

工程堆积体坡面侵蚀过程及水动力指标对入流形式的响应

陈岳岩¹, 马宝红¹, 栾新龙¹, 魏晓兰¹, 吴旭^{1,2}, 牛耀彬^{1,2}

(1. 山西农业大学资源环境学院, 山西 太谷 030801; 2. 土壤健康山西省实验室, 山西 太原 030031)

摘要: [目的] 为揭示不同入流形式对坡面侵蚀产沙及其水动力学特性的影响。[方法] 基于人工模拟入流冲刷试验, 试验设计 2 种入流形式(股流、面流)和 3 种入流量(4、8、12 L/min), 研究坡面侵蚀过程对入流形式响应机制。[结果] 1) 股流和面流下, 坡面产流产沙过程基本一致, 产流过程均呈现从跃变到稳定, 产沙过程呈现先快速降低再波动减小趋势; 相比面流, 土壤侵蚀率在股流下表现出更强的波动性, 其变异系数高达 71.49%~111.94%。2) 坡面平均流速在股流下显著高于面流($p<0.05$), 其幅度高达 28.15%~52.85%。3) 股流和面流下, 坡面流型一致, 均为过渡流和紊流并存, 而坡面流态存在显著差异, 股流呈急流, 面流呈稳流。4) 2 种入流形式下, 土壤侵蚀速率与雷诺数、阻力系数、径流剪切力、径流功率、径流单位能量均存在极显著正相关($p<0.01$)。但最佳水动力学指标存在差异, 面流为径流功率($R^2=0.68$), 而股流为径流剪切力($R^2=0.80$)。5) 相比面流, 股流坡面土壤可蚀性指标 K_r 、 K_w 和 K_e 分别增加 166.67%、81.25% 和 113.86%, 对应的临界水动力阈值(τ_0 、 ω_0 、 ϵ_0) 分别增加 19.78%、40.70%、42.11%。[结论] 入流方式为股流表现出更强的紊动性, 具有更高的侵蚀能量, 引发严重的水土流失。研究结果有助于揭示入流形式对坡面侵蚀过程的影响机理, 对不同入流方式下坡面侵蚀预测模型的建立提供重要的理论依据。

关键词: 入流形式; 股流; 面流; 水动力学参数; 工程堆积体; 土壤侵蚀

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

Response of Erosion Processes and Hydrodynamic Indicators to Inflow Patterns on Engineering Accumulation Slopes

CHEN Yueyan¹, MA Baohong¹, LUAN Xinlong¹, WEI Xiaolan¹, WU Xu^{1,2}, NIU Yaobin^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China;

2. Soil Health Laboratory in Shanxi Province, Taiyuan 030031, China)

Abstract: [Objective] To reveal the effects of different inflow patterns on slope erosion, sediment yield, and their hydrodynamic characteristics. [Methods] Based on simulated inflow scouring experiments, two inflow patterns (concentrated flow and sheet flow) and three flow rates (4, 8, and 12 L/min) were designed to investigate the response mechanisms of slope erosion processes to inflow patterns. [Results] 1) Under concentrated flow and sheet flow, the slope runoff and sediment yield processes were basically consistent. The runoff yield process shifted abruptly and then stabilized, while the sediment yield process showed an initial rapid decline and then diminished with fluctuations. Compared with sheet flow, the soil erosion rate under concentrated flow exhibited stronger fluctuations, with coefficients of variation ranging from 71.49% to 111.94%. 2) The average flow velocity on the slope under concentrated flow was significantly higher than that under sheet flow ($p<0.05$), with differences ranging from 28.15% to 52.85%. 3) Under both concentrated flow and sheet flow, the slope flow types were consistent, both showing the coexistence of transitional flow and turbulent flow. However, significant differences existed in the slope flow regimes: concentrated flow showed supercritical flow, while sheet flow

收稿日期: 2025-03-28

修回日期: 2025-04-25

录用日期: 2025-05-21

资助项目: 国家自然科学基金项目(42207397); 山西省基础研究计划青年项目(20210302124074, 20210302124373)

第一作者: 陈岳岩(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 13734017176@163.com

通信作者: 牛耀彬(1990—), 男, 副教授, 博士, 硕士研究生导师, 主要从事工程建设区人为侵蚀过程研究。E-mail: 15529021275@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

showed subcritical flow. 4) Under both inflow patterns, soil erosion rates were extremely significantly positively correlated ($p < 0.01$) with Reynolds number, resistance coefficient, runoff shear stress, stream power, and runoff unit energy. However, the optimal hydrodynamic indicators differed: stream power ($R^2 = 0.68$) for sheet flow and runoff shear stress ($R^2 = 0.80$) for concentrated flow. 5) Compared with sheet flow, the slope soil erodibility indices (K_r , K_ω , and K_ϵ) under concentrated flow increased by 166.67%, 81.25%, and 113.86%, respectively, and the corresponding critical hydrodynamic thresholds (τ_0 , ω_0 , ϵ_0) increased by 19.78%, 40.70%, and 42.11%, respectively. [Conclusion] Concentrated flow shows stronger turbulence and higher erosion energy, leading to severe soil erosion. These findings help reveal the influencing mechanisms of inflow patterns on slope erosion processes and provide a crucial theoretical basis for developing slope erosion prediction models under different inflow patterns.

Keywords: inflow patterns; concentrated flow; sheet flow; hydrodynamic parameters; engineering accumulation; soil erosion

Received: 2025-03-28

Revised: 2025-04-25

Accepted: 2025-05-21

工程堆积体作为生产建设项目形成的人为堆积地貌^[1],因快速堆积、分层碾压的施工工艺,形成其独特“平台—陡坡”构成,已成为生产建设项目新增水土流失的重要来源^[2]。大型堆积体平台为径流的汇集创造了有利条件,特别是在极端降雨条件下,平台因重型机械碾压导致土壤结构缺失^[3],透水性极差,促使降雨极易汇集形成径流,在平台边缘处以不同的入流方式进入陡坡。在相对平整的坡面以面流形式产生侵蚀,而在地形低洼凹陷的区域以股流形式引发严重的水土流失,更有甚者,诱发堆积体坡面滑塌、滑坡和泥石流^[4-5],严重威胁区域生态安全与工程稳定性。

近年来,国内外学者围绕工程堆积体形态构成^[6-7]、下垫面特征^[8-11]、侵蚀形态^[12-14]及水动力学机制^[15-23]开展大量研究,取得丰硕的研究成果。其中,具有“平台—陡坡”构成的工程堆积体坡面产流产沙量显著高于锥状堆积体^[6]。下垫面构成显著影响堆积体坡面侵蚀过程^[8],砾石对于堆积体坡面侵蚀调控的效益显著^[10],主要表现为增加地表粗糙度、降低径流的挟沙能力^[11]。堆积体坡面侵蚀形态的发育受下垫面构成^[12]、降雨强度^[13]、径流流量^[15-16]及交互效应的影响^[17]。堆积体侵蚀形态主要存在沟头溯源、沟床下切和沟岸扩张阶段性的演化模式。同时,侵蚀形态的变化受径流能量耗散规律的控制。为进一步揭示堆积体坡面侵蚀水动力机理,研究者主要尝试建立水动力学参数与侵蚀泥沙和侵蚀形态等的量化关系。其中,流速与水深是表征水动力学特性的基础参数^[18-19],研究^[20]发现,入流形式显著影响坡面流程流态,在缓坡条件下,面状入流呈缓流,而股状入流呈现急流。然而,入流形式对坡面流的影响在陡坡条件是否存在类似规律尚不清楚。面状入流形式

下,预测土壤剥蚀率的最佳水动力学参数的选择尚未形成统一共识^[21],研究者^[22-23]发现,径流剪切力和水流功率均可以表征土壤剥蚀过程。但是,股流形式下,预测土壤剥蚀率的最佳水动力学参数有待进一步探究,更缺乏2种入流形式下侵蚀过程与径流水动力学特性响应的对比研究。特别是平台—陡坡模式的工程堆积体而言,平台汇水极易形成不同的入流形式,在不同入流形式下坡面侵蚀水动力学机理的研究亟待开展。

因此,本研究以工程堆积体为研究对象,采用人工模拟径流冲刷试验,旨在:1)揭示股流和面流下堆积体坡面侵蚀过程的动态变化特征;2)量化股流和面流下侵蚀过程中径流水动力特性;3)对比分析不同入流形式对坡面侵蚀产沙与径流能量的响应差异。本研究以期提升对“平台—陡坡”模式工程堆积体坡面土壤侵蚀过程的认识,为工程堆积体坡面水土流失防治措施的科学配置提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在山西农业大学资源环境学院实验站(37°25'26"N, 112°34'32"E)人工降雨大厅内进行。试验区地处大陆性半干旱季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季降水集中。多年平均降水量为550 mm,年平均气温9.9℃,无霜期为175 d。试验选用的模拟土体是山西农业大学资环学院试验站人工模拟降雨大厅修筑工程时基坑开挖过程中产生的临时弃土堆积体,能够代表黄土高原常见土方开挖工程弃土堆积体。试验材料经自然风干后,过6 mm筛备用,主要是为剔除土体中的杂草和枯枝落叶。采用激光粒度分析仪(Mastersizer 3000)测定其颗粒组成。土

体颗粒粒径 2.0~0.05、0.05~0.02、0.02~0.01、0.01~0.005、0.005~0.002、<0.002 mm 质量分数依次为 25.84%、36.56%、13.87%、9.22%、6.93%、7.58%。

1.2 试验设计及流程

试验设计 2 种坡面入流形式(面流、股流)和 3 个流量梯度(4、8、12 L/min),重复 2 次,共计 12 场。基于现有研究^[7]和课题组多年的调查研究结果^[17],设定坡度为 36°。基于黄土高原侵蚀性降雨标准($I_5 \geq 0.852$ mm/min, $I_{15} \geq 0.852$ mm/min)^[24],同时根据已有研究^[17]单宽流量(8~24 L/min)得到本试验(土槽宽度 0.5 m)放水流量(4、8、12 L/min)。试验装置由可变坡度土槽(尺寸为 2.0 m×0.5 m×0.35 m)、蓄水池、水泵、入流管等组成。本研究采用人工模拟入流冲刷试验,采用稳流槽模拟面状入流;采用直管导入法模拟股状入流(图 1)。

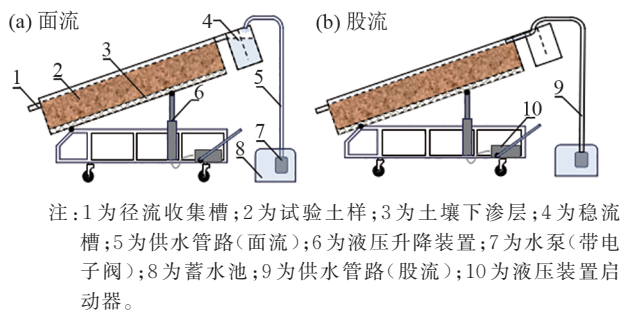


图 1 室内冲刷试验装置示意

Fig. 1 Indoor scouring experimental apparatus

试验在 2024 年 7 月 10 日至 8 月 15 日开展。试验采用分层压实法填筑试验土槽,土槽装填时,底部先铺设 5 cm 厚细砂层,然后覆上 1 层土工布,在土工布上每隔 5 cm 装填试验土体,为避免不同土层出现明显分层,装填过程中采用铁耙将每一土层表面进行打毛处理,保持土体的一致性。试验期间,实测土体物理参数严格控制在设计阈值内,土体体积质量为 (1.41 ± 0.02) g/cm³。

试验前 1 d,采用洒水器均匀洒水,直至坡面表层将要进行蓄满产流,随后用塑料布苫盖 24 h。经测量,土体的前期水土体积分数为 $(15.87 \pm 0.33)\%$ 。试验小区按照坡长设定 3 个观测断面,在断面位置测定水流流速、细沟形态等指标。试验开始前,采用径流桶对入流量进行 3 次测定,控制误差在 3% 之内,同时在蓄水池和稳流槽中布设水温计测定平均水温。在坡面产流开始时立即开始计时,前 3 min 内每 1 min 测定 1 次流速,同时用 1 000 mL 量筒收集径流泥样并记录取样时长,3 min 后每隔 3 min 测定 1 次。形态参数观测采用钢尺直接测量法获取径流宽度、沟道宽度和深度;流速测定应用 KMnO₄ 染色示踪法,

所测的流速乘以对应校正系数,求得断面平均流速。试验结束后将采集的径流泥样静置 12 h 进行固液分离,去除上清液后将沉积物置入恒温为 105 °C 的烘箱烘干至恒重,并称量泥沙质量。

1.3 指标计算与处理

1) 产流率:单位时间坡面的径流量。

$$R_r = Q / (t / 60) \quad (1)$$

式中: R_r 为产流率,L/min; V 为时间 t 内收集的径流体积,L; t 为接样时间,s。

2) 土壤侵蚀率:单位时间单位面积的土壤侵蚀量。

$$S_r = M / (t \times A) \quad (2)$$

式中: S_r 为土壤侵蚀率,kg/(m²·s); M 为时间 t 内收集的泥样干重,kg; A 为侵蚀沟面积,可用平均沟宽与沟长的乘积表示,m²。

3) 流速:采用最大流速校正法。

$$v = k \times v_{\max} \quad (3)$$

式中: v 为径流平均流速,m/s; $v_{\max}$ 为染色示踪法测定的表面最大流速,m/s; k 为修正系数,取 0.7。

4) 径流深:由于试验过程中坡面水流为面流和细沟流,断面径流深不易准确测量。因此,由公式(4)计算:

$$h = Q / (1000 d \times v \times t) \quad (4)$$

式中: h 为径流深,m; d 为过水断面平均宽度,m。

5) 雷诺数及弗劳德数:

$$Re = v \times h / \gamma \quad (5)$$

$$Fr = v / \sqrt{g \times h} \quad (6)$$

式中: Re 为雷诺数,表征坡面流的紊动程度; Fr 为弗劳德数,表征坡面流的流态; γ 为流体黏性系数,与温度相关,m²/s; g 为重力加速度,取 9.8 m/s²。

6) Darcy-weisbach 阻力系数:

$$f = 8g \times h \times J / v^2 \quad (7)$$

式中: f 为 Darcy-weisbach 阻力系数; J 为水力坡度,m/m,使用坡度的正弦值近似代替。

7) 水流剪切力,产生土壤颗粒分离和泥沙运移的径流冲刷力:

$$\tau = \rho \times g \times R \times J \quad (8)$$

式中: τ 为水流剪切力,Pa; R 为水力半径,m,使用水深 h 代替。

8) 径流功率,作用于单位面积的水流消耗的功率:

$$\omega = \tau \times v \quad (9)$$

式中: ω 为径流功率,N/(m·s)。

9) 径流单位能量,以过水断面最低点作基准面的单位水重的动能及势能之和。

$$\epsilon = 0.5(a \times v^2 / g) + h \quad (10)$$

式中: ϵ 为径流单位能量,cm; a 为校正系数,取值为 1。

10) 增率系数:

$$G_x=[(X_g-X_m)/X_m]\times 100\%$$
 (11)

式中: G_x 为水流在股流形式下 X 指标的增率系数, %; X_g 为水流在股流形式下 X 指标的数值; X_m 为水流在面流形式下 X 指标的数值。

使用 SPSS 26.0 软件进行数据统计分析, 用 Excel 2019 和 Origin 2022 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 坡面产流产沙

2.1.1 产流特征 坡面产流过程是解析工程堆积体土壤侵蚀机制的关键环节。不同入流形式(面流、股流)下产流均呈现从初期跃变到稳定波动 2 个阶段特征(图 2)。产流前期, 股流下, 产流率跃变期主要集

中在 0~3 min, 而面流下产流跃变在 0~6 min, 之后产流率呈稳定波动。产流稳定波动期, 相比面流, 股流下产流的变化幅度较大。中流量(8 L/min)下面流的产流率为 7.54~9.33 L/min, 股流的产流率为 6.92~8.70 L/min; 在大流量(12 L/min)下面流的产流率为 11.62~12.99 L/min, 股流的产流率为 10.12~12.71 L/min。在面流下, 坡面侵蚀从面蚀逐渐转变沟蚀。因侵蚀沟形成和发育, 面状径流有一个逐渐汇集形成股流的过程。在股流下, 径流进入坡面呈集中状态, 迅速剥离土壤颗粒, 短时间内坡面形成完整的侵蚀沟, 因此, 股流的跃变历时要小于面流。径流汇集后, 坡面侵蚀主要以下切-横向侵蚀周期性发生。面流下, 坡上部位多条细沟分散径流能量, 使得侵蚀波动程度低于股流。

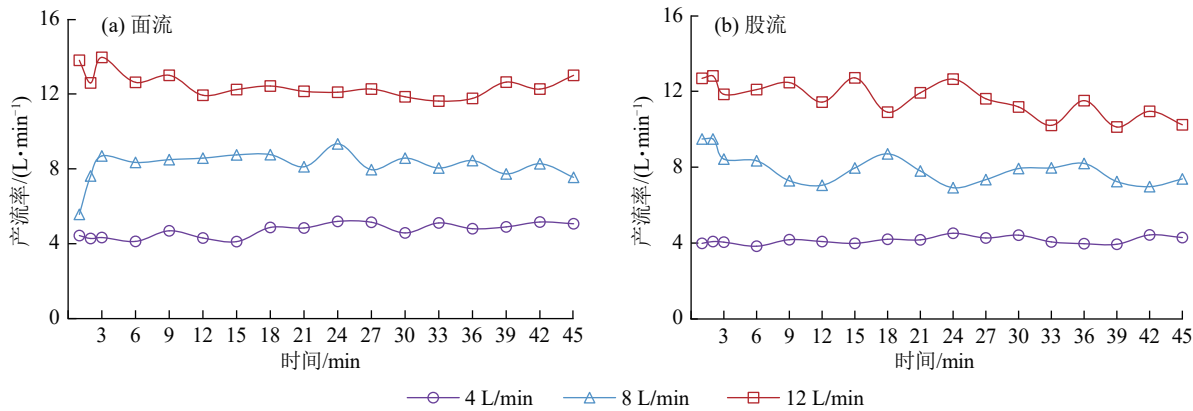


图 2 不同入流形式下的坡面产流过程

Fig. 2 Slope runoff yield process under different inflow patterns

面流和股流下坡面产流增率和波动性具有显著差异(表 1)。相比面流, 股流下坡面产流率分别降低 11.85%、3.10%、7.01%。面流下坡面产流过程的变异系数为 5.25%~9.95%, 股流下产流率的变异系数为 4.60%~

10.09%。在中流量(8 L/min)和大流量(12 L/min)条件下, 股流下坡面产流过程的变异系数相比面流分别提高 4.83%、3.24%。因此, 相比面流, 股流下水力侵蚀过程中坡面产流率低, 产流过程的波动性较高。

表 1 不同入流形式坡面产流差异

Table 1 Differences in slope runoff yield under different inflow patterns

入流形式	流量/(L·min ⁻¹)	产流率					增率系数/%	变异系数/%
		最小值/(L·min ⁻¹)	最大值/(L·min ⁻¹)	平均值/(L·min ⁻¹)	标准误			
面流	4	4.11	5.19	4.70	0.09	—	—	8.03
	8	5.57	9.33	8.16	0.20	—	—	9.95
	12	11.62	13.95	12.48	0.16	—	—	5.25
股流	4	3.83	4.52	4.14	0.05	-11.85	—	4.60
	8	6.92	9.49	7.91	0.19	-3.10	—	10.09
	12	10.12	12.81	11.60	0.22	-7.01	—	7.84

2.1.2 产沙特征 工程堆积体坡度陡峭, 土壤团聚体结构稳定性差, 在径流作用下陡坡极易发生严重土壤侵蚀。不同入流形式下, 堆积体边坡反映不同侵蚀产沙特征(图 3)。在面流和股流下, 堆积体坡面土壤侵蚀率随冲刷时间呈初期快速降低、后期波动

减小 2 个阶段。在产流初期, 地表平坦, 较低的地表糙度提升径流侵蚀能量, 土壤侵蚀率较高, 坡面快速形成细沟, 径流对细沟不断下切侵蚀和横向侵蚀。侵蚀沟的发育增加地表糙度, 减缓径流流速, 消耗径流能量, 同时随着时间的增加表层土体颗粒被逐渐

剥离,使得坡面产沙随时间呈减小趋势。

产沙初期,面流坡面土壤侵蚀率在0~15 min呈快速降低阶段,降低历时随入流量增加而减小。股流坡面产沙呈快速减低的变化状态主要集中在0~6 min。是由于面流下,侵蚀形态从多条浅沟、细沟再向细沟汇集逐渐转变,其径流能量在坡面存在均一到集中的变化过程。随着入流量的增加,径流能量对坡面细沟侵蚀剧烈,径流从面流到股流的转变过程加快,

减少快速降低阶段时间。股流坡上部位固定径流流路自产沙初期已形成,坡面产沙快速降低阶段无明显差异。产沙后期,产沙率随时间增加呈波动减低趋势,呈“多峰多谷”(图3)。股流产沙率波动幅度和频率明显高于面流。相比面流,股流径流快速形成固定流路后,不断进行横向掏蚀和下切侵蚀,诱发沟壁失稳坍塌,造成产沙率大幅波动的趋势,且流量越大,产沙波动变化范围越大。

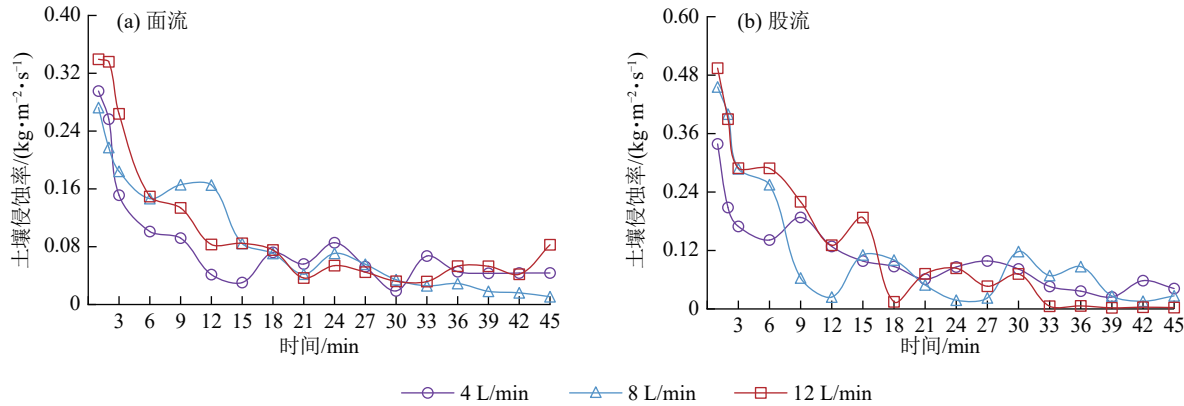


图3 不同入流形式下的坡面产沙过程

Fig. 3 Slope sediment yield process under different inflow patterns

面流和股流下坡面土壤侵蚀率的增率和波动性(表2)可得,面流和股流下坡面土壤侵蚀率随流量的增加而增加。相比面流,股流下坡面土壤侵蚀率分别增加26.65%、32.33%、21.83%。面流下坡面土壤侵蚀率

的变异系数为85.44%~92.14%,属于中等变异。股流下坡面土壤侵蚀率的变异系数为71.49%~111.94%,属于强变异。表明相比面流,股流提高水力侵蚀过程中坡面的土壤侵蚀率,增强侵蚀产沙的紊动性。

表2 不同入流形式下坡面产沙差异

Table 2 Differences in slope sediment yield under different inflow patterns

入流形式	流量/(L·min ⁻¹)	土壤侵蚀率					
		最小值/(kg·m ⁻² ·s ⁻¹)	最大值/(kg·m ⁻² ·s ⁻¹)	平均值/(kg·m ⁻² ·s ⁻¹)	标准误	增率系数/%	变异系数/%
面流	4	0.019	0.295	0.088	0.019	—	88.31
	8	0.011	0.273	0.095	0.020	—	85.44
	12	0.032	0.339	0.111	0.025	—	92.14
股流	4	0.025	0.339	0.111	0.019	26.65	71.49
	8	0.016	0.456	0.125	0.034	32.33	110.51
	12	0.002	0.494	0.136	0.037	21.83	111.94

2.1.3 侵蚀形态特征 面流、股流形式下坡面侵蚀形态特征体现明显的差异(图4)。面流下,坡面侵蚀形态主要呈不连续的跌坎和细沟,分布在坡面中下部,在小流量下,坡面侵蚀主要发生在坡面上部;而股流下,全坡面出现连续的侵蚀沟形态。相比面流,股流下坡面侵蚀过程发育剧烈。

2.2 径流量与泥沙量

股流和面流下累积径流与泥沙存在显著线性正相关($p<0.01$),决定系数(R^2)均在98%以上(图5)。将拟合曲线斜率定义为径流产沙能力(runoff sediment yield capacity, R_{sc})。在小流量(4 L/min),中流量(8 L/min)和大流量(12 L/min)条件下,相比

面流,股流下径流产沙能力分别增加44%、6%、122%。同时,大流量(12 L/min)条件下,在径流达到358 L后股流下累积泥沙量出现明显转折点。是因为股流下径流能量集中,土壤剥离、搬运、产沙过程迅速,侵蚀沟已形成稳定形态,径流产沙能力从0.20 kg/L快速降低到0.003 kg/L,泥沙增量趋近稳定。

径流量和泥沙量对入流形式的响应有较大差异(表3)。相同流量下,股流下径流量相比面流降低6.43%~12.44%,而股流下泥沙量均高于面流,泥沙量增率为8.28%~38.37%。其中小流量(4 L/min)、和大流量(4 L/min),相比面流,股流下径流量分别减少12.44%和6.96%,泥沙量增加24.79%和38.37%。

相比股流,面流下径流在侵蚀过程中易形成稳定流路,同时,坡上部位径流能量较分散,抑制沟道系统的横向侵蚀和下切侵蚀,从而加速径流输移而减少侵蚀产沙。

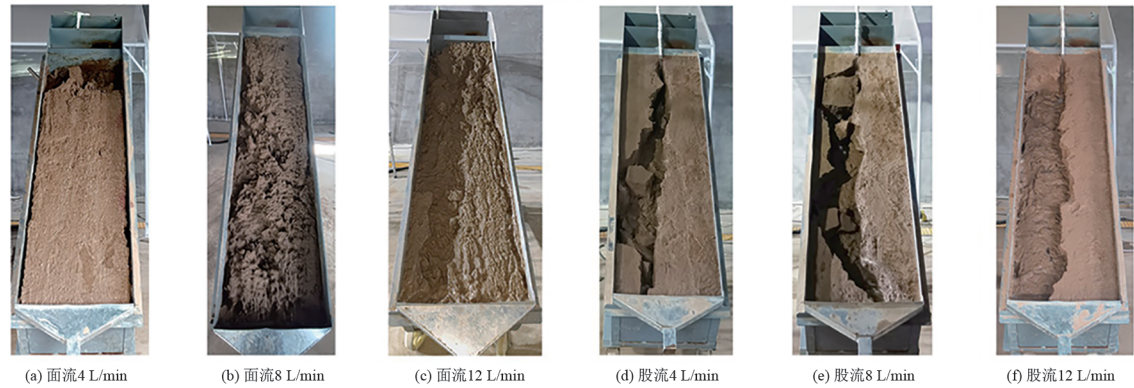


图 4 不同入流形式下坡面侵蚀形态特征

Fig. 4 Morphological characteristics of slope erosion under different inflow patterns

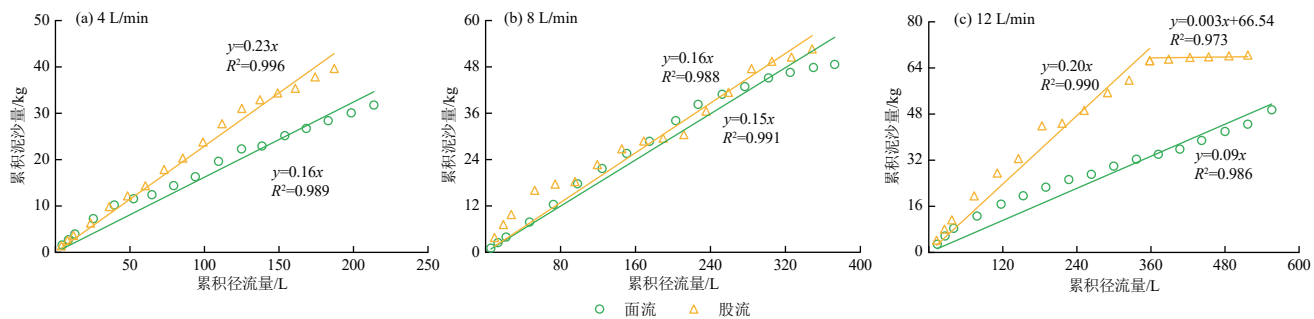


图 5 不同入流形式下累积产沙量与累积径流量的关系

Fig. 5 Relationship between cumulative sediment yield and cumulative runoff volume under different inflow patterns

表 3 不同入流形式下径流与泥沙的增率系数

Table 3 Increase rate coefficients of runoff and sediment under different inflow patterns

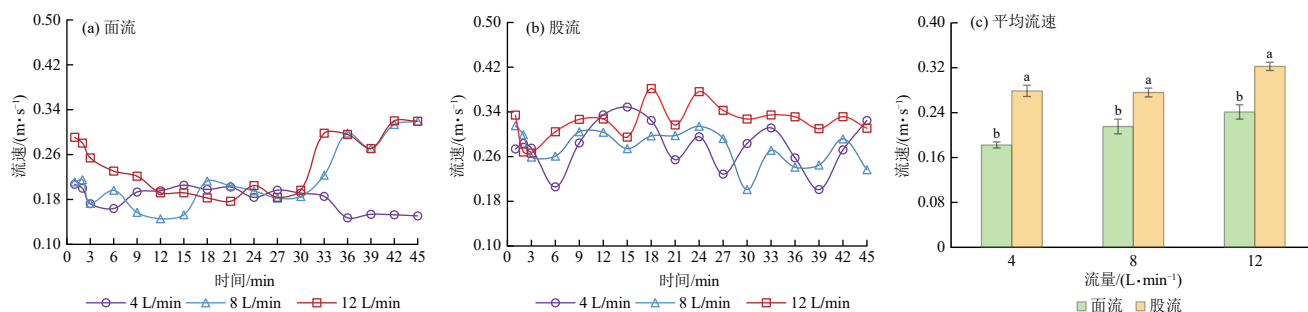
入流形式	流量/(L·min ⁻¹)	径流量/L	泥沙量/kg	径流增率系数/%	泥沙增率系数/%
面流	4	213.68	31.78	—	—
	8	372.55	48.64	—	—
	12	555.73	49.48	—	—
股流	4	187.11	39.66	—12.44	24.79
	8	348.59	52.67	—6.43	8.28
	12	517.05	68.47	—6.96	38.37

2.3 坡面径流流速与流型流态

2.3.1 径流流速 不同入流形式下坡面流速存在显著差异(图6)。面流下,流速随冲刷时间呈先降低后增加的变化趋势。产流初期,坡面流路不固定,径流携带大量泥沙,流速降低;坡面形成固定流路后,径流含沙量降低,流速逐渐增加(图6a)。在小流量(4 L/min)条件下,产流后期细沟侵蚀还在发生,径流流速较小。而股流下,流速随冲刷时间的增加呈快速降低再大幅波动的过程(图6b)。

由于径流呈集中流状态,径流初始流速较大,侵蚀能量大,短时间形成细沟,流速快速降低;细沟形成后,坡面形成流路,流速增加,侵蚀能量进一步提

高,细沟横向发育,出现沟岸坍塌,径流含沙量增加,使流速减小,剥离的泥沙全部输移后,流速重新增大,使沟道进行周期性横向侵蚀和下切侵蚀,流速呈波动变化。股流的径流流速与面流有显著差异(图6c)。面流下径流平均流速为0.18~0.24 m/s,股流下径流平均流速为0.28~0.32 m/s。小流量(4 L/min)、中流量(8 L/min)、大流量(12 L/min)条件下,相比面流,股流流速分别显著增加52.85%、28.15%、33.67%($p<0.05$)。表明相比面流,股流坡面流速显著增加,提高径流侵蚀能量,导致细沟横向和下切侵蚀的持续发生,进一步增强径流的紊动性。



注:采用配对 T 检验,不同字母表示不同入流形式差异显著($\alpha=0.05$)。

图6 不同入流形式下的径流流速差异

Fig. 6 Differences in runoff velocity under different inflow patterns

2.3.2 径流流型流态 坡面径流流型流态的差异是对入流形式的直观表现。不同的细沟形态与入流形式导致径流内部结构的差异,在坡面反映出不同的径流流型流态量化特征^[25]。面流下,径流弗劳德数(Fr)为0.46~2.34,平均弗劳德数 $Fr < 1$,属于缓流;雷诺数(Re)为643~3 273,均 > 500 ,非层流特征。雷诺数(Re)随着径流的弗劳德数(Fr)的增加而减小(图7a)。面流下,坡面产流初期,径流为薄层水流,呈坡面漫流,向细沟流进行转变过程中,形成的细沟将径流分散成多股水流,细沟径流深增大,流速较快,雷诺数 $Re > 2 000$,呈湍流。细沟流汇聚,形成集中流后,径流流路拓宽,含沙量减小,沟道土壤对径流的阻力降低,水流流速逐渐增加,而细沟宽度增加导致径流深减小,所以在冲刷后期径流雷诺数(Re)为500~2 000,呈过渡流,弗劳德数 $Fr > 1$,属于急流。而股流下,径流的弗劳德数(Fr)为0.90~2.49,平均弗劳德数 $Fr > 1$,属于急流。

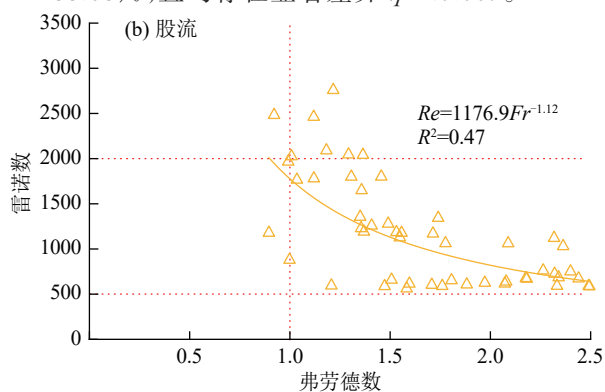
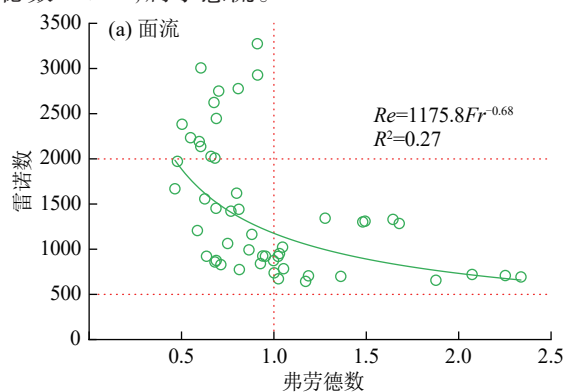


图7 不同入流形式下弗劳德数与雷诺数之间的关系

Fig. 7 Relationship between Froude number and Reynolds number under different inflow patterns

水流功率表征的是单位面积的径流剥蚀、搬运泥沙所消耗的功率。面流下径流功率为5.67~11.22 Pa,股流下径流功率为5.61~8.22 Pa(图8b)。小流量(4 L/min)和中流量(8 L/min)下,面流和股流下径流功率没有显著差异。大流量(12 L/min)下,相比股流,面流的径流功率显著增加($p < 0.05$)。

2.4.2 径流单位能量 径流单位能量是与土壤颗粒发

雷诺数 Re 为581.08~2 777.58,均 > 500 ,非层流特征(图7b)。试验对面流和股流下径流的雷诺数(Re)与弗劳德数(Fr)进行相关关系拟合,拟合效果用决定系数(R^2)表示。股流下二者的拟合效果($R^2 = 0.47$)优于面流($R^2 = 0.27$)。

2.4 坡面径流水动力学参数差异

2.4.1 径流剪切力和径流功率 坡面径流侵蚀过程本质上是在径流的冲刷侵蚀力与坡面土壤抗蚀力相互作用的结果。从径流的水动力学参数的变化特征来分析不同入流形式下径流的变化规律,进而揭示不同入流形式对坡面侵蚀和泥沙运移特征。面流与股流下径流剪切力具有显著差异(图8a)。面流下径流剪切力为31.03~48.26 Pa,股流下径流剪切力为20.36~27.02 Pa。小流量(4 L/min)中流量(8 L/min)和大流量(12 L/min)条件下,相比股流,面流的径流平均径流剪切力分别增加52.45%、37.87%、83.53%,且均存在显著差异($p < 0.05$)。

生相互作用伴随能量耗散后,单位流体所具有的动能与势能的总和。大流量(12 L/min)条件,面流和股流下径流单位能量差异显著(图8c)。面流下径流单位能量为0.66~1.09 cm,股流下为0.72~0.94 cm。小流量(4 L/min)下,相比股流,面流的径流单位能量减少8.45%。中流量(8 L/min)和大流量(12 L/min)下,相比股流,面流的径流单位能量分别增加2.96%、16.23%。

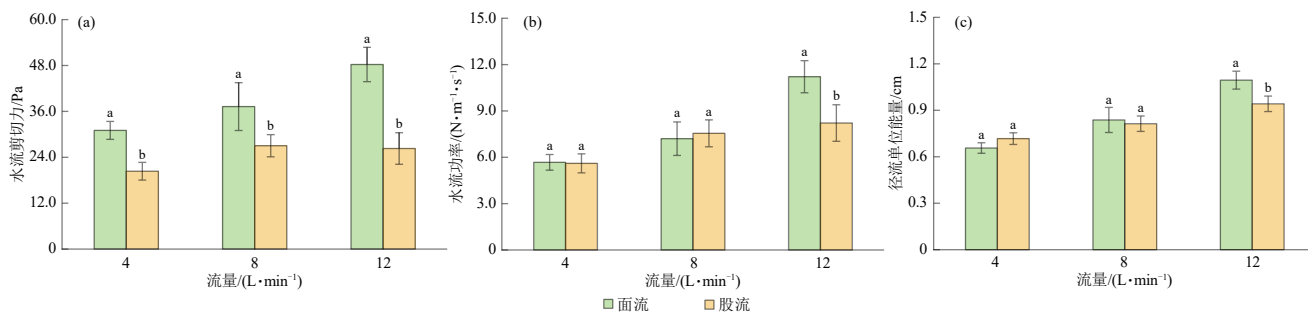


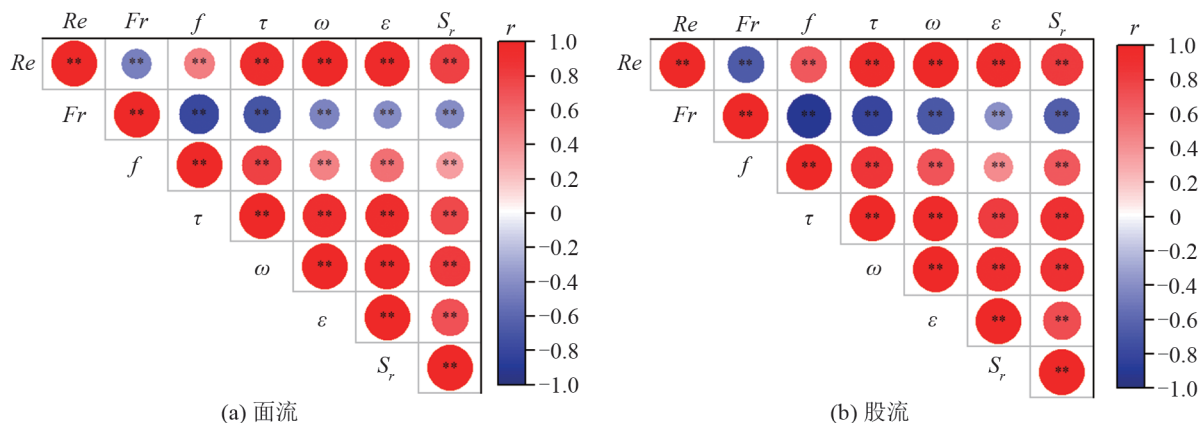
图 8 不同入流形式下径流水动力学参数

Fig. 8 Runoff hydrodynamic parameters under different inflow patterns

2.5 土壤侵蚀率与坡面径流参数回归分析

2.5.1 土壤侵蚀率与坡面径流参数的相关性分析 由坡面径流参数与土壤侵蚀率的相关性分析(图 9)可得,在面流、股流 2 种径流形式下坡面径流的形态参数、流阻系数、水动力学参数都与坡面土壤侵蚀速率均呈极显著相关。在 2 种径流形式下,雷诺数、流阻系数、径流剪切力、径流功率、径流单位能量与土壤

侵蚀速率均呈极显著正相关($p < 0.01$);弗劳德数与土壤侵蚀速率呈极显著负相关($p < 0.01$)。根据相关性系数绝对值,对坡面径流参数相关程度排序。面流下,径流功率>雷诺数>径流剪切力>径流单位能量>弗劳德数>阻力系数。股流下,径流剪切力>径流功率>雷诺数>径流单位能量>阻力系数>弗劳德数。



注: Re 为雷诺数; Fr 为弗劳德数; f 为阻力系数; τ 为径流剪切力; ω 为径流功率; ϵ 为径流单位能量; S_r 为土壤侵蚀率; *表示显著相关($p < 0.05$); **表示极显著相关($p < 0.01$)。

图 9 不同入流形式坡面径流参数与土壤侵蚀率相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis between slope runoff parameters and soil erosion rates under different inflow patterns

2.5.2 土壤侵蚀率与径流形态参数、阻力系数的关系 通过土壤侵蚀率与径流形态参数、阻力系数之间的拟合关系(图 10)得出,土壤侵蚀率(S_r)与雷诺数(Re)呈显著的线性关系($p < 0.01$),且过渡流和紊流($R > 500$)能增强径流对土壤剥离,加剧侵蚀。土壤侵蚀率(S_r)与弗劳德数(Fr)呈显著负相关($p > 0.01$),用指数函数表示。相比于面流,股流下坡面径流为急流($Fr > 1$),侵蚀剧烈,对沟蚀的形成和发育有主导作用。土壤侵蚀率与阻力系数(f)呈显著线性关系($p > 0.01$),且股流下回归效果($R^2 = 0.43$)优于面流($R^2 = 0.13$)。

2.5.3 土壤侵蚀率与径流水动力学参数的关系 由面流和股流下土壤侵蚀率与径流剪切力、径流功率、径流单位能量之间的回归分析可知,面流和股流下径流剪切力、径流功率、径流单位能量与土壤侵蚀率之间均呈极显著线性相关($p < 0.01$)。依据回归模型

的决定系数,股流下土壤侵蚀率与径流剪切力、径流功率、径流单位能量的回归效果均优于面流。

已有研究^[15]表明,基于土壤侵蚀率与径流剪切力、径流功率的线性模型可以反映土壤可蚀性。根据土壤侵蚀率与径流剪切力、径流功率的模型(表 4),相比于面流,股流下坡面土壤可蚀性 K_r 、 K_ω 、 K_ϵ 分别增加 166.67%、81.25%、113.86%。表明股流下径流冲刷侵蚀所具有的能量高于面流,径流侵蚀能量越大,土壤可蚀性越大,堆积体发生的水土流失就越严重。侵蚀临界值是在该径流形式下开始发生土壤侵蚀的临界径流水动力条件。相比面流,股流下径流剪切力、径流功率、径流单位能量的侵蚀临界值 τ_0 、 ω_0 、 ϵ_0 分别增加 19.78%、40.70%、42.11%。表明股流下堆积体坡面径流发生土壤侵蚀的水动力学临界条件高于面流。

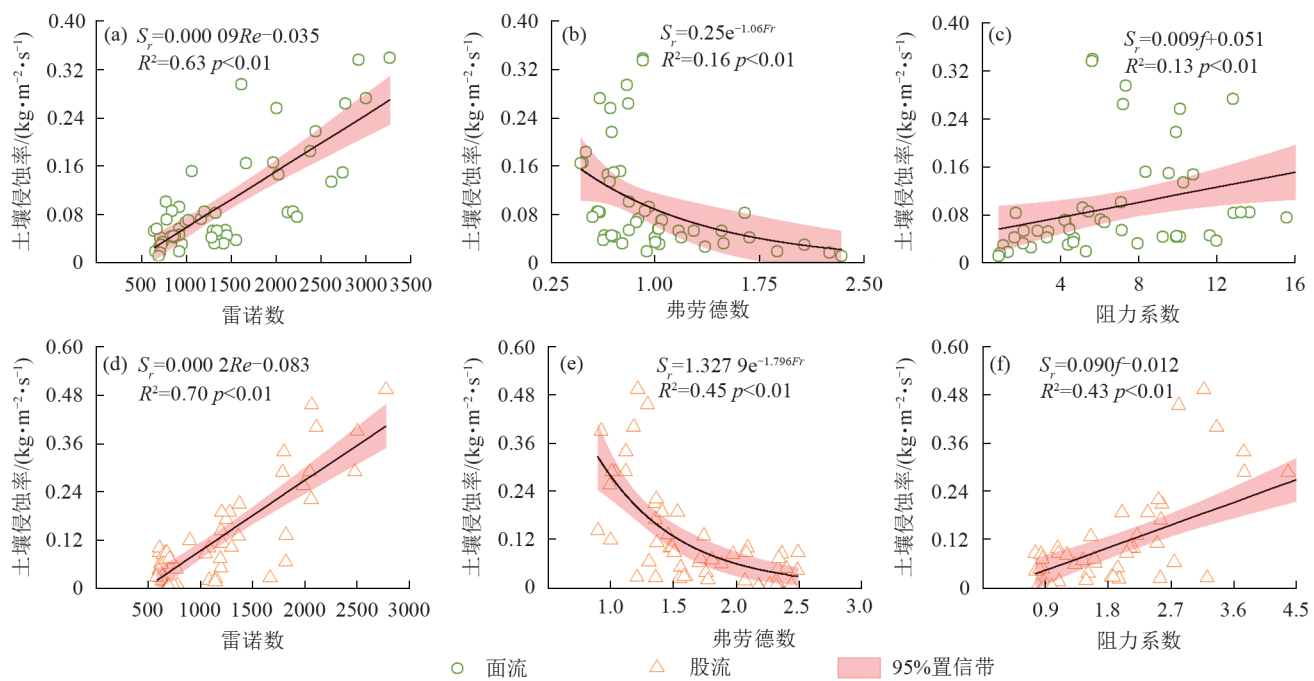


图 10 不同入流形式下土壤侵蚀率与径流形态参数和阻力系数的回归分析

Fig. 10 Regression analysis of soil erosion rates with runoff morphological parameters and resistance coefficients under different inflow patterns

表 4 不同入流形式下土壤侵蚀率与水动力学参数的回归分析

Table 4 Regression analysis between soil erosion rates and hydrodynamic parameters under different inflow patterns					
入流形式	水动力参数	拟合方程	决定系数	土壤可蚀性	侵蚀临界值
面流	径流剪切力/Pa	$S_r=0.003\tau-0.026$	0.55	0.003	8.19
	径流功率/($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	$S_r=0.016\omega-0.032$	0.68	0.016	1.99
	径流单位能量/cm	$S_r=0.202\varepsilon-0.077$	0.51	0.202	0.38
股流	径流剪切力/Pa	$S_r=0.008\tau-0.082$	0.80	0.008	9.81
	径流功率/($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	$S_r=0.029\omega-0.081$	0.79	0.029	2.80
	径流单位能量/cm	$S_r=0.432\varepsilon-0.232$	0.52	0.432	0.54

3 讨论

3.1 不同入流形式对坡面产流产沙的影响

本研究通过对比面流与股流下工程堆积体坡面产流产沙过程的差异,揭示入流形式对坡面侵蚀过程的影响。研究表明,股流和面流下,坡面土壤侵蚀率随冲刷时间呈初期快速降低、后期波动减小的 2 个阶段(图 3)。此过程与以往研究^[12]相近。在径流冲刷条件下,堆积体坡面产流率随时间呈稳定变化^[17]。坡面入流以后土壤水分快速趋于饱和,土壤入渗逐渐稳定,坡面径流产生,产流率趋于稳定。相比面流,股流下坡面产流率显著降低(表 1),但其土壤侵蚀速率却显著增强,增率 21.83%~32.33%(表 2),且产沙过程的波动性(变异系数 CV=71.49%~111.94%)高于面流(CV=85.44%~92.14%)。可归因于 2 种入流形式对径流能量分配与侵蚀机制的差异化影响。面流下,径流以薄层水流均匀分布于坡面,初期以面蚀为主,径流呈坡面漫

流,随后逐渐形成不连续的细沟和跌坎,侵蚀能量分散,侵蚀作用受限于细沟地表粗糙度,产沙率随细沟稳定而逐步降低。股流下,径流自流入坡面就集中于固定流路,形成高流速(流速增率 28.15%~52.85%)和强紊动急流(雷诺数 $Re>500$, $Fr>1$)的集中冲刷,导致细沟迅速下切和横向掏蚀,横向发育与下切侵蚀的交替作用导致泥沙输移的间歇性波动,沟壁失稳坍塌频发,从而加剧产沙波动。

值得关注的是,中流量(8 L/min)下坡面股流产沙增率略高于大流量条件(表 2),可能与其流路稳定性相关。中流量条件下相比面流,股流径流能量大,能维持细沟持续发育,沟岸发生失稳坍塌的频率高于面流,导致泥沙输移率较高;而大流量(12 L/min)下 2 种入流形式径流能量差异较小,沟道快速贯通后侵蚀转向稳定输移,股流与面流受坡面侵蚀形态的影响减弱,因而二者差异略小。坡面累积产沙量与累积径流量存在显著线性关系($p<0.01$),与张乐涛^[26]的研究结果一致。同时,相比面流,股流下径流产沙能力

分别增加 44%、6%、122%。大流量(12 L/min)条件下,产流后期累积泥沙曲线出现明显的转折,表明股流对泥沙的剥离—输移效率更高。径流是诱发坡面侵蚀产沙的直接动力^[27]。相同流量条件下,股流的径流侵蚀动能大(图 6c),坡面快速形成细沟,快速形成径流通道,相比面流,土壤剥蚀作用剧烈,对泥沙的剥离—输移效率更高,水土流失也更加严重。从现实工程防护角度,工程堆积体平台—陡坡衔接处常因平台汇水集中,形成坡面沟头侵蚀,该区域需优先布设水平沟等工程措施或植被缓冲带,起到径流拦蓄,减小流速作用,分散股流能量,可有效抑制径流产沙并降低坡面失稳坍塌风险。

3.2 不同入流形式下侵蚀过程的水动力学特征

本研究通过对比面流与股流下的径流水动力学特征,揭示不同入流形式对工程堆积体坡面侵蚀过程的差异性驱动机制。试验结果表明,相比面流,股流下径流平均流速显著提高 33.67%~52.85% ($p<0.05$, 图 6c),其能量集中特性导致侵蚀能力的显著增强。这种差异源于股流在侵蚀初期即形成固定流路,水流集中于狭窄沟道,径流深度增大、流速提升,显著增加雷诺数(Re)和径流剪切力(τ),进而强化紊流及过渡流对土壤颗粒的剥离与搬运能力(图 10)。相比之下,面流下径流呈分散状态,能量在坡面漫流过程中逐渐耗散,侵蚀能力相对较弱。股流下产沙过程呈现显著的“多峰多谷”波动(图 3),与沟道下切侵蚀和横向发育的交替作用密切相关。股流下,坡面周期性进行下切侵蚀,沟岸失稳导致泥沙瞬时大量释放,而坍塌后沟道形态又暂时降低径流能量,形成动态反馈机制。而面流下因其侵蚀过程以细沟缓慢扩张为主,产沙波动性较低(表 2)。径流形式对于产沙过程的差异,进一步验证股流下径流能量集中对坡面水蚀加剧的关键作用。

相比面流,股流下呈急流态($Fr>1$),且股流下雷诺数与弗劳德数的拟合效果优于面流(图 7)。与已有研究结果相似,面流状态下,水流大多呈缓流状态。吴普特等^[28]研究发现,虽然地表糙度造成面流一定的紊动,但仍然可以认为是一种特殊的层流。张宽地^[29]研究指出,面流并非一直稳定,某些特定情况发生滚波,将其称为“层流失稳区”。张科利等^[30]研究结果表明, $Fr>1$ 时,坡面产生细沟侵蚀。本研究中,股流下径流呈急流态($Fr>1$),通过增强水流紊动加剧沟蚀,而面流下呈缓流态($Fr<1$),以层流剥蚀为主(图 10)。股流下,径流侵蚀能量大,径流呈现急流状态,而面流下,径流需要从薄层水流向细沟流的转变过程,受地表粗糙度和坡面阻力的影响,导致径流流速降低,呈

现缓流状态。股流下 Re 与 Fr 的拟合决定系数高于面流,说明股流的流动结构更稳定, Re 和 Fr 的协同变化更为明显(图 7)。可能源于股流集中流动的特性,其能量集中于狭窄沟道,流速与水深的空间分布相对均一,高 Re (强紊动)与高 Fr (急流)的耦合作用,形成“能量集中—沟蚀主导”的侵蚀机制。而面流下,水流分散且易受地形起伏干扰,缓流与急流交替和能量分配的异质性削弱二者的相关性。

相关性结果表明,股流下,土壤侵蚀率与水流剪切力存在较强的相关性,而面流下土壤侵蚀率与水流功率存在较强的相关性,与以往研究结果相似。工程堆积体坡面土壤剥蚀率与径流剪切力、径流功率之间存在一定的线性关系^[31]。张光辉等^[32]研究表明,水流功率可以很好地描述坡面薄层水流土壤剥蚀能力。面流下,土壤侵蚀率与水流功率的线性拟合效果强于水流剪切力(表 4),印证在薄层流条件下,能量替换传统力学在土壤侵蚀过程模拟中具有一定的可行性。而股流下,土壤侵蚀率与水流剪切力的线性拟合效果最佳,是因为股流能量集中对坡面水蚀加剧效应,在力学变化特征表现更为明显。股流入流下坡面流呈急流状态,侵蚀能量集中,坡面侵蚀形态快速发育,从而形成完整的侵蚀沟。径流在细沟中汇集,导致水深增厚,具有更强的搬运能力。同时,相比股流,面流下土壤侵蚀率与阻力系数的拟合效果较差(图 10),是因为坡面径流阻力由颗粒阻力、形态阻力等组成^[33],受水流流态、细沟形态、径流含沙量等因素共同作用^[34-35],使得坡面径流阻力规律更加复杂,不能很好地模拟坡面侵蚀情况。

坡面土体剥离开始发生的临界水动力学条件是理解堆积体坡面侵蚀动力学过程的基础^[1],是坡面水土流失防治措施布设的重要理论依据。依据侵蚀动力学和能耗理论^[36],介质可蚀性参数代表土体下垫面构成与径流相互作用时表现的侵蚀能力差异,临界值代表不同入流剥蚀土体表面颗粒启动的最小能量。比较股流和面流下介质可蚀性参数与临界值的差异,可以更好地揭示 2 种入流导致侵蚀产沙差异的水动力学机制,分析坡面侵蚀过程中动力学特性和能量耗散机制的差异,能够更好地量化入流形式对坡面侵蚀过程的影响。本文中,面流下径流剪切力、径流功率、径流单位能量的侵蚀临界值分别为 8.19 Pa、1.99 N/(m·s)、0.38 cm;而股流下径流剪切力、径流功率、径流单位能量的侵蚀临界值分别为 9.81 Pa、2.80 N/(m·s)、0.54 cm(表 4),与张乐涛等^[15]的研究结果接近。相比而言,2 种入流形式下坡面形成侵蚀沟的临界值剪切力、径流功率稍小于张乐涛等^[15]的研究结果,可能是试验流量和土体颗粒的差异造成

的。当平台径流能量达到股流临界值,在平台和坡面边缘低洼处形成侵蚀沟,平台汇水沿侵蚀沟流入坡面,坡面发生股流冲刷过程。相比面流,股流下径流剪切力、径流功率、径流单位能量的侵蚀临界值分别增加19.78%、40.70%、42.11%。表明相比面流而言,股流下侵蚀过程的形成需要更大的径流能量。但其较高的土壤侵蚀能力,导致堆积体坡面发生更严重的水土流失。因此,在生产建设项目水土保持措施布置时,要针对不同径流来水形式,在工程堆积体平台和坡面部位做出科学性、综合性的规划,确保径流能量低于侵蚀临界值。

本研究基于室内模拟试验,土体选择黄土高原地区工程建设中基坑开挖中产生的弃土堆积体,受试验土槽尺寸的限制,未能模拟含砾石等更大粒径范围、组成复杂的堆积体下垫面。后续研究计划选择多种类型的原位工程堆积体开展试验,进一步扩展研究结论的普适性。

4 结论

1) 坡面产流过程呈现先跃变后稳定波动2个阶段,产沙过程呈现先快速降低再波动减小的变化过程。相比面流,股流下坡面产流率分别降低11.85%、3.10%、7.01%,土壤侵蚀率分别增加26.65%、32.33%、21.83%。股流下坡面产流产沙过程的波动性显著增强。

2) 面流下,随着冲刷时间的增加,径流流速呈先降低后增加。股流下,径流流速随冲刷时间的增加呈快速降低再波动稳定的过程。股流下径流流速相比面流显著增加28.15%~52.85% ($p < 0.05$)。股流下径流急流态 ($Fr > 1$),高雷诺数 ($Re > 500$) 增强水流紊动,加剧沟道下切侵蚀和横向侵蚀,而面流下呈缓流态 ($Fr < 1$),以层流剥蚀为主。股流下雷诺数与弗劳德数的拟合效果 ($R^2 = 0.47$) 优于面流 ($R^2 = 0.27$),表明其流动结构更稳定,能量传递效率更高。

3) 土壤侵蚀率与径流剪切力、径流功率、径流单位能量之间均呈极显著正相关 ($p < 0.01$)。相比面流,股流下坡面拟合模型计算的土壤侵蚀能力 (K_r 、 K_w 、 K_e) 分别增加166.67%、81.25%、113.86%。股流下径流剪切力、径流功率、径流单位能量的侵蚀临界值 (τ_0 、 ω_0 、 ϵ_0) 分别增加19.78%、40.70%、42.11%。

参考文献:

- [1] 丁文斌,史东梅,何文健,等.放水冲刷条件下工程堆积体边坡径流侵蚀水动力学特性[J].农业工程学报,2016,32(18):153-161.
- DING W B, SHI D M, HE W J, et al. Hydrodynamic characteristics of engineering accumulation erosion under

side slope runoff erosion process in field scouring experiment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(18): 153-161.

- [2] 李建明,牛俊,王文龙,等.不同土质工程堆积体径流产沙差异[J].农业工程学报,2016,32(14):187-194.
- LI J M, NIU J, WANG W L, et al. Differences in characteristics of runoff and sediment yielding from engineering accumulations with different soil textures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(14): 187-194.
- [3] 张座雄,刘兴荣,王之君,等.降雨冲刷下黄土堆填边坡水土参数变化规律[J].农业工程学报,2023,39(23):75-84.
- ZHANG Z X, LIU X R, WANG Z J, et al. Change characteristics of soil and water parameters of loess land-fill slopes during rainfall scouring[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(23): 75-84.
- [4] ZHANG L T, GAO Z L, YANG S W, et al. Dynamic processes of soil erosion by runoff on engineered land-forms derived from expressway construction: A case study of typical steep spoil heap[J]. Catena, 2015, 128: 108-121.
- [5] NEARING M A, POLYAKOV V O, NICHOLS M H, et al. Slope-velocity equilibrium and evolution of surface roughness on a stony hillslope[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(6): 3221-3229.
- [6] 张文博,吕佼容,谢永生,等.不同形态工程堆积体产流产沙对比研究[J].水土保持学报,2020,34(3):49-54.
- ZHANG W B, LÜ J R, XIE Y S, et al. Comparative study on runoff and sediment yielding in different morphological engineering accumulations[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 49-54.
- [7] 赵暄,谢永生,景民晓,等.生产建设项目弃土堆置体的类型与特征[J].中国水土保持科学,2013,11(1):88-94.
- ZHAO X, XIE Y S, JING M X, et al. Types and characteristics of spoilbank in development construction project[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(1): 88-94.
- [8] LI J M, WANG W L, GUO M M, et al. Effects of soil texture and gravel content on the infiltration and soil loss of spoil heaps under simulated rainfall[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(11): 3896-3908.
- [9] 康宏亮,王文龙,薛智德,等.北方风沙区砾石对堆积体坡面径流及侵蚀特征的影响[J].农业工程学报,2016,32(3):125-134.
- KANG H L, WANG W L, XUE Z D, et al. Effect of gravel on runoff and erosion characteristics on engineering accumulation slope in windy and sandy area, northern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(3): 125-134.
- [10] 李瑞栋,王文龙,姜义宝,等.模拟降雨条件下砾石含量

- 对壤土工程堆积体坡面产流产沙的影响[J].应用生态学报,2022,33(11):3027-3036.
- LI R D, WANG W L, LOU Y B, et al. Effects of gravel content on runoff and sediment yield on Lou soil engineering accumulation slopes under simulated rainfall conditions[J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(11):3027-3036.
- [11] 赵满,王文龙,郭明明,等.不同砾石含量壤土堆积体坡面侵蚀特征研究[J].土壤学报,2020,57(5):1166-1176.
- ZHAO M, WANG W L, GUO M M, et al. Erosion of slopes of Lou soil stacks different in gravel content[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5):1166-1176.
- [12] 白芸,康宏亮,王文龙,等.排土场平台-边坡系统沟蚀形态演变与产沙特征[J].农业工程学报,2022,38(23):81-90.
- BAI Y, KANG H L, WANG W L, et al. Characteristics of gully topography and sediment on the platform-steep slope system of spoil dump[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(23):81-90.
- [13] 戎玉博,王森,白玉洁,等.含砾石锥状工程堆积体侵蚀水动力学特性和细沟形态特征[J].水土保持学报, 2018, 32(2):134-141.
- RONG Y B, WANG S, BAI Y J, et al. Characteristics of hydrodynamics and rill morphology of tapered engineering piles with gravel[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(2):134-141.
- [14] 张恒,高照良,牛耀彬,等.两种工程堆积体坡面细沟形态与产沙关系对比研究[J].土壤学报,2021,58(1):115-127.
- ZHANG H, GAO Z L, NIU Y B, et al. A comparative study on relationship between rill morphology and sediment yield on slopes of two types of engineering mounds [J].Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(1):115-127.
- [15] 张乐涛,高照良,田红卫.工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程[J].农业工程学报,2013,29(24):94-102.
- ZHANG L T, GAO Z L, TIAN H W. Hydrodynamic process of soil erosion in steep slope of engineering accumulation[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(24):94-102.
- [16] 李永红,牛耀彬,王正中,等.工程堆积体坡面径流水动力学参数及其相互关系[J].农业工程学报,2015,31(22):83-88.
- LI Y H, NIU Y B, WANG Z Z, et al. Hydrodynamic parameters and their relationships of runoff over engineering accumulation slope [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(22):83-88.
- [17] 牛耀彬,吴旭,高照良,等.降雨和上方来水条件下工程堆积体坡面土壤侵蚀特征[J].农业工程学报, 2020, 36(8):69-77.
- NIU Y B, WU X, GAO Z L, et al. Characteristics of soil erosion on engineering accumulation slope under the rainfall and inflow conditions[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(8):69-77.
- [18] 李魁,王文龙,李建明.工程堆积体流速及产沙特征对坡长及砾石作用响应[J].水土保持学报,2023,37(5):48-56.
- LI K, WANG W L, LI J M. Response of velocity and sediment production characteristics of spoil heaps to slope length and gravel action [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5):48-56.
- [19] 吕威,武新英,李法虎.径流量和坡度对复合坡薄层径流水力学特性的影响[J].水土保持学报,2016,30(5):11-17.
- LÜ W, WU X Y, LI F H. Shallow runoff hydraulic characteristics affected by runoff rate and slope gradient of composite slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5):11-17.
- [20] 谭文浩,陈晓燕,陶婷婷,等.重庆饱和紫色土坡面片流与细沟流水力学特性及临界条件试验研究[J].水土保持学报,2023,37(3):66-72.
- TAN W H, CHEN X Y, TAO T T, et al. Experiment study of sheet and rill flow hydraulic characteristics and the critical conditions on saturated purple soil slopes in Chongqing [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3):66-72.
- [21] 高儒学,戴全厚,甘艺贤,等.土石混合堆积体坡面土壤侵蚀研究进展[J].水土保持学报,2018,32(6):1-8.
- GAO R X, DAI Q H, GAN Y X, et al. Research progress on soil erosion on the slope surface of soil-rock mixed engineering accumulation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(6):1-8.
- [22] 李宏伟,牛俊文,宋立旺,等.工程堆积体水动力学参数及其产沙效应[J].水土保持学报,2013,27(5):63-67.
- LI H W, NIU J W, SONG L W, et al. Study on characteristic of hydrodynamic parameters and its sediment yield for engineering accumulation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5):63-67.
- [23] 吕春娟,张徐,毕如田,等.间歇降雨对铁尾砂重构坡面侵蚀水动力学特性的影响[J].农业工程学报, 2020, 36(11):74-85.
- LYU C J, ZHANG X, BIR T, et al. Effects of intermittent rainfall on hydrodynamics characteristics of erosion on reconstructed slopes of iron tailings [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(11):74-85.
- [24] 周佩华,王占礼.黄土高原土壤侵蚀暴雨标准[J].水土保持通报,1987,7(1):38-44.
- ZHOU P H, WANG Z L. Soil erosion storm rainfall standard in the Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1987, 7(1):38-44.
- [25] 刘西乐,张宽地,杨婕,等.斑块状植被覆盖下坡面流水动力学特性[J].农业工程学报,2020,36(6):122-131.
- LIU X L, ZHANG K D, YANG J, et al. Hydrodynamic characteristics of overland flow under patchy vegetation cover [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(6):122-131.

- tural Engineering, 2020, 36(6):122-131.
- [26] 张乐涛,高照良,李永红,等.模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程[J].农业工程学报,2013,29(8):145-153.
ZHANG L T, GAO Z L, LI Y H, et al. Soil erosion process of engineering accumulation in steep slope under simulated runoff conditions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(8):145-153.
- [27] 张乐涛,董俊武,袁琳,等.黄土区工程堆积体陡坡坡面径流调控工程措施的减沙效应[J].农业工程学报, 2019, 35(15):101-109.
ZHANG L T, DONG J W, YUAN L, et al. Sediment-reducing benefits by runoff regulation under engineering measures in steep slope of abandoned soil deposits in Chinese loessial region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(15):101-109.
- [28] 吴普特,周佩华.坡面薄层水流流动型态与侵蚀搬运方式的研究[J].水土保持学报,1992,6(1):19-24.
WU P T, ZHOU P H. Research on the laminar flow type and erosion transportation manners on the slope surface [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 6(1):19-24.
- [29] 张宽地,王光谦,王占礼,等.人工加糙床面薄层滚波流水力学特性试验[J].农业工程学报,2011,27(4):28-34.
ZHANG K D, WANG G Q, WANG Z L, et al. Experiments on hydraulic characteristics of roll wave for sheet flow with artificial rough bed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(4):28-34.
- [30] 张科利,秋吉康宏.坡面细沟侵蚀发生的临界水力条件研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,12(1):41-46.
ZHANG K L, QIU J. Critical hydraulic condition of rill erosion on sloping surface [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1998, 12(1):41-46.
- [31] 牛耀彬,高照良,刘子壮,等.工程措施条件下堆积体坡面土壤侵蚀水动力学特性[J].中国水土保持科学, 2015, 13(6):105-111.
NIU Y B, GAO Z L, LIU Z Z, et al. Hydrodynamic characteristics of soil erosion on deposit slope under engineering measures[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(6):105-111.
- [32] 张光辉.坡面薄层流水动力学特性的实验研究[J].水科学进展,2002,13(2):159-165.
ZHANG G H. Study on hydraulic properties of shallow flow[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(2):159-165.
- [33] ABRAHAMS A D, LI G, PARSONS A J. Rill hydraulics on a semiarid hillslope, southern Arizona [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21(1):35-47.
- [34] 杨茹珍,张凤宝,杨明义,等.急陡黄土坡面细沟侵蚀的水动力学特性试验研究[J].水土保持学报, 2020, 34(4):31-36.
YANG R Z, ZHANG F B, YANG M Y, et al. Hydraulic characteristics of rill erosion on steep loess slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4):31-36.
- [35] 张光辉.退耕驱动的近地表特性变化对土壤侵蚀的潜在影响[J].中国水土保持科学,2017,15(4):143-154.
ZHANG G H. Potential effects of changes in near soil surface characteristics driven by farmland abandonment on soil erosion [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15(4):143-154.
- [36] 李鹏,李占斌,郑良勇,等.坡面径流侵蚀产沙动力机制比较研究[J].水土保持学报,2005,19(3):66-69.
LI P, LI Z B, ZHENG L Y, et al. Comparisons of dynamic mechanics of soil erosion and sediment yield by runoff on loess slope [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2005, 19(3):66-69.