

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.03.035

王建羽, 林哲, 廖达兰, 等. 花岗岩红壤坡面沟头高度对沟床跌穴发育过程的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3):

WANG Jianyu, LIN Zhe, LIAO Dalan, et al. Influence of headcut height on the developmental processes of gully bed plunge pool on a granite red soil slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3):

花岗岩红壤坡面沟头高度对沟床跌穴发育过程的影响

王建羽¹, 林哲¹, 廖达兰¹, 段晓倩², 邓羽松¹

(1. 广西大学林学院, 南宁 530004; 2. 广西大学农学院, 南宁 530004)

摘要: [目的] 沟床跌穴发育是花岗岩红壤坡面沟头溯源侵蚀的关键过程, 为明确其形成机制。[方法] 通过设定 5 个沟头高度 (25, 50, 75, 100, 125 cm) 研究花岗岩红壤坡面沟床跌穴发育过程。[结果] (1) 随沟头高度增加, 沟床径流雷诺数、径流剪切力、径流功率和射流参数 (触底流速、射流剪切应力、瞬时动能、跌穴径流能耗) 均表现为增加趋势。(2) 红土层沟床形成“V”形跌穴, 随流量增加跌穴形态变化增大, 但只形成面积较小的跌穴。而砂土层在冲刷过程中, 沟床跌穴发育较为明显, 当流量增大到 120 L/min 后, 沟床破碎化程度增加, 跌穴轮廓逐渐清晰, 横截面积增大。(3) 通过随机森林算法和沙普利值构建并表征模型各参数的关系, 红土层沟床径流的弗罗德数、径流功率、水平出射动能、雷诺数与横截面积呈负相关; 砂土层沟床径流的弗罗德数和跌穴径流能耗与横截面积呈负相关。沟床跌穴侵蚀程度可用随机森林算法构建模型预测 (LCCC=1.02, R^2_{adjusted} =0.876 和 0.868)。[结论] 研究结果可为揭示沟头溯源侵蚀机理和沟蚀防治提供理论依据。

关键词: 花岗岩红壤; 沟床跌穴; 水力参数; 形态演变

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

Influence of Headcut Height on the Developmental Processes of Gully Bed Plunge Pool on a Granite Red Soil Slope

WANG Jianyu¹, LIN Zhe¹, LIAO Dalan¹, DUAN Xiaoqian², DENG Yusong¹

(1. Forestry College of Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Agricultural College of Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: [Objective] Headcut bed plunge pool point development is a key process in headcut erosion on granitic red soil slopes, but the mechanism of its formation is not clear. [Methods] We investigated the process of gully bed plunge pool development on granite red soil slopes by setting five headcut heights (25, 50, 75, 100 and 125 cm). [Results] (1) As the height of the headcut increased, the Re , τ , ω and the jet parameters (V_{bottom} , τ_{max} , Ek_{bottom} , and ΔE_H) showed an increasing trend. (2) After the laterite soil layer scouring to form a “V” type of small plunge pool, with the increase in the flow of the form of plunge pool gradually increased, but it is difficult to form a large area of the plunge pool, and the laterite soil layer is more stable than the sandy soil layer. During the scouring process of the sandy soil layer, the development of headcut bed drop points was more obvious, and when the flow rate increased to 120 L/min, the degree of gully bed fragmentation was gradually drastic, and the outline of the drop points was gradually clearer, and the cross-sectional area increased. (3) The random forest algorithm and Shapley values were used to construct the model and characterize the relationship between the parameters. The results showed that in the laterite layer, Fr , ω , Ek_{brink} , and Re were negatively correlated with the cross-sectional area; and in the sandy soil layer, Fr and ΔE_H were negatively correlated with the cross-sectional area. Higher accuracy of predictive models constructed by the random forest algorithm (LCCC=1.02, R^2_{adjusted} =0.876 and 0.868).

收稿日期: 2023-12-06

修回日期: 2024-01-12

录用日期: 2024-02-26

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42107350); 中央引导地方科技发展资金项目 (桂科 ZY21195022)

第一作者: 王建羽 (2000—), 男, 黑龙江绥化人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: dzxy_wjy@163.com

通信作者: 邓羽松 (1988—), 男, 广西桂林人, 副教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀机理与水土保持研究。E-mail: denny2018@gxu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

量一致。稳流槽内容积 0.05 m^3 , 可保障水流进入小区前的初始流速, 每次试验开始前, 对小区表面均匀洒水, 直至表层土壤湿润并无径流产生。试验过程中每 5 min 对放水流量进行监测, 确保实际放水流量与设计放水流量误差不超过 5% 。冲刷试验分为 5 场, 共 150 min , 每次放水冲刷时间设定为 30 min 。

1.3 试验观测指标

(1) 径流水力参数测定

水力参数包括径流速度 $V(\text{m/s})$ 、雷诺数 Re 、弗罗德数 Fr 、剪切应力 $\tau(\text{Pa})$ 和径流功率 $\omega(\text{W/m}^2)$, 用于表征沟床位置的水力特性变化。计算公式为:

$$Re = \frac{V \times R}{\nu} \quad (1)$$

$$\nu = \frac{1.775 \times 10^{-6}}{1 + 0.0337T^2 + 0.000221T^2} \quad (2)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (3)$$

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R \cdot J \quad (4)$$

$$\omega = \tau \cdot V \quad (5)$$

式中: R 为过水断面水力半径(m); ν 为水流黏滞性系数(m^2/s); T 为水温($^{\circ}\text{C}$); h 为径流流深(m); g 为重力加速度, 取值为 9.8 m/s^2 ; τ 为径流剪切力(N/m^2); ρ 为水密度(kg/m^3); J 为水力坡度(m/m); ω 为径流功率(W/m^2)。

(2) 射流水力参数

射流水力参数包括水平初射流速 $V_{brink}(\text{m/s})$ 、触底流速 $V_{bottom}(\text{m/s})$ 、水平出射动能 $Ek_{brink}(\text{J/s})$ 、瞬时动能 $Ek_{bottom}(\text{J/s})$ 、射流剪切应力 $\tau_{max}(\text{Pa})$, 计算公式为:

$$V_{brink} = \begin{cases} \sqrt[3]{\frac{qg}{0.715}} & Fr_n < 1 \\ V_n \frac{Fr_n^2 + 0.4}{Fr_n^2} & Fr_n > 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$V_{bottom} = \frac{V_{brink}}{\cos \beta} \quad (7)$$

$$\beta = \arctan \frac{\sqrt{2gH}}{V_{brink}} \quad (8)$$

$$Ek_{brink} = \rho q V_{brink}^2 / 2 \quad (9)$$

$$Ek_{bottom} = \rho q V_{bottom}^2 / 2 \quad (10)$$

$$\tau_{max} = C_f \rho (2Hg + V_{brink}^2) \quad (11)$$

$$C_f = 0.025 (\nu/q')^{0.2} \quad (12)$$

式中: V_n 为坡面径流到达沟头前的平均流速(m/s); q 为单宽流量(m^2/s); β 为射流进入跌穴时其水路线与水平面的内夹角($^{\circ}$); C_f 为摩擦系数; q' 为单宽径流

量(m^2/s)。

(3) 径流能量参数计算

根据径流水力参数计算跌穴的能量消耗。以沟头作为重力势能为零的参考面。沟缘径流能量 $E_U(\text{J/s})$, 径流流出跌穴时的径流能量 $E_H(\text{J/s})$ 、跌穴径流能耗 $\Delta E_H(\text{J/s})$ 的计算公式为:

$$E_U = \rho_w q g [(L_H \sin \alpha + L_B \sin \beta) + H] + \frac{1}{2} \rho_w q V_J^2 \quad (13)$$

$$E_H = \rho_w q g \left(L_H \sin \alpha + L_B \sin \beta - V_b \sqrt{\frac{2h}{g}} \sin \beta \right) + \frac{1}{2} \rho_w q V_P^2 \quad (14)$$

$$\Delta E_H = E_U - E_H \quad (15)$$

式中: L_B 和 L_H 分别为沟床长度和沟头后退距离; α 、 β 分别为集水坡面和沟床的坡度($^{\circ}$); H 为原始沟头高度(m); V_P 和 V_b 分别为跌穴和沟床的径流速度(m/s)。

1.4 模型构建

随机森林(RF)是基于决策树的组合机器学习算法, 可通过调整较少的参数达到更精确的预测效果, 具有较高的预测精度。沙普利值(SHAP值)可量化机器学习模型中每个特征对预测结果的贡献。构建模型前, 先将特征值与横截面积进行标准化处理, 避免量纲的影响。通过横截面积表征跌穴的侵蚀程度, 采用 RF 算法, 实现对跌穴侵蚀量的预测, SHAP 值量化沟床跌穴发育过程各单元水力参数的作用。采用林氏一致性相关系数(lin's concordance correlation coefficient, LCCC)以及调整后的 R^2 , 即 $R_{adjusted}^2$ 对模型的精度进行评价, 计算公式为:

$$LCCC = \frac{2rs_{y1}s_{y2}}{(y_1^- - y_2^-)^2 + s_{y1}^2 + s_{y2}^2} \quad (16)$$

$$R_{adjusted}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-k-1} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_2 - y_1^-)^2}{\sum_{i=1}^N (y_1 - \bar{y}_1)^2} \right) \quad (17)$$

式中: n 为样本点数量; k 为自变量的个数; y_1 、 y_2 分别为横截面积的实测值和预测值; y_1^- 、 y_2^- 分别为 y_1 、 y_2 的平均数; s_{y1} 、 s_{y2} 分别为 y_1 、 y_2 的标准差; r 为皮尔森相关系数。以上检验指标中, $R_{adjusted}^2$ 越接近于 1, 表示整体越接近于实测值。LCCC 考虑的因素较多, 包括皮尔森系数的内容, 在评估预测值与实测值是否具有 consistency 方面具有较大的意义, LCCC 接近 1 表示 2 个变量高度一致, 接

近 0 表示无关,接近-1 表示完全不一致。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 26 软件对数据进行统计分析,Origin 2022 和 Python 3.8.3 软件作图。采用 Agisoft photoscan 软件基于影像生成高程 DEM;ArcGIS 10.7 软件对高程 DEM 进行地形数据的提取。采用 Python 3.8.3 软件进行随机森林(RF)拟合和沙普利值(SHAP 值)计算。

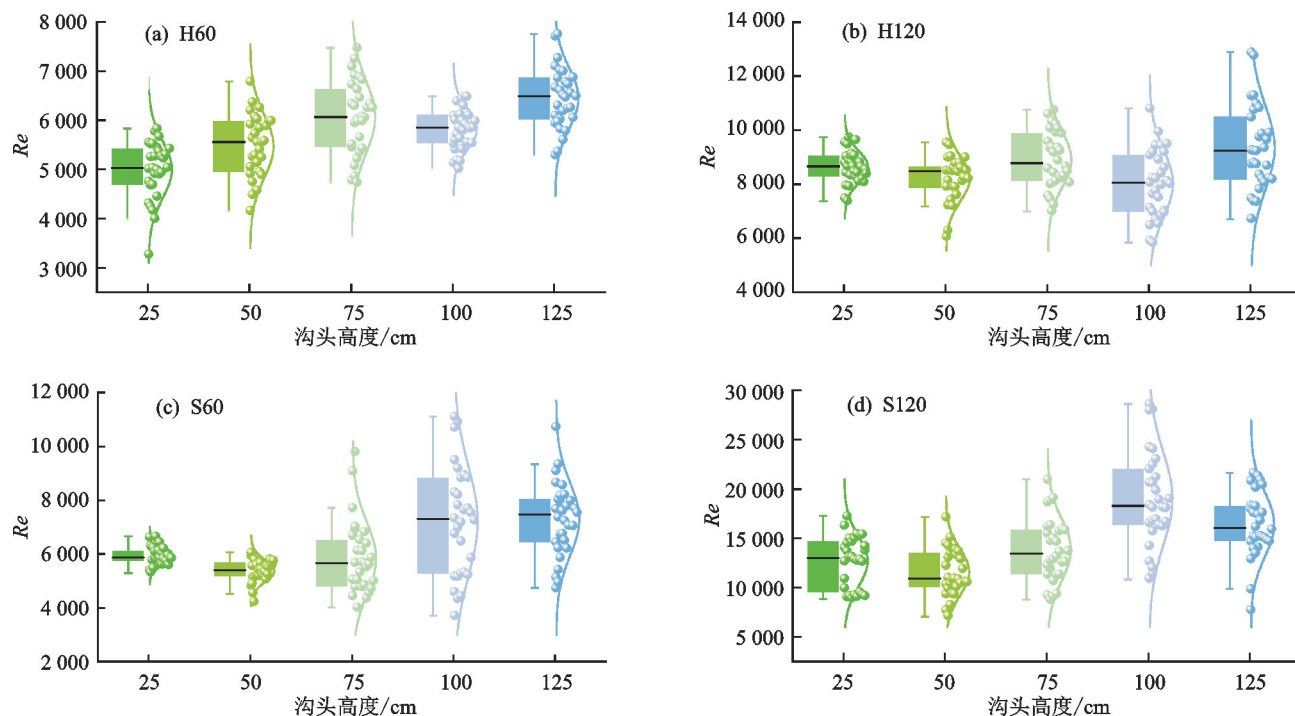
2 结果与分析

2.1 沟头高度对水力学特征的影响

2.1.1 沟头高度对径流水力特征的影响 由图 2 可知,雷诺数(Re)随沟头高度和流量的增加而增大。径流 Re 为 $4.95 \times 10^3 \sim 1.90 \times 10^4$,均 > 500 ,说明试验过程中径流均为紊流。在沟头高度相同条件下,随

着流量的增加,径流的平均流速(V)呈增加趋势。在流量相同条件下,随沟头高度增加,径流 V 和弗罗德数(Fr)均呈逐渐减小趋势。沟头高度达 100 cm 时,砂土层 Fr 逐渐减小至 1 以下,径流由急流发育为缓流。 Fr 反映流速与流深的对比关系,随着沟头高度的增加流深增大,跌穴发育加快,故 Fr 呈减小趋势。

由表 1 可知,放水流量为 60 和 120 L/min 时,随沟头高度和流量增加,沟床径流剪切力(τ)与时间主要呈二次函数和指数函数关系增加,且砂土层均大于红土层。随着冲刷时间延长, τ 先波动增加,后逐渐趋于稳定增加,表明跌水对 τ 影响较大。径流功率(ω)随沟头高度增加与时间呈二次函数和指数函数关系增加,且红土层均小于砂土层。随沟头高度增加,径流克服沟床阻力消耗的能量增加, ω 增大。



注: H60、H120 分别为对红土层进行流量为 60、120 L/min 的冲刷事件; S60、S120 分别为对砂土层进行流量为 60、120 L/min 的冲刷事件。中线表示中位数;箱体上、下边表示第 25 和第 75 分位数;上下线端表示第 90 和第 10 分位数。下同。

图 2 不同流量及沟头高度下沟床雷诺数变化

Fig. 2 Change of Re in gully bed under different flow rate and headcut height

2.1.2 沟头高度对射流特性的影响 图 3 为不同流量和土层间射流特性参数与沟头高度的变化关系。随沟头高度增加,径流的初射流速(V_{brink})、触底流速(V_{bottom})和射流剪切应力(τ_{max})均呈波动增加趋势。在 60 和 120 L/min 2 个流量下, τ_{max} 分别为 28.09~132.39 和 24.84~112.69 Pa。随沟头高度增加, τ_{max} 呈倍数增加。不同土层和流量条件下,50~125 cm 沟头高度的 τ_{max} 为 25 cm 沟头高度的 1.78~4.36 倍,

说明沟头高度对 V_{brink} 、 V_{bottom} 和 τ_{max} 均存在促进作用。

由表 2 可知,跌穴径流能耗(ΔE_H)随径流量变化与沟头高度呈二次函数相关。 ΔE_H 主要受到流量和沟头高度的影响,红土层和砂土层表现一致。对于红土层,沟头高度每增加 25 cm, ΔE_H 平均增加 2.43 和 4.88 J/s,砂土层为 2.44 和 4.89 J/s。瞬时动能(Ek_{bottom})与 ΔE_H 的变化趋势一致,均随流量和沟头高度的增加而增大,红土层和砂土层具有一致性(图 3,图 4)。

表 1 不同流量及沟头高度下径流剪切力、径流功率与时间的关系

Table 1 The relationship between τ , ω and time under different flow and headcut height

土层	沟头高度— 流量	径流剪切力 τ		径流功率 ω	
		公式	R2	公式	R2
红土层	25~60	$\tau=0.209t^{8.044}$	0.905 **	$\omega=1.564t^{0.209}$	0.905 **
	50~60	$\tau=16.959^{0.003}t$	0.693 **	$\omega=0.015t^2-0.000\ 034t+3.131$	0.690 **
	75~60	$\tau=0.004t^2+0.000\ 092t+22.871$	0.107	$\omega=0.001t^2+0.000\ 018t+4.446$	0.107
	100~60	$\tau=0.006t^2+0.000\ 141t+22.501$	0.677 **	$\omega=0.001t^2+0.000\ 027t+4.374$	0.677 **
	125~60	$\tau=0.03t^{22.279}$	0.318 *	$\omega=0.034t^{4.331}$	0.318 *
	25~120	$\tau=-0.11t^2+0.000\ 205t+23.578$	0.346 *	$\omega=-0.002t^2+0.000\ 04t+4.583$	0.346 *
	50~120	$\tau=0.51t^{20.087}$	0.424 **	$\omega=0.051t^{3.905}$	0.424 **
	75~120	$\tau=0.043t^2+0.000\ 025t+24.064$	0.729 **	$\omega=0.008t^2+0.000\ 005t+4.678$	0.729 **
	100~120	$\tau=23.945^{0.002}t$	0.711 **	$\omega=4.655^{0.002}t$	0.711 **
	125~120	$\tau=0.134t^2-0.000\ 21t+24.271$	0.926 **	$\omega=0.026t^2-0.000\ 004t+4.718$	0.926 **
砂土层	25~60	$\tau=\log_{7.140}^{3.954}t$	0.585 **	$\omega=0.283t^{3.140}$	0.303 *
	50~60	$\tau=0.054t^{19.875}$	0.632 **	$\omega=-0.03t^2+0.000\ 185t+11.275$	0.167
	75~60	$\tau=21.717^{0.003}t$	0.581 **	$\omega=8.55^{0.003}t$	0.515 **
	100~60	$\tau=0.086t^2+0.000\ 491t+22.854$	0.896 **	$\omega=0.048t^2+0.000\ 183t+7.741$	0.866 **
	125~60	$\tau=0.483t^2-0.002t+18.484$	0.724 **	$\omega=0.203t^2-0.001t+5.285$	0.603 **
	25~120	$\tau=0.249t^2-0.001t+19.191$	0.875 **	$\omega=0.114t^2-0.000\ 217t+12.350$	0.815 **
	50~120	$\tau=-0.015t^2+0.001t+31.676$	0.768 **	$\omega=-0.31t^2+0.001t+17.257$	0.617 **
	75~120	$\tau=0.213t^2+0.000\ 003t+26.350$	0.962 **	$\omega=15.529^{0.004}t$	0.677 **
	100~120	$\tau=0.181t^{35.887}$	0.897 **	$\omega=0.224t^{13.028}$	0.568 **
	125~120	$\tau=0.888t^2-0.005t+32.503$	0.412 *	$\omega=\log 15.329^{2.576}t$	0.104

注：* 和 ** 分别表示 $p<0.05$ 、 $p<0.01$ 。下同。

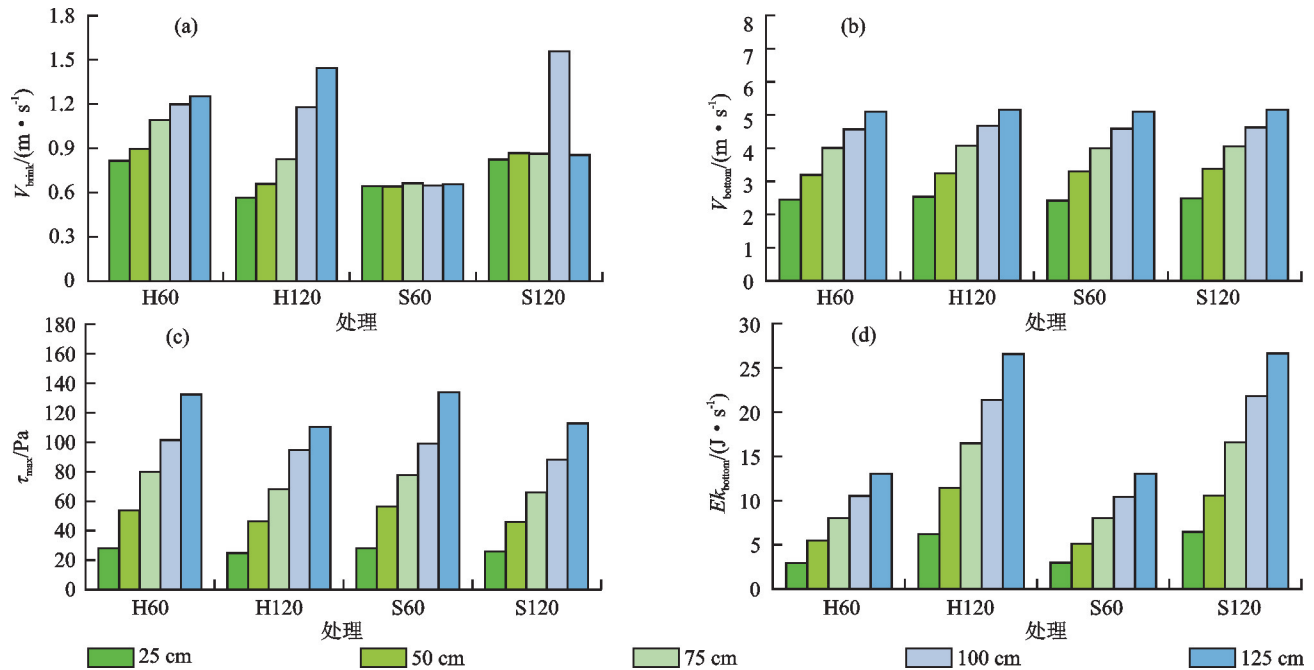


图 3 不同流量及沟头高度下初射流速、触底流速、射流剪切应力和瞬时动能变化

Fig. 3 Variation of V_{brink} 、 V_{bottom} 、 τ_{max} 、 Ek_{bottom} under different flow rates and headcut height

2.2 沟头高度和流量对跌穴形态演化的影响

图 5 为红土层和砂土层在不同流量和沟头高度下 DEM 的变化趋势。红土层在冲刷过程中表现出较强的稳定性,冲刷后,以形成“V”形的小跌穴为主,随着流量增加跌穴形态逐渐增大,但形成跌穴的面积

均较小。砂土层沟床跌穴发育较为明显,当流量增大到 120 L/min 后,沟床破碎化程度剧烈,跌穴轮廓清晰,横截面积增大。红土层和砂土层均表现为随沟头高度增加,跌穴横截面积逐渐增大,跌穴形态更加明显。由图 6 可知,沟头高度和流量增加,跌穴下切程度

加深。随着冲刷时间延长,跌穴形态先变化明显后逐渐稳定。跌穴形态整体上表现为,随沟头高度增加,从“V”形向深“V”形、“U”形、“弧形”及“多峰”形转变。说明在径流作用下,跌水对跌穴宽深侵蚀影响剧烈。

表 2 不同流量下跌穴径流能耗与沟头高度的关系

Table 2 Relationship between ΔE_H and headcut height under different flow rates

	流量/ ($L \cdot min^{-1}$)	公式	R^2
红土层	60	$\Delta E_H = 9.827h^2 - 0.063h - 0.487$	0.991 **
	120	$\Delta E_H = 19.782h^2 - 0.203h - 0.486$	0.992 **
砂土层	60	$\Delta E_H = 9.815h^2 - 0.017h - 0.487$	0.991 **
	120	$\Delta E_H = 19.572h^2 - 0.040h - 0.461$	0.994 **

注: h 为沟头高度。

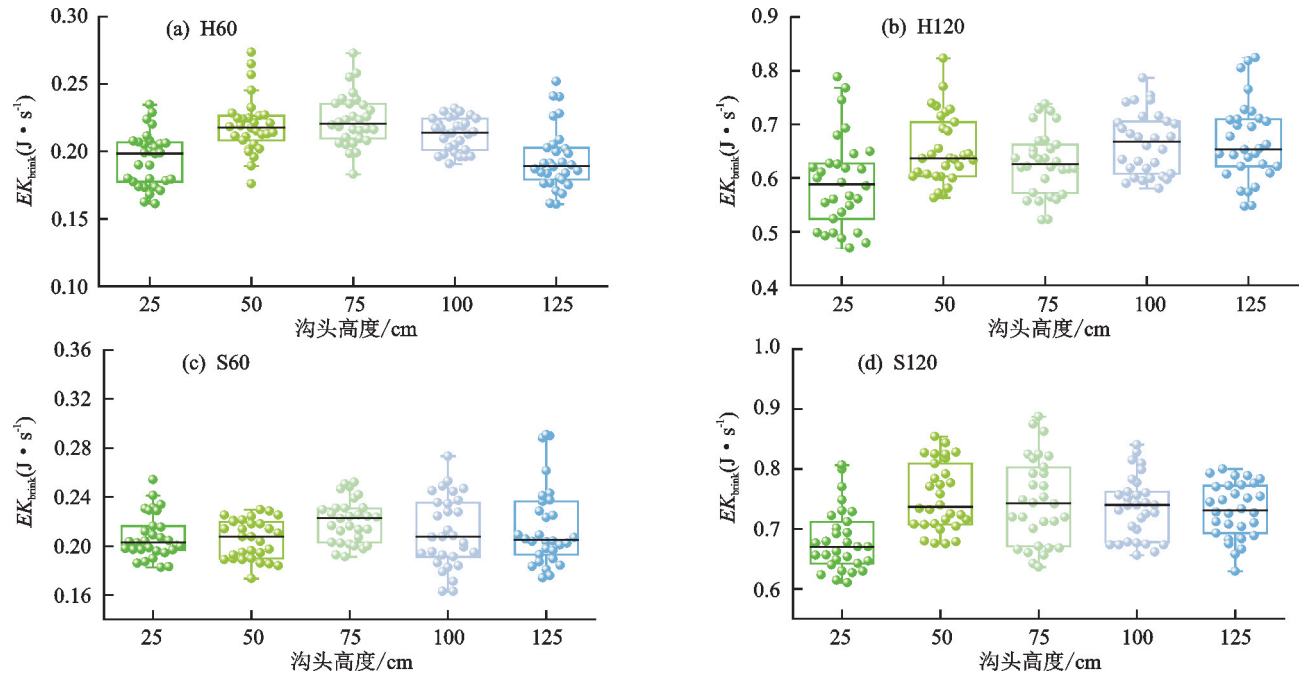


图 4 不同流量及沟头高度下水平出射动能变化

Fig. 4 Variation of $E_{k_{brink}}$ under different flow rates and headcut height

2.3 跌穴与径流水力学特征

图 8 为径流冲刷后红土层和砂土层水力学特征与横截面积的关系,特征值越大红色越深,越小则蓝色越深(图 8a,图 8c)。红土层 Fr 、 ω 、 $E_{k_{brink}}$ 、 Re 均表现为特征值越大 SHAP 值越小,与横截面积呈负相关。红土层黏粒含量高、质地较为紧实,砂土层与红土层相比受流量影响较小。砂土层 Fr 和 ΔE_H 与 SHAP 值呈负相关。全局解释表明,沟头高度越高、进入跌穴的径流速度越大、能量越大,沟床跌穴发育程度越高。蓝色框条对应横坐标为各特征的 SHAP 平均值(图 8b,图 8d),用于评价特征的重要性,由上到下依次减小,特征重要性程度与全局解释结果一致。图 9 为沟床跌穴土壤侵蚀程度预测值与实测值

等高线能够较为清晰的表现出地表侵蚀情况,宽深比可反映跌穴发育状态。由图 7 可知,等高线扭曲程度随流量和沟头高度的增加而逐渐增大,且砂土层的扭曲程度大于红土层。随着流量和沟头高度的增加,跌穴形态逐渐扩张,等高线的闭合面积增大,沟床跌穴发育程度剧烈。除 60 L/min 流量下红土层的宽深比外,其他径流小区跌穴宽深比均表现为先减小后增加趋势。60 L/min 流量下,红土层跌穴宽深比为 3.59~6.61,呈波动增加趋势;砂土层跌穴宽深比为 2.98~8.46。120 L/min 流量,跌穴宽深比分别为 3.64~6.38 和 2.24~7.59。红土层黏粒含量较高,低流量下红土层跌穴发育状况较差,径流难以向下切割,跌穴以宽浅型为主。

的拟合,预测值基本都位于置信带上。红土层和砂土层的 LCCC 均为 1.02,接近于 1,预测值与实测值具有高度的一致性; $R^2_{adjusted}$ 分别为 0.876,0.868,表明利用 RF 构建的预测模型精度较高,能够用于沟床跌穴发育过程中侵蚀量的预测。

3 讨论

3.1 跌穴发育的水力学特征

沟床径流 V 和 Fr 随时间延长呈波动减小趋势,可能是受到沟床表面粗糙度的影响,特别是红土层,黏粒含量高,阻力系数小,因此流速较大,且 $Fr > 1$ 多为急流。地表粗糙度能够显著改变径流流速,随着径流冲刷的进行,跌穴逐渐发育,沟床表面粗糙度增加,阻力系数增大,导致 V 和 Fr 逐渐减小^[15]。径流

量增加,增大径流地表紊动的强度,平均流速随之增大。 Re 随沟头高度和流量的增加而增大,在不同土层间变化趋势一致。由 Re 计算公式可知, Re 与 V 和深度呈正相关,流速和跌穴深度增加, Re 也随之增大。试验过程中 Re 始终超过 1 000, Fr 也基本 >1 ,表明沟床土体的集中流是湍流和超临界流。湍流的流动程度是影响射流和贴壁流形成的主要因素,研究中坡面和沟床 $Fr > 1$,射流是其主要流动形式,与 SU 等^[16] 研究结果一致。 τ 和 ω 均随沟头高度和径流量的增加而增大,且砂土层 $>$ 红土层。主要原因是 τ 与水流半径相关。试验初期沟床较为平滑,水流以宽浅型为主,故径流 τ 较小。随着沟床跌穴的发育,跌穴

逐渐加深,径流 τ 也随跌穴加深而呈增加趋势,特别是砂土层,砂粒含量较高,抗蚀性较差^[17]。可见,红土坡面被破坏后,径流 τ 和 ω 迅速增大,加速沟床跌穴发育。

射流 V_{brink} 和 V_{bottom} 均表现为逐渐增加趋势,土层间区别不明显,其主要与集水区的面积和沟头高度有关。 τ_{max} 、 ΔE_H 、 EK_{bottom} 均随沟头高度增加而增大。当径流到达沟壁时,径流势能转化为动能,使 τ_{max} 增大,随沟头高度增加, τ_{max} 也显著增强^[18]。射流能耗表征径流克服土壤阻力,对土体进行搬运、剥离所做的功。随沟头高度和跌穴深度增加,径流搬运土体消耗的能量逐渐增加,射流的能耗也逐渐增大。

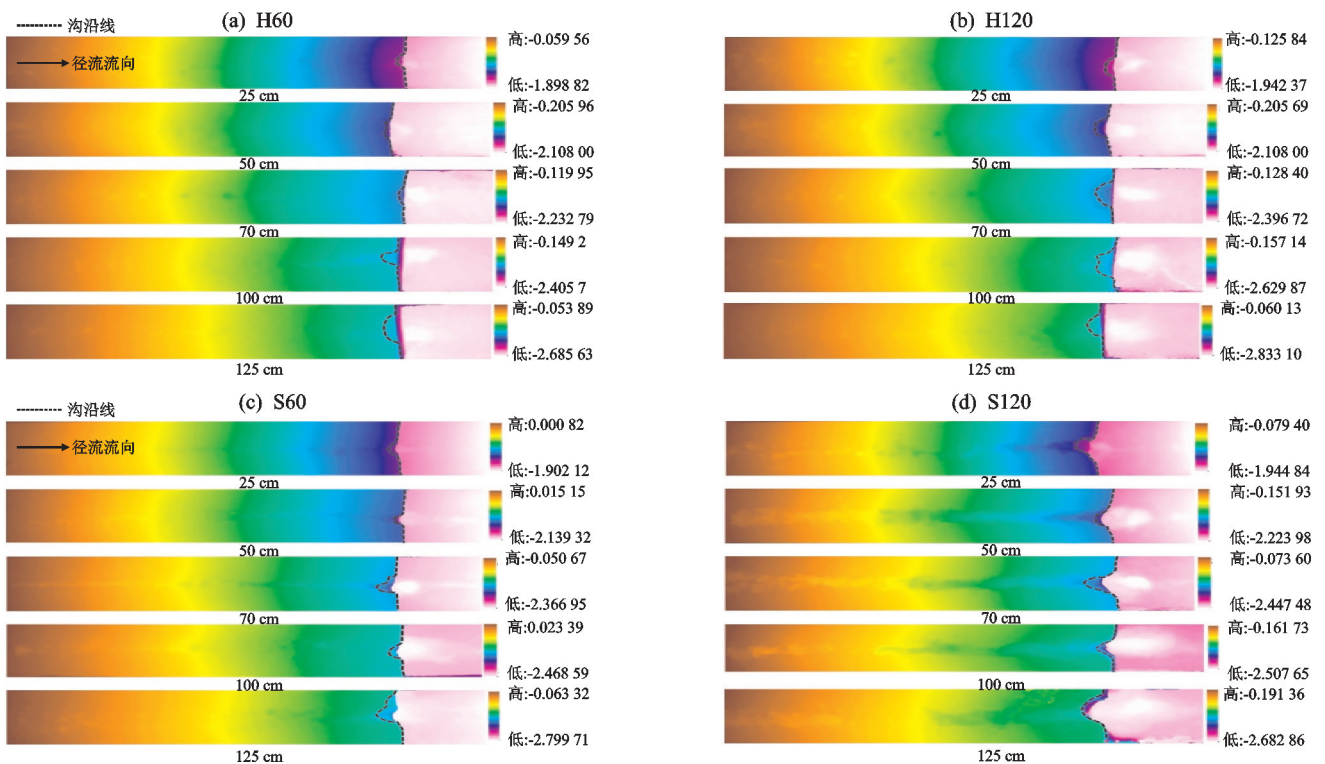


图5 不同沟头高度和放水流量下沟头溯源侵蚀 DEM

Fig. 5 DEM of the final morphology of headcut height traceability under different headcut height and discharge flows

3.2 沟床跌穴的形态变化特征

当坡面径流到达沟头时,由于地形的突然变化而转变为射流。射流对沟床土体进行掏蚀,进而导致跌穴的形成。随着径流冲刷的进行,跌穴的宽度和深度逐渐增大^[19]。本试验中,随着冲刷时间的延长,跌穴的形态先变化明显后逐渐稳定,与细沟沟头溯源侵蚀表现的现象一致。跌穴形态整体上随沟头高度和流量的增加,由“V”形向深“V”形、“U”形、“弧形”及“多峰”形转变,沟床跌穴发育程度逐渐加深。跌穴形态演变过程中出现的几次波动,主要与跌穴附近沟头土壤被侵蚀的情况有关。径流到达沟头后,主要侵蚀过

程分为上游径流切口、贴壁流和射流冲刷。贴壁流引起的沟头立壁土壤侵蚀,进一步改变射流在跌穴中的能量消耗过程^[20]。沟头的随机土体破坏也造成侵蚀过程中跌穴深度的波动^[21]。在冲刷过程中,沟头土体的崩塌、沟壁底部的掏蚀等都改变射流对沟床土体的侵蚀,从而影响沟床跌穴的发育。红土层和砂土层跌穴形态存在差异,红土层黏粒含量高,抗蚀抗冲性强,而砂土层以粉粒和砂粒为主,抗蚀抗冲性弱^[22]。

除 60 L/min 流量下红土层跌穴的宽深比外,其他跌穴宽深比均表现为随沟头高度增加先减小后增加,与马小玲等^[23] 对于沟蚀的研究结果一致。跌穴横断面的宽深比下降,表明汇水面的宽度变窄,径流

能量增加,跌穴下切深度加深。沟头前进破坏土体,导致跌穴深度降低,随着沉积物逐渐被径流清除,跌穴深度逐渐增加。沟头土体的破坏和跌穴位置的移动是导致跌穴宽深比波动变化的主要原因。

坡面径流对沟床跌穴发育过程的影响主要与径流的水力学参数有关。因此,径流的水力学参数是影响土壤侵蚀发生程度和强度的主要因素。径流剪切力、出射流速、径流功率等水力参数已被广泛运用于土壤侵蚀的预测中^[24]。采用 RF 算法构建横截面积

与水力学参数间的预测模型,利用 SHAP 值量化水力学参数在构建模型中的作用表明,红土层沟床径流的弗罗德数、径流功率、水平出射动能、雷诺数与横截面积呈负相关;砂土层沟床径流的弗罗德数和跌穴径流能耗与横截面积呈负相关,水力学参数用于土壤侵蚀预测效果较好($R^2_{\text{adjusted}} = 0.876$ 和 0.868),与 SU 等^[16]和 SHI 等^[24]的研究结果一致,可通过水力学参数的测定实现对沟床跌穴侵蚀程度的预测。

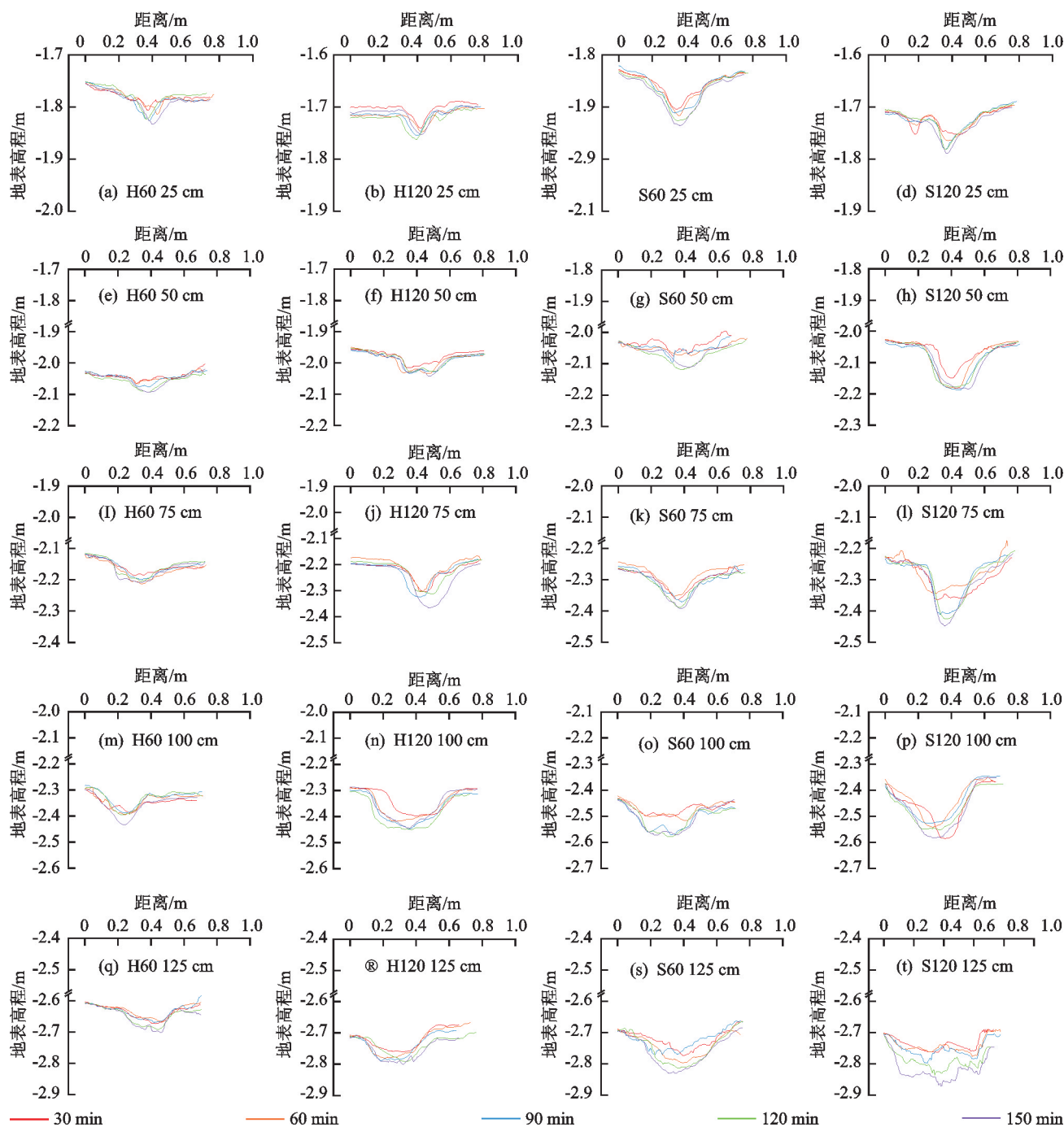


图 6 不同沟头高度和放水流量下跌穴形态演化特征

Fig. 6 Morphological evolutionary characteristics of plunge pool with different headcut height and discharge flows

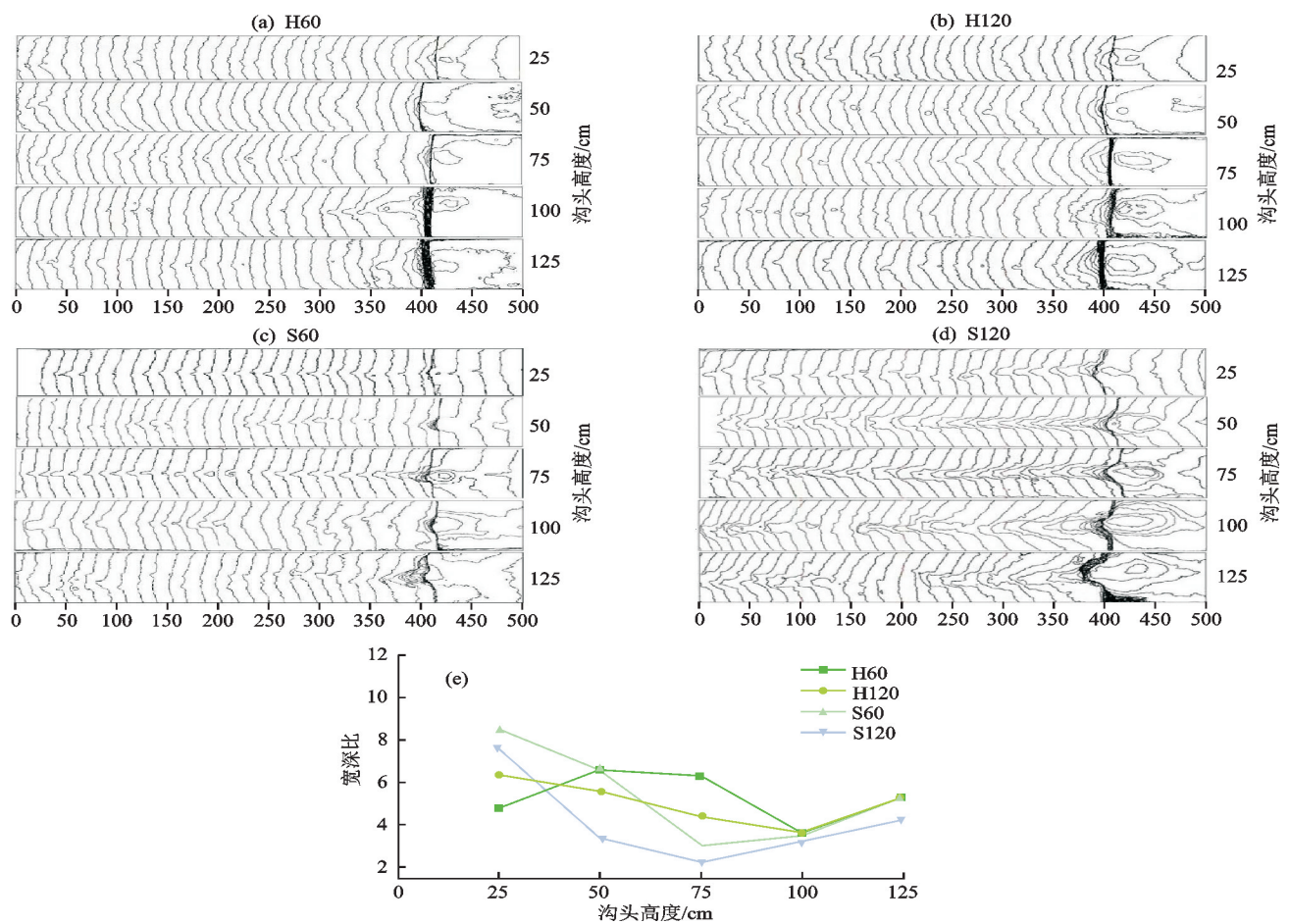
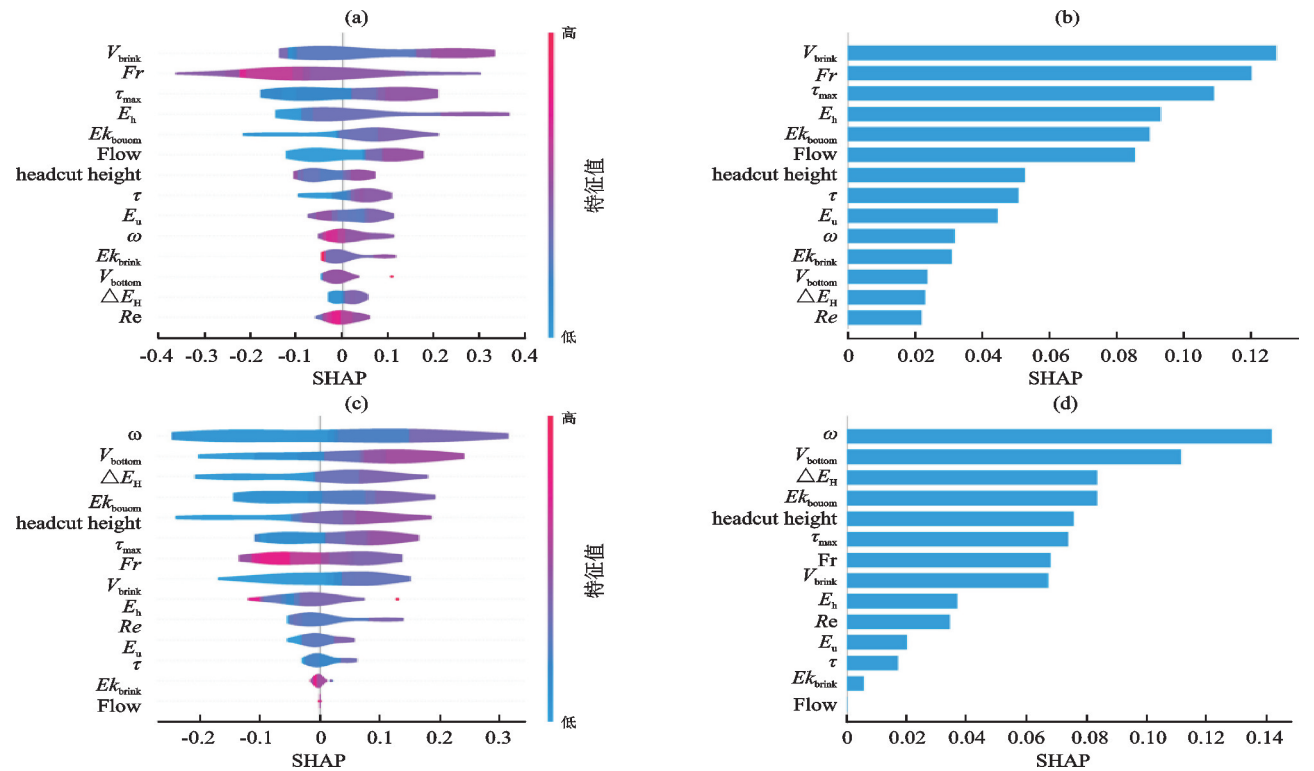


图 7 不同沟头高度和放水流量侵蚀形态等高线示意及跌穴宽深比

Fig. 7 Final erosion pattern contours under different headcut height and discharge flows and width/depth ratio of plunge pool



注:a,b为红土层,c,d为砂土层。

图 8 红土层和砂土层模型全局解释、特征 SHAP

Fig. 8 Global interpretation, characteristic SHAP value of laterite layer and sandy soil layer model

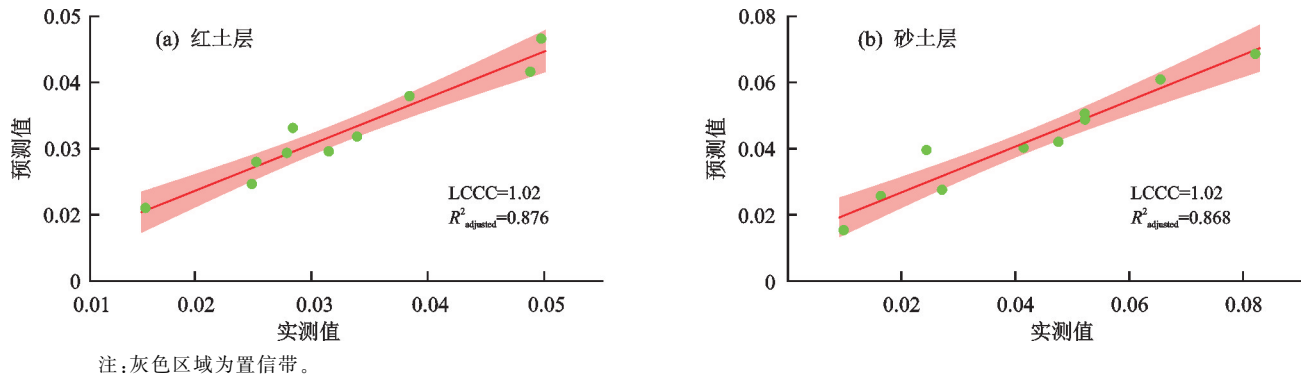


图 9 红土层和砂土层预测模型拟合结果

Fig. 9 Fitting results of laterite layer and sand layer prediction model

4 结论

Re 、 τ 、 ω 均随沟头高度和流量的增加而增大,且 τ 、 ω 表现为砂土层 > 红土层。射流参数 V_{bottom} 、 τ_{max} 、 EK_{bottom} 、 ΔE_{H} 随沟头高度的增加而增大。跌穴宽深比整体上随沟头高度的增大先减小后增加。随沟头高度和流量的增加,沟床跌穴形态从“V”形向深“V”形、“U”形、“弧形”及“多峰”形转变,沟床跌穴的发育程度逐渐增强。通过 RF 算法构建的土壤侵蚀程度预测模型全局解释表明,对于 2 个土层沟头高度越高、进入跌穴的径流速度越大、能量越大,沟床跌穴发育程度越高,砂土层与红土层相比受流量影响较小。因此,红土是防治溯源侵蚀和跌穴发育的保护屏障,加大对花岗岩红壤生态脆弱区红土层的保护是防治沟蚀的关键。

参考文献:

- [1] YIBELTAL M, TSUNEKAWA A, HAREGEWEYN N, et al. Morphological characteristics and topographic thresholds of gullies in different agro-ecological environments[J]. *Geomorphology*, 2019, 341: 15-27.
- [2] 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.
- [3] 覃超,何超,郑粉莉,等.黄土坡面细沟沟头溯源侵蚀的量化研究[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(6): 160-167.
QIN C, HE C, ZHENG F L, et al. Quantitative research of rill head advancing process on loessial hill-slope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(6): 160-167.
- [4] ZHANG B J, XIONG D H, ZHANG G H, et al. Impacts of headcut height on flow energy, sediment yield and surface landform during bank gully erosion processes in the Yuanmou Dry-hot Valley region, southwest China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(10): 2271-2282.
- [5] DUAN X Q, DENG Y S, TAO Y, et al. The soil configuration on granite residuals affects Benggang erosion by altering the soil water regime on the slope[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, 9(3): 419-432.
- [6] DONG Y F, DUAN X W, HUANG J C, et al. The validation of a gully headcut retreat model in short-term scale based on an in situ experiment in dry-hot valley[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(6): 2228-2239.
- [7] WEI Y J, WU X L, CAI C F, et al. Impact of erosion-induced land degradation on rainfall infiltration in different types of soils under field simulation[J]. *Land Degradation and Development*, 2019, 30(14): 1751-1764.
- [8] LIAO D L, DENG Y S, DUAN X Q, et al. Variations in weathering characteristics of soil profiles and response of the atterberg limits in the granite hilly area of South China[J]. *Catena*, 2022, 215: e106325.
- [9] 廖义善,唐常源,袁再健,等.南方红壤区崩岗侵蚀及其防治研究进展[J]. *土壤学报*, 2018, 55(6): 1297-1312.
LIAO Y S, TANG C Y, YUAN Z J, et al. Research progress on Benggang erosion and its prevention measure in red soil region of southern China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(6): 1297-1312.
- [10] 林金石,黄炎和,张旭斌,等.南方花岗岩区典型崩岗侵蚀产沙来源分析[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(3): 53-57.
LIN J S, HUANG Y H, ZHANG X B, et al. Apportioning typical collapsing hill's erosion sediment sources of granite region in southern China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(3): 53-57.

- [11] LIN Z, LIAO D L, HE L, et al. The study on morphological evolution process of gully headcut erosion in granite red soil hilly area based on an in situ scouring experiment[J]. *Geomorphology*, 2023, 441: e108900.
- [12] HE L, DUAN X Q, DING S W, et al. Construction and evaluation of pedotransfer functions for saturated hydraulic conductivity in the granite red soil regions of southern China [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2023, 50: e101539.
- [13] 张宝军,熊东红,杨丹,等.跌水高度对元谋干热河谷冲沟沟头侵蚀产沙特征的影响初探[J]. *土壤学报*, 2017, 54(1): 48-59.
- ZHANG B J, XIONG D H, YANG D, et al. Preliminary study on effects of headcut height on soil erosion and sediment yield at gully heads in Yuanmou dry-hot valley region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(1): 48-59.
- [14] ZHANG B J, XIONG D H, SU Z G, et al. Effects of initial step height on the headcut erosion of bank gullies: A case study using a 3D photo-reconstruction method in the dry-hot valley region of southwest China [J]. *Physical Geography*, 2016, 37(6): 409-429.
- [15] JIANG F S, GAO P Y, SI X J, et al. Modelling the sediment transport capacity of flows in steep nonerodible rills [J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(26): 3852-3865.
- [16] SU Z A, XIONG D H, DONG Y F, et al. Hydraulic properties of concentrated flow of a bank gully in the dry-hot valley region of southwest China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(10): 1351-1363.
- [17] 韦江杏,邓羽松,廖达兰,等.桂东南花岗岩崩岗土壤界限含水率空间变异及影响因素[J]. *土壤学报*, 2023, 60(3): 749-761.
- WEI J X, DENG Y S, LIAO D L, et al. Spatial variation and influencing factors of soil limiting water content of granite collapsing gullies in southeast Guangxi [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3): 749-761.
- [18] KANG H L, WANG W L, GUO M M, et al. Head-wall scour hole erosion and overhanging mass collapse play critical roles in gully head retreat on grassland under surface flow [J]. *Geomorphology*, 2022, 411: e108301.
- [19] DONG Y F, XIONG D H, SU Z A, et al. The influences of mass failure on the erosion and hydraulic processes of gully headcuts based on an in situ scouring experiment in Dry-hot valley of China[J]. *Catena*, 2019, 176: 14-25.
- [20] 杨鸿琨,苏正安,朱大鹏,等.集水区耕作对干热河谷冲沟沟头溯源侵蚀过程的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(21): 151-157.
- YANG H K, SU Z A, ZHU D P, et al. Effect of cultivation in upstream catchment on gully headcut erosion process in dry-hot valley[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(21): 151-157.
- [21] GUO M M, LOU Y B, CHEN Z X, et al. The proportion of jet flow and on-wall flow and its effects on soil loss and plunge pool morphology during gully headcut erosion[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 598: e126220.
- [22] TANG Q Y, DUAN X Q, HE L, et al. Variability and driving factors of the soil saturated hydraulic conductivity along the horizontal and vertical directions in the upper catchment of Benggang [J]. *Catena*, 2023, 222: e106810.
- [23] 马小玲,张宽地,杨帆,等.坡面细沟侵蚀断面形态发育影响因素分析及动力特性试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(4): 209-216.
- MA X L, ZHANG K D, YANG F, et al. Influencing factor analysis of rill erosion section morphology development on slope and its dynamic characteristic experiment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(4): 209-216.
- [24] SHI Q H, WANG W L, GUO M M, et al. The impact of flow discharge on the hydraulic characteristics of headcut erosion processes in the Gully region of the Loess Plateau [J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(3): 718-729.