016,14(2):120-126.

[28] 王晨沣,张守红,王彬,等.不同土壤前期含水量对土壤分离临界水动力学特性及其抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):91-96,102.
WANG C F, ZHANG S H, WANG B, et al. Study on critical hydraulic characteristic of soil detachment and soil shear strength under different antecedent soil moisture contents[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2017,31(1):91-96,102.

[29] 马仁明,王军光,李朝霞,等.降雨过程中红壤团聚体粒径变化对溅蚀的影响[J].长江流域资源与环境,2013,22(6):779-785.
MA R M, WANG J G, LI Z X, et al. Effects of dynamic distribution of aggregate size on splash erosion under rainfall in red soils[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2013,22(6):779-785.

[30] LIN X, HU Q H, CHEN Z H, et al. Changes in water vapor adsorption and water film thickness in clayey materials as a function of relative humidity[J]. Vadose Zone Journal,2020,19(1):e20063.

[31] 郭霞,傅强,田锐,等.动态光散射技术测定土壤/粘土胶体的 Hamaker 常数[J].西南大学学报(自然科学版),2016,38(6):74-81.
GUO X, FU Q, TIAN R, et al. Dynamic light scattering technology determination the hamater constant of soil/clay colloids[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition),2016,38(6):74-81.

[32] 程金花,秦越,张洪江,等.华北土石山区模拟降雨下土壤溅蚀研究[J].农业机械学报,2015,46(2):153-161.
CHENG J H, QIN Y, ZHANG H J, et al. Splash erosion under artificial rainfall in rocky mountain area of northern China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(2):153-161.

[33] AN J, ZHENG F L, LU J, et al. Investigating the role of raindrop impact on hydrodynamic mechanism of soil erosion under simulated rainfall conditions[J]. Soil Science,2012,177(8):517-526.

(上接第 67 页)

[35] 汤立群.坡面降雨溅蚀及其模拟[J].水科学进展,1995,6(4):304-310.
TANG L Q. Soil erosion caused by impacts of raindrop on the sloping land and its simuation[J]. Advances in Water Science,1995,6(4):304-310.

[36] 范昊明,王铁良,周丽丽,等.不同坡形坡面径流流速时空分异特征研究[J].水土保持学报,2007,21(6):35-38.
FAN H M, WANG T L, ZHOU L L, et al. Study on temporal and spatial variation of current velocity on different form slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2007,21(6): 35-38.

[37] 丁文峰,李占斌,丁登山.坡面细沟侵蚀过程的水动力学特征试验研究[J].水土保持学报,2002,16(3):72-75.
DING W F, LI Z B, DING D S. Study on hydrodynamic characters of runoff in rill erosion process on slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16 (3):72-75.

[38] ALI M, STERK G, SEGER K M, et al. Effect of hydraulic parameters on sediment transport capacity in overland flow over erodible beds [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2012,16(2):591-601.

[39] 周凡凡,高建恩,王照润,等.坡面降雨径流侵蚀输沙的不平衡特性研究[J].水土保持学报,2021,35(6):95-100.
ZHOU F F, GAO J N, WANG Z R, et al. Study on unbalance characteristics of sediment transport by rainfall runoff erosion on slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2021,35(6):95-100.

[40] 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.

[41] 李宏伟,王文龙,车小力,等.非恒定流对浅沟侵蚀产沙及水动力参数的影响[J].中国水土保持科学,2011,9(6):14-21.
LI H W, WANG W L, CHE X L, et al. Effects of non-state discharge on ephemeral gully erosion sediment and hydraulic parameters[J]. Science of Soil and Water Conservation,2011,9(6):14-21.

[42] WELLS R R, MOMM H G, BENNETT S J, et al. A measurement method for rill and ephemeral gully erosion assessments[J]. Soil Scieence Society of America Journal,2016,80(1):203-214.