

乌拉山废弃矿区坡长对客土坡面产流产沙与沟蚀特征的影响

张馨予¹, 查同刚^{1,2,3}, 张泽宇¹, 裴益乐¹, 张晓霞⁴, 吴晓静⁵, 于洋^{1,2,3}

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;

2.北京市水土保持工程技术研究中心(北京林业大学),北京 100083;3.水土保持国家林业局重点实验室(北京林业大学),北京 100083;4.中建一局集团第三建筑有限公司,北京 100161;5.北京市八达岭林场,北京 102112)

摘要: 为研究不同坡长客土坡面产流产沙及沟蚀特征差异变化,通过设计2个坡度(15°,20°)下不同坡长(2,4,6,8,10 m)的野外径流小区进行冲刷试验。结果表明:(1)初始产流时间变化范围与产流停止时间均随坡长增加而增大,产流率初期快速增加,达到初次峰值后呈现不规则波动,累积产流量随坡长增加而增多;产流率、累积产流量与坡长、产流时间及其交互作用呈极显著相关($p<0.01$),累积产流量在2种坡度下均与坡长、产流时间呈幂函数相关。(2)产沙率初期快速增加,达到初次峰值后随冲刷时间逐渐下降,其均值随坡长增加而增大,总累积产沙量随坡长增加而增多;累积产沙量与坡长、产流时间的交互作用呈极显著相关($p<0.01$),累积产沙量在2种坡度下均与坡长、产流时间呈幂函数相关。(3)侵蚀沟平均横截面积自顶端呈现沿坡面减小,以及减小—增加—再减小2种趋势。累积产沙量与估算沟蚀量具有极显著相关性($p<0.01$),其差值随坡长的增加而增加,其比率随坡长增加呈先上升后下降趋势,最大值出现在6 m坡长。研究结果为矿山修复客土坡面水土流失防治及侵蚀模型建立提供技术支持。

关键词: 水土流失; 细沟; 径流; 产流产沙

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)06-0008-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.06.002

Effects of Slope Length on the Characteristics of Runoff and Sediment Yield and Gully Erosion on Alien Soil Slopes in the Abandoned Mining Area of Wula Mountain

ZHANG Xinyu¹, ZHA Tonggang^{1,2,3}, ZHANG Zeyu¹, PEI Yile¹,

ZHANG Xiaoxia⁴, WU Xiaojing⁵, YU Yang^{1,2,3}

(1.College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 3.Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 4.The Third Construction Co., Ltd. of China Construction First Group, Beijing 100161; 5.Beijing Badaling Forest Farm, Beijing 102112)

Abstract: In order to study the variation of runoff and sediment yield and gully erosion characteristics on alien soil slopes with different slope lengths in the abandoned mining area of Wula mountain, scouring tests were conducted by designing field runoff plots with different slope lengths (2, 4, 6, 8 and 10 m) under two slope gradients (15° and 20°). The results showed that: (1) The variation range of initial runoff generation time and runoff generation stop time both increased with the increasing of slope length. The runoff rate increased rapidly at the beginning and fluctuated irregularly after reaching the initial peak value. The cumulative runoff increased with the increasing of slope length. The runoff rate and cumulative runoff were highly significant ($p<0.01$) correlated with slope length and runoff generation time and their interaction, and cumulative runoff showed a power function correlation with slope length and runoff generation time under the two slope gradients. (2) The sediment rate increased rapidly at the beginning and reached the initial peak value, then decreased gradually with the increasing of scouring time, and its mean value increased with the increasing of

收稿日期:2022-04-01

资助项目:中建股份科技研发计划项目(CSECE-2020-Z-5)

第一作者:张馨予(1999—),女,在读硕士研究生,主要从事土壤退化与生态修复研究。E-mail:Zhang_xinyu_9@bjfu.edu.cn

通信作者:查同刚(1972—),男,博士,副教授,主要从事土壤退化与生态修复研究。E-mail: zhtg73@bjfu.edu.cn

slope length, and the total cumulative sediment yield increased with the increasing of slope length. The cumulative sediment yield was significantly correlated with slope length, runoff generation time and their interaction ($p < 0.01$), and the cumulative sediment yield was related to the slope length and runoff generation time as a power function under the two slope gradients. (3) The average cross-sectional area of erosion ditch from the top showed two trends of decreasing along the slope and decreasing-increasing-decreasing again. The cumulative sediment yield and the estimated gully erosion volume had a highly significant correlation ($p < 0.01$), and their difference increased with the slope length, and their ratio tended to increase firstly and then decrease with the increasing of slope length, and the maximum value appeared at 6 m slope length. The research results could provide technical support for erosion control and erosion model establishment of alien soil slopes in mine rehabilitation.

Keywords: soil and water loss; rill; runoff; runoff and sediment yield

客土覆盖已经成为废弃矿山修复工程中兼具防护与生态修复效益的一项重要措施^[1-2]。但多数废弃矿山所处的干旱半干旱地区植被恢复过程缓慢,地表裸露时期较长,覆盖客土与整治的岩质表层间缺少有机结合,稳定性不足,极易在风力与水力的作用下发生严重侵蚀,进一步加重废弃矿山水土流失。客土坡面发生侵蚀的风险与危害已然十分严峻,而坡长是影响坡面土壤侵蚀的重要因素,也是废弃矿山坡面整治中必须严格把控的关键指标。因此,对不同坡长客土坡面的产流产沙过程及其形成的沟蚀特征进行研究具有重要的实际意义。

坡长是影响坡面产流产沙的关键因素^[3],而水流造成的沟蚀是产沙的主要来源^[4]。不同学者关于坡长对产流产沙与沟蚀特征的影响研究结论尚未统一。目前研究中,随着坡长增加,产流量变化趋势包括线性增加^[5]、单位面积减小^[6-7]或先减少后增加再减少^[8]。产沙量随坡长的增加而增加,且与坡长呈线性关系^[8-9],但 Bryan 等^[10]与汪晓勇等^[11]研究认为,土壤侵蚀受坡长变化的影响要看实际细沟的发育情况,以及侵蚀量可能会由于坡面内侵蚀、搬运与沉积关系变化随坡长增加波动变化。也有研究者^[12]以存在一个使侵蚀量达到最大的临界坡长对坡长与产沙的关系进行描述。针对产沙蚀沟特征,一般认为细沟侵蚀模数与坡长呈幂函数关系^[13-14],但坡长对细沟侵蚀的影响在不同坡度与坡形条件下具有差异^[15]。

尽管目前已有针对坡面产流产沙过程及沟蚀特征的部分研究,但以矿山修复区域客土坡面为客体的

试验较为缺少,同时依据矿山修复标准设置坡长的研究分析几近空缺。因此,本研究选择在野外设置简易径流小区进行冲刷试验,探讨客土坡面产流产沙过程及侵蚀特征在不同坡长变化,意在为矿山修复客土坡面坡长设置及水土流失防治进行建议,并为废弃矿山区域水土流失预测模型建立提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区乌拉特前旗乌拉山北麓铁矿区($40^{\circ}45'20''$ — $40^{\circ}45'47''$ N, $108^{\circ}45'01''$ — $108^{\circ}46'08''$ E)(图1),属于乌梁素海流域,气候为中温带半干旱大陆性季风气候,年平均降水量 215 mm,降水多集中于 6—9 月,多年平均蒸发量为 1 716.4 mm,年平均气温 8.4°C ,土壤质地为砂壤质,土壤肥力较低。

乌拉山北麓铁矿区曾为露天开采石料区,由于长期以来重开发轻保护,原有的地形地貌景观遭到破坏,对该地区的矿山地质环境造成了严重影响。当地于 2019 年开展乌拉山北麓铁矿区矿山地质环境治理工程,属于“乌梁素海流域山水林田湖草生态保护修复工程”矿山地质环境综合整治的重点区域之一。治理坡面措施包括初步削坡、清除危岩体、回填垫坡等,其后进行客土覆盖。

研究客土坡面位于治理工程 14 km 处治理区($40^{\circ}45'26''$ N, $108^{\circ}45'18''$ E)。客土覆盖措施土源取自研究区矿山各采坑开口处,覆土厚度 $> 30\text{ cm}$ 。由于覆盖客土与整治的岩质表层间缺少有机结合,稳定性不足,流失风险严重。

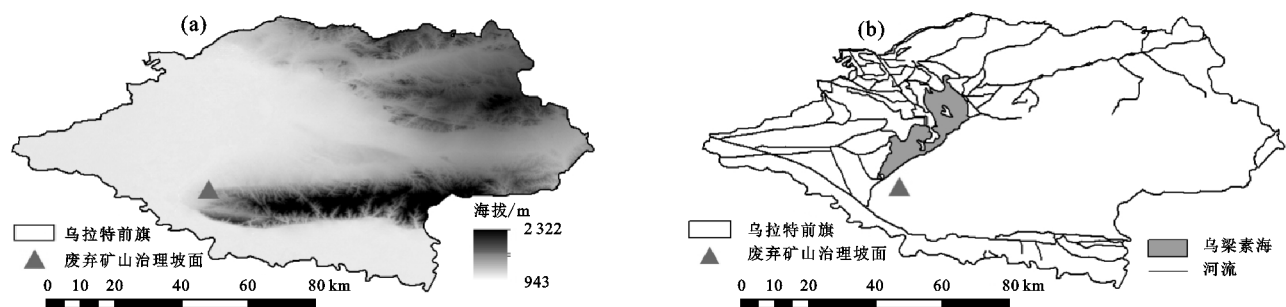


图1 研究区与试验地点示意

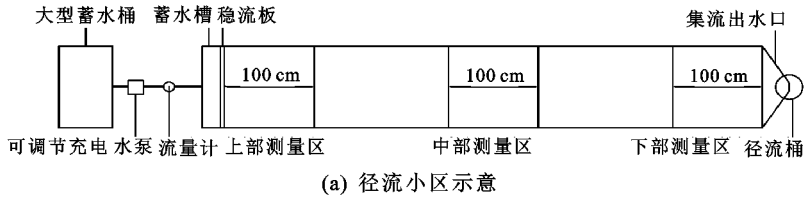
1.2 试验设计

试验于 2021 年 8—9 月于研究区进行,采取设置野外径流小区方式进行人工放水冲刷。依据野外坡面实际情况,选取同一沟道内 20°与 15°坡面。坡长依照矿山修复国家标准^[16],最终选取 2,4,6,8,10 m 长度,设置宽 1 m 的径流小区。实际具有不同规格径流小区 10 种(表 1)进行试验。根据研究区多年自然降雨频率气象资料,以 60 mm/h 降雨强度设计冲刷流量,设计总产流时间为 25 min。根据设计雨强,确定 2,4,6,8,10 m 径流小区冲刷流量分别为 2,4,6,8,10 L/min^[17]。每种规格径流小区设置相同 2 个进行重复试验,数据分析取平均值。

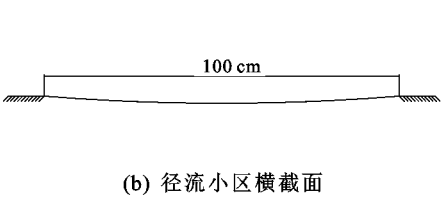
表 1 径流小区基本情况

序号	坡度/(°)	坡长/m	设计放水流量/ (L·min ⁻¹)
1	15	2	2
2		4	4
3		6	6
4		8	8
5		10	10
6	20	2	2
7		4	4
8		6	6
9		8	8
10		10	10

试验前对各个径流小区进行人工翻耕整平与压实,依照废弃矿山地形,整地后径流小区横截面呈弧状,中间略低于两侧,置于自然条件下稳定 48 h 以上。测定土壤密度为(1.26±0.04) g/cm³,土壤最大持水量为



(a) 径流小区示意



(b) 径流小区横截面

图 2 径流小区设计示意

1.4 数据分析与计算

根据测量的细沟宽和沟深,进一步计算径流小区内估算沟蚀量。据前人^[14]研究结果,细沟横断面主要为箱形,细沟体积、侵蚀量采用容积法进行计算。

$$\bar{S}=\overline{hw}$$
(1)

$$V=\sum \bar{S}L$$
(2)

$$A=V\rho$$
(3)

式中: $\bar{S}$ 为沟蚀平均横断面面积(cm²); $\bar{h}$ 为侵蚀沟平均沟深(cm); $\bar{w}$ 为平均沟宽(cm); V 为沟蚀体积(cm³); L 为单位长度(cm); A 为侵蚀沟土壤流失量(g); ρ 为土壤密度(g/cm³)。

(364±7) g/kg。土壤机械组成为黏粒 4.22%,粉粒 28.70%,砂粒 67.05%。冲刷前对坡面表层土壤均匀洒水至表面即将产流为止,控制含水率与前期测得土壤饱和含水率一致,实际控制在 27.3%~31.5%。径流小区上部挖坑放置溢流槽,溢流槽由蓄水槽与稳流板组成,蓄水槽长为 1 m,宽与深为 20 cm,蓄水槽用于蓄水消能,而稳流板则为了水流呈平面溢出并防止形成跌水。坡面下部设置上宽 1 m 的锥形集流出水口,在出水口下部挖深坑用于放置径流桶,径流桶用以收集径流泥沙混合物,便于取样。使用大型蓄水桶、可调节充电水泵和流量计供水及控制流量(图 2)。

1.3 试验过程与测量方法

试验前依据流量计显示流量调节充电水泵功率对放水流量进行控制,试验过程中控制流量误差在±5%以内,自稳流板稳定出水开始,使用秒表记录出水口初始产流时间,产流最初 2.5 min 每间隔 1 min 收集 15 s 泥沙样品,2.5 min 以后每间隔 2 min 收集 30 s 泥沙样品。在 2,4 m 长度径流小区顶部与末端设置 1 m 测量区,在 6,8,10 m 径流小区顶部、中间与末端设置 1 m 测量区,每 5 min 测量 1 次流速,起始产流后 25 min 停止放水,用秒表记录出水口产流停止时间。采用高锰酸钾染色示踪法测量坡面水流流速,500 mL 样品瓶收集径流泥沙样品,1 cm 分度值皮尺测量坡面细沟沟长,0.1 cm 分度值钢尺人工测量沟宽与沟深,测量间隔为 0.2 m。

收集的径流泥沙样品使用天平称量以及烘干法进行处理。坡面土样利用环刀法测量土壤密度与饱和含水率,利用马尔文激光粒度分析仪测量机械组成。

使用 SPSS 25 软件进行试验数据分析,Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 产流过程

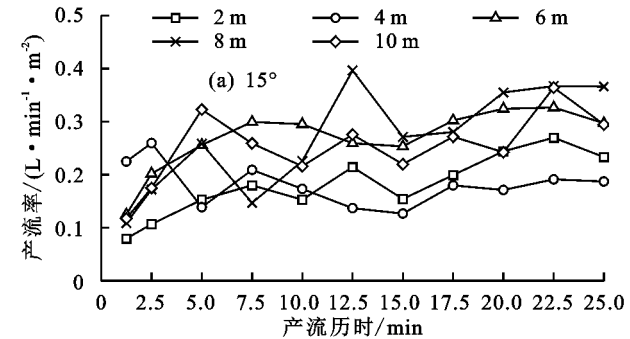
2.1.1 产流时间与坡面流速 初始产流时间在各坡面均较短,由 29~111 s 变化,总体随坡长增加而增大(表 2)。顶部与末端流速存在随坡长增加的趋势,在 15°坡度下,10 m 坡面相对于 2 m 坡面,顶部流速增加 30.50%,末端流速增加 155.76%,在 20°坡度下,其增幅分别提高到 41.89%与 189.91%。产流停止时间是停止放水后出水口依旧能够收集到径流的

时间, 试验中由 11~43 s 变化, 整体存在随坡长增大而增加的规律, 且均小于初始产流时间, 这表明冲刷格局的形成对产流具有一定提高作用。

表 2 不同径流小区初始产流时间、产流停止时间及平均流速

坡度/(°)	坡长/m	初始产流 时间/s	产流停止 时间/s	平均流速/(m·s ⁻¹)		
				顶部	中部	末端
15	2	29	15	0.237		0.244
	4	48	21	0.257		0.369
	6	86	29	0.266	0.397	0.556
	8	92	37	0.302	0.384	0.638
	10	94	40	0.309	0.394	0.624
20	2	44	11	0.239		0.298
	4	75	28	0.216		0.483
	6	67	30	0.195	0.493	0.684
	8	111	39	0.258	0.368	0.528
	10	86	43	0.338	0.421	0.864

2.1.2 产流率与累积产流量 产流率在产流初期具有



逐步提高趋势(图 3), 其第 1 个峰值均出现在 10 min 及之前, 多数出现在 5 min 处(表 3)。15°坡度下, 各坡面产流率初次峰值相对初次产流率提高 15.49%~174.88%, 在 20°坡度提高 16.59%~88.87%。产流初期由于冲刷初期坡面冲刷侵蚀沟未形成, 产流路径不固定, 分散水流的不等时汇集过程以及水流泥沙对坡面沿程微地形填洼过程的进行, 产流率逐步提高。

产流率达到初次峰值后呈现不规则波动或总体略微上升(图 3)。试验中坡面产流的损失主要有 3 个来源: 一是蒸发; 二是水流受微地形影响在坡面的停滞; 三是由于土壤表面水流停滞时间过长以及水流下切造成水分在更深土层的人渗。产流率总体上升与前期波动的原因在于前期耗水与产流并不稳定, 随着侵蚀沟形成发育速度减缓, 与水流接触土壤状态渐趋稳定。而产流后期在 8, 10 m 等较长坡面的波动则来自于侵蚀沟岸的坍塌^[17]与下部泥沙堆积对径流的影响。

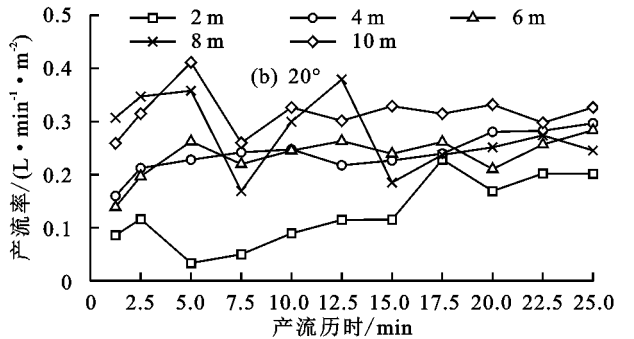


图 3 不同坡面产流率随产流时间变化

表 3 不同坡面产流产沙特征

坡度/ (°)	坡长/ m	平均产流率/ (L·min ⁻¹ ·m ⁻²)	产流初次 峰值时间/min	总累积 产流量/L	平均产沙率/ (kg·min ⁻¹ ·m ⁻²)	产沙初次 峰值时间/min	总累积 产沙量/kg	平均含沙量/ (g·mL ⁻¹)
15	2	0.189	7.5	9.466±0.509	0.047	7.5	2.345±0.389	0.234
	4	0.176	2.5	17.558±0.395	0.041	2.5	4.111±1.529	0.197
	6	0.278	7.5	41.647±8.413	0.102	5.0	15.240±0.343	0.327
	8	0.281	5.0	56.137±8.454	0.092	5.0	18.371±2.485	0.309
	10	0.261	5.0	65.280±0.697	0.134	5.0	33.461±2.487	0.418
20	2	0.130	2.5	6.520±3.523	0.029	2.5	1.431±0.948	0.230
	4	0.245	10.0	24.461±7.033	0.088	2.5	8.833±1.004	0.330
	6	0.241	5.0	36.141±7.175	0.119	5.0	17.782±2.938	0.410
	8	0.272	5.0	54.491±4.437	0.157	5.0	31.323±2.264	0.433
	10	0.319	5.0	79.625±8.615	0.179	5.0	44.664±6.735	0.445

注: 总累积产流量和总累积产沙量数据为平均值±标准差。

平均产流率在 15°坡度下表现为 4 m<2 m<10 m<6 m<8 m 坡面, 在 20°坡度下表现为 2 m<6 m<4 m<8 m<10 m 坡面, 同一坡度下 10 m 与 8 m 坡面平均产流率大于 2 m 与 4 m 坡面, 表明坡长增加对平均产流率有一定提高作用(表 3)。各坡面总累积产流量随坡长的增加而增加(表 3), 当坡长由 2 m 提高到 10 m 时, 总累积产流量在 15°与 20°坡面分别提高 5.90, 11.21 倍。

为了综合分析坡长、坡度和产流时间相互作用对客土坡面产流的综合影响^[18], 分别对产流过程中产流率及累积产流量与坡长(L)、坡度(S)、产流时间(T)、坡长—坡度交互作用(I_{LS})、坡长—产流时间交互作用(I_{LT})、坡度—产流时间交互作用(I_{ST})、坡长—坡度—产流时间交互作用(I_{LST})进行相关分析。产流率及累积产流量与除坡度以外各因素及其交

互项均呈极显著相关(表 4)。产流率与坡长、坡度和产流时间及交互作用因子相关系数表现为 $R(I_{LS})>R(L)>R(I_{LT})>R(I_{LST})>R(T)>R(I_{ST})$,表明产流率与坡长—坡度交互项关系最为密切。累积产

流量与坡长、坡度和产流时间及交互作用因子相关系数表现为 $R(I_{LT})>R(I_{LST})>R(T)>R(I_{ST})>R(L)>R(I_{LS})$,其中 $R(I_{LT})$ 与 $R(I_{LST})$ 较高,分别为 0.982 与 0.979。

表 4 产流产沙指标与坡长、坡度、产流时间及其交互项相关性分析

指标	<i>L</i>	<i>S</i>	<i>T</i>	<i>I_{LS}</i>	<i>I_{LT}</i>	<i>I_{ST}</i>	<i>I_{LST}</i>
产流率	0.580**	0.059	0.356**	0.590**	0.570**	0.337**	0.555**
累积产流量	0.620**	0.066	0.662**	0.619**	0.982**	0.655**	0.979**
产沙率	0.682**	0.271**	−0.361**	0.749**	0.041	−0.308**	0.081
累积产沙量	0.711**	0.182	0.503**	0.745**	0.911**	0.537**	0.941**

注: * 表示在 $p<0.05$ 水平上显著相关; ** 表示在 $p<0.01$ 水平上显著相关; $n=110$ 。

坡长与产流时间作为产流的密切相关因素,对其与累积产流量的关系进行研究具有重要意义。通过对试验中 15°与 20°坡度下 2~10 m 坡长及 25 min 内与累积产流量的非线性回归拟合,得出累积产流量与时间及坡长关系的表达式。

坡度为 15°:

$$M_Q=0.104T^{1.168}L^{1.182} \quad R^2=0.985 \quad (4)$$

坡度为 20°:

$$M_Q=0.107T^{0.985}L^{1.492} \quad R^2=0.995 \quad (5)$$

式中: M_Q 为累积产流量(L); T 为时间(min); L 为坡长(m)。

2.2 产沙过程

2.2.1 产沙率与累积产沙量 产沙率普遍具有初期提高、后期整体下降的趋势(图 4)。不同坡面产沙率初次峰值出现时间见表 3。产沙率初次峰值相较于首次产沙率在 15°与 20°坡面分别提高 17.02%~123.82%与

9.63%~50.81%,其差值随坡长增加具有提高趋势。而随着冲刷继续进行,产沙率下降,最终产沙率相较初次峰值在 15°坡度下降 34.84%~67.55%,在 20°坡度下降 44.37%~71.45%,在同一坡度其差值随坡长增加而增大,且除 2 m 坡面外,20°坡度下差值均大于 15°坡度同样长度坡面。这是由于冲刷前期带走大量表层易于侵蚀的土壤^[17],同时坡面上部分沟蚀发育速度与深、宽度大于坡面下部,整体造成冲刷水流下垫面坡度减小,而坡度越大,侵蚀速率越大^[19],坡面易于侵蚀物质以及水流侵蚀能力下降,产沙率降低。

产沙率随时间呈下降趋势的同时同样具有一定波动性。比较图 3 与图 4,虽然产流率与产沙率随时间呈现不同趋势,但其波动具有一定同步性。通过相关性分析,产沙率与产流率呈极显著相关($p<0.01$, $R=0.505$),这表明产沙率波动与产流率波动产生原因部分相同。

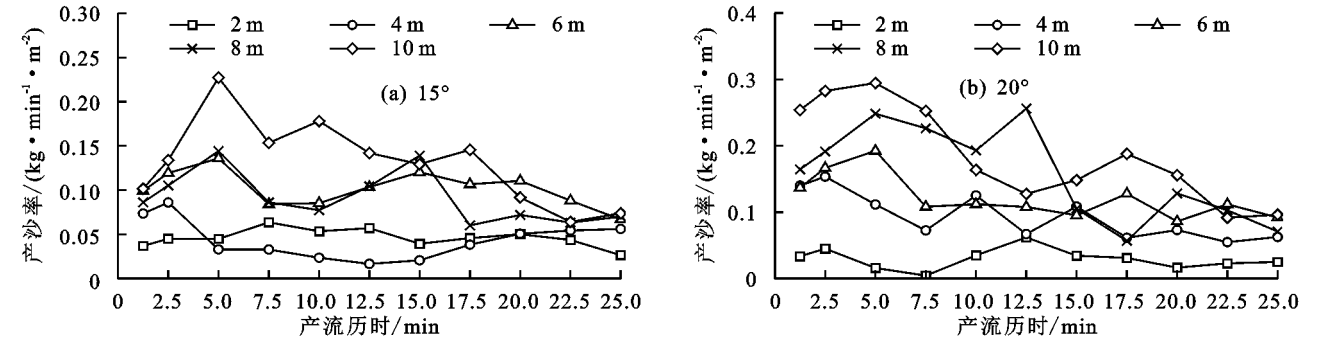


图 4 不同坡面产沙率随产流时间变化

平均产沙率在 20°坡面随坡长增加而增加,在 15°坡面随坡长增加具有增加趋势(表 2)。且除 2 m 坡面外,20°坡度下平均产沙率均大于 15°坡度同样长度坡面。这表明试验条件下,坡长与坡度的增加对产沙整体上具有提高作用,且平均产沙率随坡长增加的提高幅度受坡度的影响。总累积产沙量随坡长增加而增加(表 3),当坡长由 2 m 提高到 10 m 时,总累积产沙量在 15°坡面由 2.345 kg 提高到 33.461 kg,在 20°坡面为 1.431~44.664 kg,分别提高 13.27,30.22 倍。除 2 m 坡面外,20°坡度下各坡面同比 15°坡面同

样长度坡面,总累积产沙量增加 2.542~12.953 kg。为了综合分析坡长、坡度和产流时间相互作用对客土坡面产沙综合影响,分别对产流过程中产沙率及累积产沙量与坡长(L)、坡度(S)、产流时间(T)及其交互作用进行相关分析(表 4)。产沙率与坡长、坡度及坡长—坡度交互作用均呈极显著正相关,与产流时间、坡度—产流时间交互作用呈极显著负相关,坡长是对产沙率影响最大的因子。累积产沙量与除坡度以外各因素及其交互项均呈极显著相关,与坡长、坡度和产流时间及交互作用因子相关系数表现为 $R(I_{LST})>$

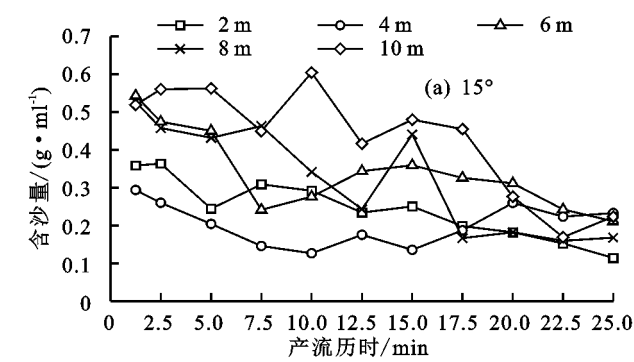
$R(I_{LT}) > R(I_{LS}) > R(L) > R(I_{ST}) > R(T)$, 其中 $R(I_{LT})$ 与 $R(I_{LST})$ 较高, 分别为 0.911 与 0.941。

坡长与产流时间作为产沙的密切相关因素, 对其与累积产沙量的关系进行研究具有重要意义。通过对试验中 15° 与 20° 坡度下 2~10 m 坡长及 25 min 内与累积产沙量的非线性回归拟合, 得出累积产沙量与时间及坡长关系的表达式。

坡度为 15° :

$$M_s = 0.020 T^{0.837} L^{2.073} \quad R^2 = 0.973 \quad (6)$$

坡度为 20° :



$$M_s = 0.060 T^{0.752} L^{1.840} \quad R^2 = 0.992 \quad (7)$$

式中: M_s 为累积产沙量 (kg); T 为时间 (min); L 为坡长 (m)。

2.2.2 含沙量 含沙量整体呈波动下降趋势(图 5)。这是由于随着冲刷的进行, 表层易于侵蚀土壤逐渐流失, 伴随产流率的略微增大, 产沙率降低, 坡面含沙量降低。平均含沙量对坡长的响应同平均产沙率具有相同规律(表 3)。利用相关分析表明, 各坡面在不同时间含沙量与产沙率呈极显著相关 ($p < 0.01, R = 0.712$)。

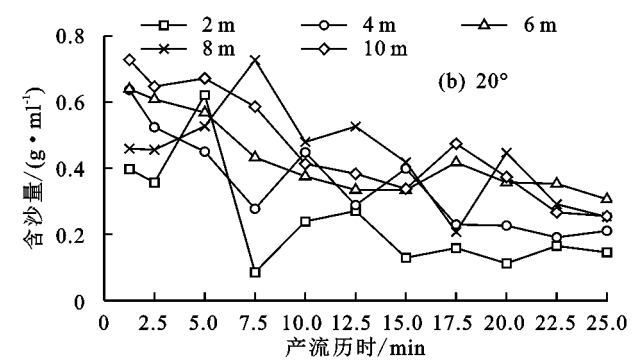


图 5 不同坡面含沙量随产流时间变化

2.3 沟蚀特征

2.3.1 侵蚀沟平均横断面积自顶端沿坡长变化 水流冲刷产生的细沟是坡面产沙的主要来源, 平均横断面面积可作为描述侵蚀沟产沙量的最优形态因子^[20]。各坡面侵蚀沟平均横断面面积均在 0~1 m 内有最大值, 其随坡长增加而增加, 且随坡度由 15° 提高到 20° 而上升(图 6)。不同坡面侵蚀沟平均横断面面积自顶端随坡面变化呈现 2 种趋势: 一类平均横

截面积沿坡面减小。例如, 15° 与 20° 坡度下 2, 4 m 坡面与 20° 坡度的 6 m 坡面; 另一类平均横截面积在 0~1 m 有最大值, 其后在 1~2 m 处急剧减小后增加再减小。例如, 15° 与 20° 坡度下 8, 10 m 与 15° 坡度的 6 m 坡面。出现此 2 类趋势的差异是由于流量越大, 流速越高, 水流侵蚀能力越强^[21-22], 但流量沿坡面减少与流速随坡面增加对水流侵蚀能力具有交互影响。

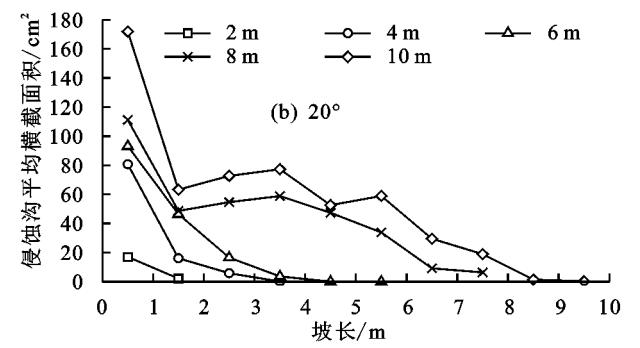
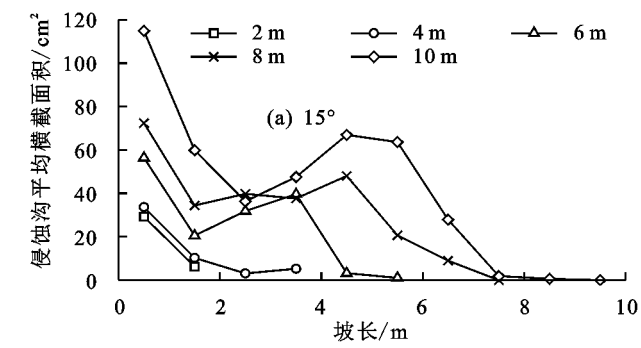


图 6 侵蚀沟平均横截面积自顶端沿坡长变化

2.3.2 侵蚀沟土壤流失量估算 坡面累积产沙量与估算沟蚀量具有极显著相关性 ($p < 0.01, R = 0.99$) (表 5)。估算沟蚀量均大于累积产沙量, 其差值随坡长增加呈增加趋势。估算沟蚀量大于累积产沙量反映了沟蚀产生的泥沙部分没有进入径流小区出口, 而是堆积于坡面内部, 试验中观测到此现象在 8, 10 m 坡面下部十分明显。2 个坡度下, 坡面累积产沙量与估算沟蚀量的比率均随坡长呈先上升后下降趋势, 最大值出现在 6 m 坡面。这表现了坡长增加对坡面侵

蚀沟蚀量占总侵蚀比率与坡面内部堆积情况的多重影响, 也意味着依照沟蚀土壤转移量对坡面整体土壤流失量进行计算会导致结果偏大。

3 讨论

3.1 客土坡面产流产沙特点

通过试验中 4 m 与 6 m 产流率与产沙率平均值推算, 客土坡面相较于康宏亮等^[20]在 14° 坡度 5 m 坡长自然坡面下 5 L/min 放水流量冲刷试验中产流率与产沙率分别降低 62.91% 与提高 96.64%, 其含沙量相对杨帆

等^[23]在 20°自然坡面 5 m 径流小区 100 mm/h 设计降雨下的试验提高 70.04%，表明客土坡面具有产流低、产沙高、水流含沙量高的特点。生产实践中废弃矿山具有较大汇流区域，降雨后冲刷是客土坡面不可避免的过程，客土坡面冲刷特点是造成沟蚀产沙具有大量内部堆积的原因。结合客土坡面产流产沙与沟蚀特征，实践生产中可以采取截短坡长，在坡面顶部与中下段采取防止侵蚀措施以及增加坡面微地形起伏提高坡面内部堆积的方式来有效减小客土流失。

表 5 不同坡面估算沟蚀量与累积产沙量					
坡度/ (°)	坡长/ m	累积 产沙量/g	估算 沟蚀量/g	差值/g	比率/%
15	2	2345	4480	-2135	52.35
	4	4111	6595	-2484	62.33
	6	15240	19235	-3995	79.23
	8	18371	33002	-14631	55.67
	10	33461	52882	-19421	63.28
20	2	1431	2400	-969	59.62
	4	8833	12928	-4094	68.33
	6	17782	20115	-2332	88.40
	8	31323	46603	-15280	67.21
	10	44664	68828	-24164	64.89

3.2 产流产沙过程与沟蚀特征对坡长的响应

水流、泥沙与土壤表面地形是侵蚀发生过程与结果中相互联系密不可分的 3 个部分。自放水开始，坡面内部即发生冲刷与侵蚀—沉积过程，由于预先使坡面达到即将产流状态，以及整地呈弧状易使径流集中，试验中初始产流时间均较短^[20]，其变化趋势与王玲玲等^[24]与钟壬琳等^[49]研究中初始产流时间随坡长增加而增大、随坡度的增大而减小的结果具有一定差异。此差异来源于不同坡长坡度下流速、内部搬运—堆积过程与产流路径的相互影响，在坡面初始产流时间差值较小的情况下，影响带来的不确定性更易凸显。

试验中产流初期，产沙率与产流率均具有提高趋势，这与张翔等^[17]在 1.5 mm/min 设计雨强、24°~32°矮土坡面研究中的 4.8 m 坡长的产流产沙具有相同趋势。然而在康宏亮等^[20]研究中，在 5~20 L/min 设计流量下产沙前期同样具有相同上升趋势，当流量增加到 25 L/min，坡面产沙率则随时间呈现下降趋势。这说明当流量增加到一定值时能够迅速产生大量冲刷而可以忽略坡面初始状态的影响。本试验随着冲刷进行，产流率提高，产沙率与含沙量下降的趋势与刘冉等^[25]、温云浩等^[26]在黄土丘陵沟壑区黄土坡面与东北黑土区横垄坡耕地试验的产流产沙结果变化相同，这也意味着侵蚀在冲刷前期更为强烈。

张翔等^[27]将产流产沙的变化趋势与坡面细沟形成相联系，认为细沟形成后产沙趋于稳定，而在本试

验中认为沟蚀形成会改变水流下垫面坡度，降低水流冲刷力，并且使坡面易于侵蚀的土壤量降低，同时泥沙在坡长较长坡面下部产生堆积，进一步减少产沙。肖培青等^[28]的研究也指出，如果上方来水含沙量达到某个临界值时，坡面将有沉积发生。但如本试验中含沙量整体下降所示，水流并非达到最大挟沙能力，那么泥沙堆积与坡面微地形^[29]以及堆积产生的微地形再作用不无关系。微地形作用同样也是影响试验中径流小区在产流产沙特征中并未完全随坡长呈线性变化的原因。以往许多研究者^[26,30-31]以水流与产沙特性对临界坡长进行表征，实际可以考虑来水流量、侵蚀对地形塑造变化、泥沙来源与土壤的可蚀性与可蚀量，将产流—产沙—坡面侵蚀地形视为一体相互作用以打破研究区域与坡度等其他因素的限制。

本试验中坡面累积产沙量与估算沟蚀量的比率均随坡长呈先上升后下降趋势，最大值出现在 6 m 坡面。累积产沙量表现水流在出水口的挟沙能力，而估算沟蚀量则表现水流在坡面对土壤的剥离能力，二者在不同坡长的比率变化一定程度上表现冲刷条件下水流在剥离与搬运土壤颗粒的能量对比。在实际应用中可以依据此比率为界限，进行坡面内部土壤搬运—堆积的防治。

郑粉莉等^[32]研究将本文中观测侵蚀沟类别定义为主细沟。已有研究^[28,33]证明，上方来水对细沟侵蚀的重要影响，而本试验采用冲刷条件则模拟了这种作用。由于径流小区设置两边略高于中间，汇流使径流集中产生 1 条水流并进一步形成 1 条侵蚀沟，沟中水流具备部分明渠流特征^[34]。本试验中汇流部分、集中水流部分特征与侵蚀沟上部侵蚀、中间段侵蚀以及下端产生堆积部位特征具有对应关系，这种关系随坡长增加更为明显。

4 结论

(1)初始产流时间与产流停止时间变化范围分别为 29~111, 11~43 s，随坡长增加具有增大趋势。产流率初期快速提高其后呈现波动趋势，其平均值随坡长增加而总体增加。总累积产流量随坡长由 2 m 提高至 10 m，在 15°与 20°坡面分别提高 5.90, 11.21 倍。产流率及累积产流量与本研究除坡度以外各因素及其交互项均呈极显著相关，累积产流量在 15°与 20°坡面分别可用 $0.104T^{1.168}L^{1.182}$ 和 $0.107T^{0.985}L^{1.492}$ 计算。

(2)产沙率呈初期提高其后下降趋势，其平均值随坡长增加具有增加趋势。当坡长由 2 m 提高到 10 m 时，总累积产沙量在 15°坡面与 20°坡面分别提高 13.27, 30.22 倍。含沙量随时间整体呈波动下降趋势。产沙率与坡长、坡度及坡长—坡度交互作用均呈极显著正相关，与产流时间、坡度—产流时间交互作用呈极显著负

相关。累积产沙量与本研究除坡度以外各因素及其交互项均呈极显著相关,在 15° 与 20° 坡面分别可用 $0.020T^{0.837}L^{2.073}$ 和 $0.060T^{0.752}L^{1.840}$ 计算。

(3)侵蚀沟平均横截面积自顶端在 15° 与 20° 坡度下2,4 m坡面与 20° 坡度的6 m坡面沿坡面减小,在 15° 与 20° 坡度下8,10 m与 15° 坡度的6 m坡面呈减小—增加—再减小趋势。累积产沙量与估算沟蚀量呈极显著相关,其差值随坡长的增加而增加,其比率随坡长呈先上升后下降趋势,最大值出现在6 m坡长。

参考文献:

- [1] 李贤,王福德,张江华,等.青南高原砂金矿地质环境恢复治理模式探讨[J].中国矿业,2013,22(10):73-75,79.
- [2] 何志华,柏明娥,高立旦,等.浙江海宁鼠尾山露采废弃矿山植被修复的群落结构和持水效应研究[J].林业科学研究,2008(4):576-581.
- [3] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J].Soil Science Society of America Journal,2000,64(5):1759-1763.
- [4] 朱显谟.黄土区土壤侵蚀的分类[J].土壤学报,1956(2):99-115.
- [5] 付兴涛,姚璟.降雨条件下坡长对陡坡产流产沙过程影响的模拟试验研究[J].水土保持学报,2015,29(5):20-24.
- [6] Lal R. Effects of slope length on runoff from alfisols in Western Nigeria[J].Geoderma,1983,31(3):185-193.
- [7] Giesen De van N C, Stomph T J, Ridder de N. Scale effects of Hortonian overland flow and rainfall-runoff dynamics in a West African catena landscape[J].Hydrological Processes,2000,14(1):165-175.
- [8] 郭新亚,张兴奇,顾礼彬,等.坡长对黔西北地区坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2015,29(2):40-44.
- [9] Kara O, Sensoy H, Bolat I. Slope length effects on microbial biomass and activity of eroded sediments[J]. Journal of Soils and Sediments,2010,10(3):434-439.
- [10] Bryan R B, Poesen J W A. Laboratory experiments on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development[J].Earth Surface Processes and Landforms,1989,14(3):211-231.
- [11] 汪晓勇,郑粉莉.黄土坡面坡长对侵蚀—搬运过程的影响研究[J].水土保持通报,2008,28(3):1-4.
- [12] 廖义善,蔡强国,程琴娟.黄土丘陵沟壑区坡面侵蚀产沙地形因子的临界条件[J].中国水土保持科学,2008,6(2):32-38.
- [13] Leuven G G. Rill erosion on arable land in Central Belgium: Rates, controls and predictability[J].Catena, 1991,18(2):133-155.
- [14] 王志强,杨萌,张岩,等.暴雨条件下黄土高原长陡坡耕地细沟侵蚀特征[J].农业工程学报,2020,36(12):129-135.
- [15] 郑粉莉,唐克丽,周佩华.坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究[J].土壤学报,1989,26(2):109-116.
- [16] 环境保护部.HJ 651—2013 矿山生态环境保护与恢复治理技术规范(试行)[S].北京:中国环境科学出版社,2013:4-5.
- [17] 张翔,高照良.不同坡长条件下壤土堆积体坡面产流产沙过程[J].水土保持研究,2018,25(6):79-84,93.
- [18] 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.
- [19] 钟壬琳,张平仓.人工降雨和放水冲刷试验下红壤坡面径流与泥沙特征分析[J].长江科学院院报,2019,36(2):33-38.
- [20] 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.
- [21] 栾莉莉,张光辉,王莉莉,等.基于水流功率的坡面流挟沙力模拟[J].泥沙研究,2016(2):61-67.
- [22] 郭星星,吕春娟,陈丹,等.降雨强度和坡度对裸露铁尾矿砂坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):23-29.
- [23] 杨帆,张洪江,程金花,等.基于模拟降雨的北京褐土坡地土壤团粒流失特征试验[J].农业机械学报,2016,47(8):137-145,215.
- [24] 王玲玲,范东明,王文龙,等.水蚀风蚀交错区不同坡长坡面产流产沙过程[J].人民黄河,2016,38(3):72-75,79.
- [25] 刘冉,余新晓,蔡强国,等.黄土丘陵沟壑区黄土坡面侵蚀过程及其影响因素[J].应用生态学报,2021,32(8):2886-2894.
- [26] 温云浩,刘铁军,马林芊,等.东北黑土区横垄坡耕地的产流产沙过程[J].水土保持通报,2021,41(6):63-70.
- [27] 张翔,高照良,杜捷,等.工程堆积体坡面产流产沙特性的现场试验[J].水土保持学报,2016,30(4):19-24,32.
- [28] 肖培青,郑粉莉.上方来水来沙对细沟侵蚀产沙过程的影响[J].水土保持通报,2001,21(1):23-25,38.
- [29] 唐辉,李占斌,李鹏,等.模拟降雨下坡面微地形量化及其与产流产沙的关系[J].农业工程学报,2015,31(24):127-133.
- [30] 左烽林,钟守琴,冉卓灵,等.紫色土丘陵区新改土坡面产流产沙及水动力学参数特征[J].水土保持学报,2018,32(1):59-66.
- [31] 蔡强国.坡长在坡面侵蚀产沙过程中的作用[J].泥沙研究,1989,34(4):52-56.
- [32] 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.
- [33] 王颢霖,焦菊英,唐柄哲,等.陕北子洲“7·26”暴雨后坡耕地细沟侵蚀及其影响因素分析[J].农业工程学报,2019,35(11):122-130.
- [34] 张科利,唐克丽,王斌科.黄土高原坡面浅沟侵蚀特征值的研究[J].水土保持学报,1991,5(2):8-13.