

DOI: 10.11766/trxb201909100333

张恒, 高照良, 牛耀彬, 李永红, 赵晶, 陈卓, 苏媛. 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 Heng, GAO Zhaoliang, NIU Yaobin, LI Yonghong, ZHAO Jing, CHEN Zhuo, SU Yuan. 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.

两种工程堆积体坡面细沟形态与产沙关系对比研究*

张恒¹, 高照良^{1, 2†}, 牛耀彬¹, 李永红^{1, 2}, 赵晶³, 陈卓¹, 苏媛²

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 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; 3. 生态环境部环境工程评估中心, 北京 100012)

摘要: 为探究不同土壤类型工程堆积体坡面细沟形态与水动力学参数及侵蚀产沙间的关系, 选取沟宽、沟深、宽深比等作为细沟形态参数, 在放水流量 8、12、16、20 L·min⁻¹ 和坡度 32° 条件下, 对红土和壤土工程堆积体进行冲刷试验。结果表明: (1) 两种堆积体坡面细沟沟宽、沟深在前 24 min 均发育迅速; 随放水流量增大, 沟宽和沟深均呈增大趋势, 红土沟宽均值 (较 8 L·min⁻¹) 分别增加 0.8%、19.3%、27.2%, 沟深均值分别增加 24.5%、126.2%、95.1%, 而壤土则为 3.7%、62.4%、108.2% 和 18.2%、87.9%、95.5%; 红土沟宽、沟深与冲刷历时均呈极显著线性函数关系 ($R^2 > 0.858$, $P < 0.01$), 而壤土则为极显著对数函数关系 ($R^2 > 0.689$, $P < 0.01$); (2) 两种堆积体坡面细沟宽深比呈先波动 (0~24 min) 后 (25~45 min) 平稳的变化趋势; 放水流量增至 16 L·min⁻¹, 两种堆积体宽深比均值减幅最大 (较 8 L·min⁻¹), 红土最大减少了 1.15, 壤土最大减少了 0.20; (3) 两种堆积体坡面细沟水流剪切力、水流功率与沟宽、沟深均呈现幂函数关系 ($R^2 > 0.602$, $P < 0.01$); 径流剪切力更适合描述红土沟深的发育状况, 而径流功率更能体现壤土沟宽的发育过程; (4) 两种堆积体坡面累计产沙量与沟宽和沟深均呈极显著线性函数关系 ($R^2 > 0.897$, $P < 0.01$); 沟宽、沟深对红土坡面累计产沙量的贡献率分别为 84.9%、15.1%, 对壤土则为 22.5% 和 77.5%; 该研究可为不同土壤类型工程堆积体坡面水土保持措施合理配置提供理论依据。

关键词: 放水冲刷; 工程堆积体; 细沟形态; 产沙

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A

A Comparative Study on Relationship between Rill Morphology and Sediment Yield on Slopes of Two Types of Engineering Mounds

ZHANG Heng¹, GAO Zhaoliang^{1, 2†}, NIU Yaobin¹, LI Yonghong^{1, 2}, ZHAO Jing³, CHEN Zhuo¹, SU Yuan²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China)

Abstract: [Objective] Production and construction activities, like digging, excavating, dumping and piling-up of earth, form a

* “十三五”国家重点研发计划 (2016YFC0501706-02) 和国家自然科学基金 (41671283) 资助 Supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2016YFC0501706-02) and the National Natural Science Foundation of China (No.41671283) .

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: gzl@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 张恒 (1994—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事工程建设区人为侵蚀过程研究。E-mail: zhang18740403424@163.com

收稿日期: 2019-09-10; 收到修改稿日期: 2019-12-26; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-03-09

large number of engineering mounds, which are ordinarily complex in underlying and surface structure and poor in erosion resistance. The mounds are mainly in the form of flat tops and slopes, whereon, rill erosion is easily occurring on slope surface with scouring flow running down from the top of the mound. In the process of rill erosion, rill morphology is closely related to hydrodynamic characteristics, and the relationship tends to be affected by soil texture. So it is essential to explore the relationships of slope rill morphology with hydrodynamic parameters, sediment yield and soil texture of the engineering mound. 【Method】To that end, a field scouring-erosion experiment was carried out on an engineering mound of red soil and another of lou soil. Changes in rill morphology parameters, including rill width, rill depth and width-depth ratio, were monitored on slopes 32° in gradient, with scouring water flowing down at 8, 12, 16 and 20 L·min⁻¹ (designated as Treatment I, II, III and IV), separately. 【Result】Results show: (1) In the first 24 min, rill width and rill depth on the slope of the two kinds of engineering mounds developed rapidly. With increasing volume of the scouring water (8-20 L·min⁻¹), both exhibited a rising trend; compared with Treatment I, Treatment II, III and IV was 0.8%, 19.3% and 27.2% higher in mean rill width, and 24.5%, 126.2% and 95.1% higher in mean rill depth, respectively, on the mound of red soil, and 3.7%, 62.4% and 108.2% higher and 18.2%, 87.9% and 95.5% higher, respectively, on the mound of lou soil. The relationships of rill width and depth with duration of scouring was statistically significant on the mound of red soil ($R^2>0.858$, $P<0.01$), and of lou soil ($R^2>0.689$, $P<0.01$), too; (2) Rill width-depth ratios on the two types of mounds both fluctuated during the initial period (0-24min) and then levelled off during the late period (24~45 min); compared with Treatment I, Treatment III was the lowest in mean width/depth ratio on either mound, being 115% lower on the mound of red soil and 20% lower on the mound of lou soil; (3) The relationships of runoff shear force and power of rill flow on slope surface with width and depth of rill could be described with a power function ($R^2>0.602$, $P<0.01$); runoff shear force was a parameter more suitable for describing development of rill depth on the mound of red soil, and runoff power was for describing development of rill width on the mound of lou soil; and (4) Extremely significant linear function relationships were observed of cumulative sediment yield of the slope with rill width and rill depth ($R^2>0.897$, $P<0.01$); rill width contributed 84.9% and rill depth did 15.1% to the cumulative sediment yield on the mound of red slope, and 22.5% and 77.5%, respectively, on the mound of lou soil. 【Conclusion】This study may provide a theoretical reference for research on rill erosion mechanism on engineering mounds different in texture.

Key words: Scour; Engineering mound; Rill morphology; Sediment yield

生产建设活动中开挖和堆垫形成了大量下垫面结构复杂、抗蚀性差^[1]的工程堆积体,其主要由平台和坡面构成^[2],降雨过程中除雨滴溅蚀及降雨汇流对坡面产生侵蚀外,平台对径流的汇集作用,极易在堆积体坡面形成大量形状不一的细沟^[3],为进一步的水土流失提供通道,引发侵蚀强烈的沟蚀^[4]。沟蚀主要受径流的水动力学特性和土壤质地的影响,其侵蚀产沙特征又主要取决于水流的水动力学特性^[5],且细沟形态与侵蚀产沙、水动力学特性间相互影响^[6]。一方面,径流冲刷不断塑造细沟形态,另一方面,细沟的形成使得径流不断汇集进一步提高了径流的挟沙能力,进而又促进细沟的发育^[7],三者之间作用机理复杂,因而近年来,探究细沟形态与侵蚀产沙、水动力学特性间的关系已经成为研究的热点^[8-10]。此外,土壤是影响坡面沟蚀的主要内因^[11],其类型不同,抗冲抗蚀性不同,关于不同

土壤类型细沟形态发育与侵蚀产沙的研究很多,主要聚焦于三个方面:(1)分析细沟的测量指标和形态指标^[12-15];(2)探究坡面沟蚀过程中水沙的发育状况^[16-17];(3)研究某一特定土壤的细沟形态演变与侵蚀产沙之间的关系^[18-21]。综上,前人在细沟侵蚀领域的研究中已经取得了丰硕成果,但细沟侵蚀机理复杂且研究大多集中在对坡面细沟最终形态的分析上,较少研究细沟形态的动态演变过程以及形态参数与坡面侵蚀产沙间的内在联系,并且试验材料大多单一,往往仅针对某一种土壤进行分析,缺乏横向对比^[7],对不同土壤类型在坡面细沟侵蚀的影响上分析不足,限制了研究结果的适用性。

鉴于此,本文采用野外放水冲刷试验的方法,以红土和壤土堆置形成的工程堆积体为研究目标,对比分析两种土壤类型的工程堆积体坡面细沟侵蚀过程,探究两者在坡面细沟形态演变规律的异同点,

揭示水动力学参数与细沟形态、细沟形态与侵蚀产沙间的联系与差异, 以期为不同土壤类型的工程堆积体的水土流失治理提供相应的理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

供试红土取自南方红壤区的江西省新建县, 常态地貌类型以冲积平原、滨湖为主, 地势西部高, 东北低, 平均海拔 50 m, 西为西山山脉, 东南北三面环水, 西南丘陵、平原相间, 东北为滨湖平原圩区, 土壤以红壤土为主。该区属亚热带季风气候, 四季分明、气候温和、日照充足、雨量充沛, 年均降水量 1 518 mm, 年均蒸发量 1 268 mm, 年均气温 17.5 °C, 主要植被类型有油桐、蔓荆等。

供试壤土取自陕西杨凌, 地处关中平原腹地, 位于鄂尔多斯地台南端的渭河地堑, 属渭河谷地新生代断陷沉降带, 区内地势南低北高, 海拔介于

435~563 m, 境内塬、坡、滩地交错, 土壤肥沃, 适宜多种农作物生长, 地带性土壤为壤土。该区属暖温带季风半湿润气候区, 年均降水量 610 mm, 年均蒸发量 1 505 mm, 年均气温 12.9 °C, 主要植被类型为杜仲、元宝枫等。

1.2 供试材料

供试红土属于中国土壤分类系统高级分类表(1998)中的铁铝土纲, 湿热铁铝土亚纲中的红壤土类, 其采自江西省新建县境内“枫生高速”建设形成的工程堆积体(29°24'14" N、116°25'21" E), 容重为 1.29 g·cm⁻³, 质量含水率为 210.3 g·kg⁻¹。壤土属于人为土纲, 早耕人为土亚纲中的土垫早耕人为土类^[22], 其取自“西宝高速”杨凌段修建过程中形成的工程堆积体(34°20'25" N、108°07'21" E), 容重为 1.25 g·cm⁻³, 质量含水率为 212.5 g·kg⁻¹。两种试验用土均过 10 mm 筛, 去除大的砾石以及杂物回填于径流小区供放水冲刷试验使用。其土壤颗粒机械组成见表 1。

表 1 土壤颗粒机械组成

Table 1 Particle size composition of the soils

土壤类型 Soil type	粒径组成 Particle size composition/%				
	<0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~0.05 mm	0.05~0.1 mm	0.1~2.0 mm
红土 Red soil	21.32	35.33	40.59	2.02	0.74
壤土 Lou soil	20.26	30.05	38.45	9.77	1.47

1.3 试验设计与观测

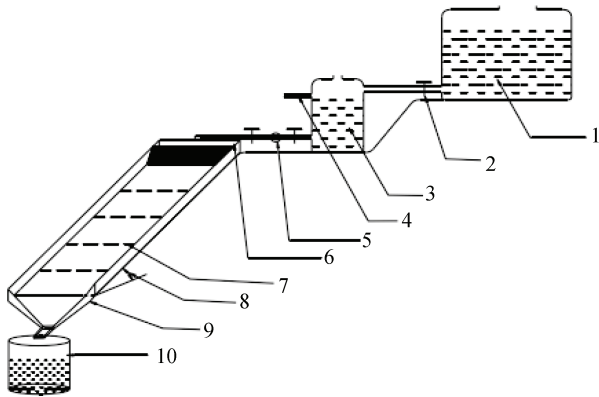
试验在中国科学院水利部水土保持研究所杨凌水土保持野外科学试验站进行, 试验雨强的设计依据是基于对采样地多年降雨气象资料的调查, 统计暴雨发生时出现频率较高的 30 min 雨强, 取整后最终设计为 1.0、1.5、2.0、2.5 mm·min⁻¹, 放水流量依据暴雨产流在试验小区上产生的单宽流量得到, 设定为 4 个梯度放水流量(8、12、16、20 L·min⁻¹), 试验坡度基于现有对工程堆积体的研究成果及野外对工程堆积体的调查结果^[23-24], 设定试验坡度为 32°, 本试验进行一次重复, 共 16 场, 冲刷历时 45 min。

试验小区长 8 m, 宽 1 m, 四周采用铝塑板控制边界条件, 小区内覆土厚 0.5 m, 铝塑板高出坡面 0.1 m。为控制试验小区本底相近, 试验前对 8 个小区同时进行覆土回填和坡面整理。为保证每个小区试验前土壤含水量基本一致, 试验开始前 24 h 在坡

面均匀撒水使土壤饱和, 并用塑料布覆盖, 试验前对放水流量进行 3 次率定, 使得误差不超过 5%。在试验小区内, 从上至下设置 8 个间隔为 1 m 的细沟观测断面, 用以测定沟宽、沟深; 然后从 8 个断面中选取断面 2、4、6(距坡顶 2、4、6 m)设置为流速、流宽、水深测量断面; 在各观测断面 0~20 cm 深度处取土测得初始容重介于 1.23~1.46 g·cm⁻³, 均值为 1.33 g·cm⁻³, 质量含水率介于 184.5~227.3 g·kg⁻¹, 均值为 208.2 g·kg⁻¹。

试验采用恒压桶供水确保溢流槽的稳定出流, 前 3 min 内每隔 1 min 测量一次稳定断面流速、水深以及沟宽、沟深并接取泥样 1000 mL, 此后每 3 min 测定一次, 各试验参数的获取主要来源于对各断面处主沟的量测。坡面水流流速采用电解质薄层水流测定仪(JZ-NB1710)结合示踪法^[25]进行测量, 两种方法取平均值作为流速实测值, 然后根据流态乘

以相应校正系数作为断面平均流速^[16]；水深测定采用重庆水文仪器制造厂生产的 SX40-1 型水位测针；沟宽、沟深的获取采用精度为 1 mm 的钢尺测量；试验前后溢流槽中水温的均值作为试验水温。试验放水冲刷装置见图 1。



注：1.蓄水桶，2.水阀，3.恒压桶，4.溢流管，5.流量计，6.溢流槽，7.观测断面，8.坡度，9.试验小区，10.集流桶。Note: 1. Storage tank, 2. Valve, 3. Constant barrel, 4. Overflow pipe, 5. Flowmeter, 6. Overflow tank, 7. Observations section, 8. Gradient, 9. Experiment plot, 10. Collecting bucket

图 1 试验放水冲刷装置图

Fig. 1 Layout of the apparatus used in the field scouring experiment

1.4 数据处理

(1) 土壤剥蚀率 D_r : 坡面在水流冲刷下单位时间、单位面积上的产沙量^[26]，公式为：

$$D_r = \frac{M}{bLT} \quad (1)$$

式中， D_r 为土壤剥蚀率， $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ； M 为 T 时段内的产沙量， kg ； b 为过水断面宽度， m ； L 为试验小区坡长， m 。

(2) 径流剪切力 τ : 引起土壤颗粒分离并输移泥沙的径流冲刷力^[27]，公式为：

$$\tau = \rho g R J \quad (2)$$

式中， τ 为径流剪切力， Pa ； ρ 为浑水密度， $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； g 为重力加速度， $9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ； R 为水力半径， m ，由于坡面水流为薄层径流，可用平均水深代替； J 为水力坡度， $\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ，可用坡度的正弦值近似代替。

(3) 水流功率 ω : 作用于单位面积的水流所消

耗的功率^[28]，公式为：

$$\omega = \tau v \quad (3)$$

式中， ω 为径流功率， $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ； v 为坡面平均水流流速， $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

数据处理及图形绘制采用 Excel2010、SPSS19.0、Origin2018。

2 结 果

2.1 细沟形态发育过程

2.1.1 沟宽的发育过程 不同流量条件下两种堆积体坡面细沟沟宽随冲刷历时的变化过程见图 2，图中两种堆积体坡面细沟沟宽随冲刷历时总体上呈增大趋势。不同流量条件下，壤土沟宽发育差异显著，红土不显著，红土和壤土坡面细沟沟宽最终稳定值不同，依次为 13.7~20.9 cm 和 8.8~21.1 cm。红土沟宽在前 6 min 内急剧上升，6~18 min 发育平稳，18~24 min 又迅速发育，之后的 21 min 呈增幅较缓的上升趋势，沟宽发育主要集中在 0~24 min，其发育宽度占总宽度的 47.9%~65.7%；壤土沟宽 0~24 min 发育迅速，发育宽度占总宽度的 58.7%~91.9%。

红土坡面细沟沟宽均值按放水流量递增依次为 11.4、11.5、13.6、14.5 cm，与 $8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 相比分别增加了 0.8%、19.3%、27.2%；而壤土坡面细沟沟宽均值按放水流量递增依次为 8.5、8.8、13.8、17.7 cm，与 $8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 相比分别增加了 3.7%、62.4%、108.2%，表明两种堆积体坡面细沟沟宽随流量增大呈显著增大趋势，流量增大对壤土沟宽发育的促进作用大于红土，当流量增至 $16 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ，其促进沟宽发育的作用减弱。小流量条件下 ($8、12 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)，红土坡面细沟沟宽均值大于壤土，大流量时 ($16、20 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$) 相反，说明放水流量的增大使壤土坡面细沟更易横向发展。

以冲刷历时为自变量，沟宽为因变量，拟合二者间的函数关系 (表 2)，表中红土坡面细沟沟宽与冲刷历时呈良好的线性函数关系，而壤土则呈现为良好的对数函数关系，表明红土和壤土坡面细沟可以分别用沟宽与冲刷历时的线性函数和对数函数关系来描述细沟沟宽的动态发育过程。表 2 中两种堆积体坡面细沟拟合方程系数均随流量增大而增大，说明流量增大使得沟宽发育速率增大。

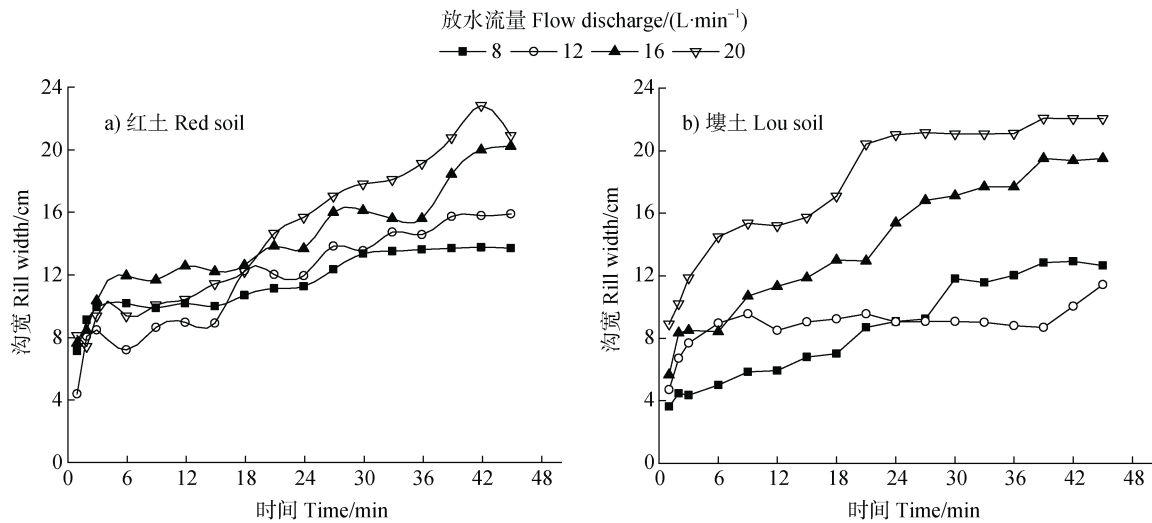


图 2 工程堆积体坡面细沟沟宽的发育过程

Fig. 2 Development process of rills in width on slopes of engineering mounds

表 2 工程堆积体坡面细沟沟宽与冲刷历时拟合函数

Table 2 Functions for fitting relationship of rill width with duration of scouring on slopes of engineering mounds

土壤类型 Soil type	放水流量 Flow discharge/ (L·min ⁻¹)	拟合方程 Fitting function	决定系数 R ²	P
红土 Red soil	8	$y = 0.128x + 8.690$	0.893	<0.01
	12	$y = 0.231x + 6.604$	0.919	<0.01
	16	$y = 0.239x + 8.895$	0.927	<0.01
	20	$y = 0.337x + 7.294$	0.975	<0.01
壤土 Lou soil	8	$y = 2.620\ln(x) + 1.516$	0.807	<0.01
	12	$y = 1.038\ln(x) + 6.021$	0.689	<0.01
	16	$y = 3.689\ln(x) + 3.973$	0.879	<0.01
	20	$y = 3.779\ln(x) + 7.679$	0.944	<0.01

注: y 为沟宽, x 为时间 ($n=68$)。Note: y stands for rill width, x for duration of water discharge (number of samples $n=68$) .

2.1.2 沟深的发育过程 不同流量条件下两种堆积体坡面细沟沟深随冲刷历时变化的过程见图 3, 图中两种堆积体坡面细沟沟深随冲刷历时总体上呈增大趋势, 两种堆积体坡面细沟沟深最终稳定值不同, 红土和壤土沟深最终稳定值依次为 9.33~18.8 cm 和 10.1~18.8 cm, 两种堆积体坡面细沟沟深的发育在小流量 (8、12 L·min⁻¹) 和大流量 (16、20 L·min⁻¹) 条件下差别不显著, 但当流量从小流量增至大流量时, 沟深发育明显, 红土沟深均值最大增幅为 126.2%, 壤土沟深均值最大增幅为 87.9%。两种堆积体坡面细沟沟深在 0~24 min 内发育迅速、增幅较大, 红土坡面细沟发育深度占总深度的 46.0%~80.7%,

壤土坡面细沟发育深度占总深度的 55.9%~82.4%。

红土坡面细沟沟深均值按放水流量递增依次为 6.1、7.6、13.8、11.9 cm, 与 8 L·min⁻¹ 相比分别增加了 24.5%、126.2%、95.1%; 而壤土坡面细沟沟深均值按放水流量递增依次为 6.6、7.8、12.4、12.9 cm, 与 8 L·min⁻¹ 相比分别增加了 18.2%、87.9%、95.5%, 表明两种堆积体坡面细沟沟深随流量增大呈显著增大趋势, 但当流量增至 16 L·min⁻¹, 其促进沟深发育的作用减弱。整体来看, 小流量条件下 (8、12 L·min⁻¹), 红土坡面细沟沟深小于壤土, 而大流量时 (16、20 L·min⁻¹) 则相反, 说明放水流量的增大使得红土坡面细沟更易纵向发展。

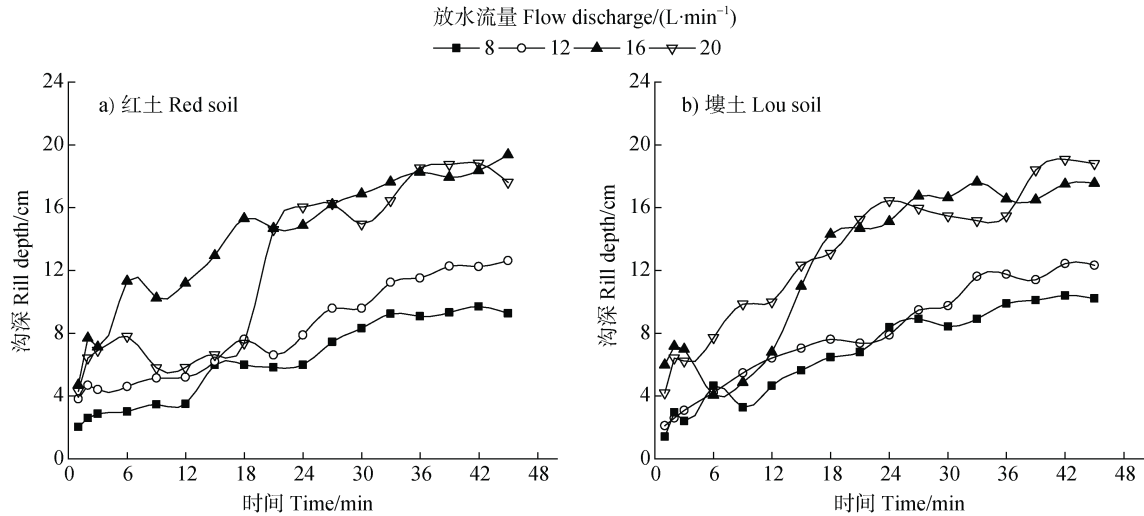


图3 工程堆积体坡面细沟沟深的发育过程

Fig. 3 Development process of rill depth on slopes of engineering mounds

以冲刷历时为自变量, 沟深为因变量, 拟合二者间的函数关系 (表 3), 表中红土坡面细沟沟深与冲刷历时呈良好的线性函数关系, 而壤土则呈现为良好的对数函数关系。表明红土和壤土坡面细沟可分别用沟深与冲刷历时的线性函数和对数函数关系来描述沟深的动态发育过程。表 3 中两种堆积体坡面细沟其拟合方程系数均随着流量的增大而增大, 说明流量的增大使沟深发育的速率变大。

2.1.3 宽深比的动态发育过程 细沟侵蚀过程中伴随着下切侵蚀、溯源侵蚀、沿程侵蚀, 使得细沟不断变长、拓宽以及加深, 宽深比能够反映坡面径流冲刷过程中细沟沟槽形状的变化过程。不同流量条件下两种堆积体坡面细沟宽深比随冲刷历时的变化过程见图 4, 图中两种堆积体坡面细沟宽深比呈现前 0~24 min 波动变化, 而后 24~45 min 相对平稳的变化趋势。

表 3 工程堆积体坡面细沟沟深与冲刷历时拟合函数

Table 3 Functions fitting relationship of rill depth and duration of scouring on slopes of engineering mounds

土壤类型	放水流量	拟合方程	决定系数	<i>P</i>
Soil type	Flow discharge/ (L·min ⁻¹)	Fitting function	<i>R</i> ²	
红土 Red soil	8	$y = 0.184x + 2.171$	0.952	<0.01
	12	$y = 0.212x + 3.419$	0.966	<0.01
	16	$y = 0.288x + 7.650$	0.904	<0.01
	20	$y = 0.353x + 4.400$	0.858	<0.01
壤土 Lou soil	8	$y = 2.550\ln(x) - 0.192$	0.871	<0.01
	12	$y = 2.882\ln(x) + 0.159$	0.892	<0.01
	16	$y = 3.827\ln(x) + 2.217$	0.710	<0.01
	20	$y = 3.963\ln(x) + 2.421$	0.918	<0.01

注: *y* 为沟深, *x* 为时间 ($n=68$)。Note: *y* stands for rill depth, *x* for duration of water discharge (number of samples $n=68$) .

红土坡面细沟宽深比变化呈现波动减小至相对平稳的趋势, 而壤土呈现为前期陡增陡降而后逐渐减小至平稳的趋势。放水流量为 8、12、16、20 L·min⁻¹ 时, 红土坡面细沟宽深比最终稳定值依次为 1.56、1.35、0.97、1.10, 随流量增大宽深比均值

变化显著, 较 8 L·min⁻¹ 依次减少 0.71、1.15、0.89; 放水流量为 8、12、16、20 L·min⁻¹ 时, 壤土坡面细沟宽深比最终稳定值依次为 1.24、0.84、1.07、1.28, 随流量增大宽深比均值变化显著, 较 8 L·min⁻¹ 依次减少 0.06、0.20、-0.03。

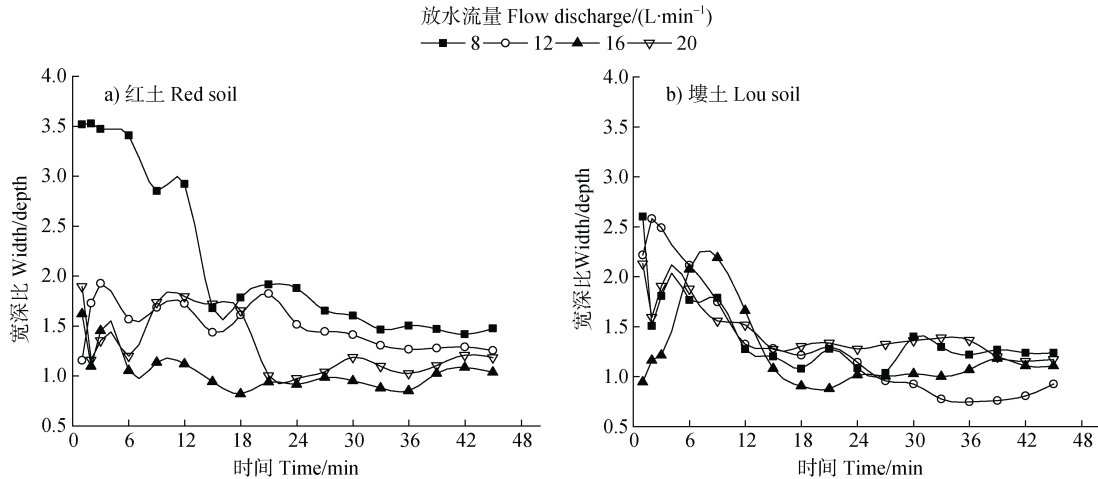


图 4 工程堆积体坡面细沟宽深比的发育过程

Fig. 4 Development process of rill width-depth ratio on slopes of engineering mounds

对比两种堆积体坡面细沟宽深比的最终稳定值，发现小流量（8、12 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ ）条件下，红土坡面细沟宽深比最终稳定值大于壤土，而大流量条件下（16、20 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ ）则相反，说明随放水流量增大，红土更易向纵深发育，而壤土更易横向发展。对于两种堆积体而言，当流量增至 16 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时，宽深比均迅速减小，说明此刻细沟主要以下切侵蚀为主，但红土堆积体坡面细沟减小速率较壤土堆积体更快，减小幅度近 50%；当流量增至 20 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时，两种堆积体坡面细沟宽深比减小幅度均变缓，甚至壤土坡面细沟出现减小幅度为负的情况，说明此刻壤土在径流冲刷过程中沟壁失稳坍塌严重，侧向侵蚀剧烈，水流下切能力减弱，重力作用加剧。

2.2 水动力学参数与细沟形态参数的关系

水流剪切力、水流功率等水动力学参数被用来描述坡面径流挟沙能力的大小，而坡面径流挟沙力控制着坡面侵蚀，影响着坡面细沟的发育程度，同时细沟形态也改变着坡面流的水动力学特性，它们之间相互影响，故分析坡面流水动力学参数与细沟形态间的关系，对于正确认识坡面细沟侵蚀有着重要作用。

对细沟形态参数和水动力学参数进行两两相关性分析，得到相关矩阵（表 4），由表 4 可知径流剪切力（ τ ）、径流功率（ ω ）与沟宽（ w ）、沟深（ d ）呈极显著正相关关系（ $r>0.687$, $P<0.01$ ），与宽深比（ u ）呈极显著负相关关系（ $r>-0.338$, $P<0.01$ ），红土坡面细沟水动力学参数与沟宽、沟深、宽深比的相关系数绝对值大小依次为 $d>w>u$ ，而壤土则呈现

为 $w>d>u$ ，说明红土坡面细沟水动力学参数和沟深的相关性强于与沟宽和宽深比的相关性，而在壤土坡面细沟水动力学参数与沟宽的相关性则更为紧密，上述结果表明，土壤类型不同，其水动力学参数与细沟形态参数间关系密切的程度不一。

为了更好地描述两种堆积体坡面细沟水动力学参数与细沟形态参数间的关系，红土选取与水流剪切力、径流功率关系密切的沟深进行回归分析，而壤土则选取沟宽进行回归分析（表 5），发现两种堆积体坡面细沟水流剪切力、水流功率与沟宽、沟深均呈现极显著幂函数关系，其中，径流剪切力相比径流功率更适合描述红土堆积体坡面细沟沟深的发育状况（ $R^2>0.651$, $P<0.01$ ），而径流功率相比径流剪切力更适合描述壤土堆积体坡面细沟沟宽的发育状况（ $R^2>0.732$, $P<0.01$ ）。

2.3 细沟形态参数与侵蚀产沙间的关系

由表 4 可知，红土、壤土堆积体其土壤剥蚀率与沟宽、沟深呈极显著正相关关系（ $r>0.552$, $P<0.01$ ），而与宽深比呈极显著负相关关系（ $r>-0.179$, $P<0.01$ ），红土坡面细沟土壤剥蚀率与沟宽、沟深、宽深比的相关系数绝对值大小依次为 $d>w>u$ ，而壤土则呈现为 $w>d>u$ ，为进一步揭示它们之间的内在联系，对红土、壤土堆积体分别选取与土壤剥蚀率关系密切的沟深、沟宽进行点绘（图 5），由图 5 可知沟宽、沟深与土壤剥蚀率之间的关系均能用幂函数来表示（ $r>0.674$, $P<0.01$ ），就发育速率而言，壤土坡面土壤剥蚀率随沟宽的发育速率大于红土坡面土壤剥蚀率随沟深的发育速率。

表 4 工程堆积体试验参数相关关系矩阵

Table 4 Correlation matrix of the parameters involved in the experiment on the engineering mounds

土壤类型 Soil type		w	d	u	τ	ω	Dr	Sum
红土 Red soil	w	1.000						
	d	0.898**	1.000					
	u	-0.482**	-0.727**	1.000				
	τ	0.747**	0.750**	-0.556**	1.000			
	ω	0.687**	0.722**	-0.598**	0.966**	1.000		
	Dr	0.592**	0.639**	-0.544**	0.906**	0.936**	1.000	
	Sum	0.944**	0.883**	-0.530**	0.853**	0.809**	0.703**	1.000
壤土 Lou soil	w	1.000						
	d	0.897**	1.000					
	u	-0.309**	-0.636**	1.000				
	τ	0.809**	0.798**	-0.420**	1.000			
	ω	0.842**	0.779**	-0.338**	0.980**	1.000		
	Dr	0.552**	0.440**	-0.179*	0.750**	0.796**	1.000	
	Sum	0.894**	0.946**	-0.473**	0.824**	0.814**	0.472**	1.000

注: **表示 $P < 0.01$; *表示 $P < 0.05$, $n=68$; w : 沟宽; d : 沟深; u : 宽深比; τ , 径流剪切力; ω : 径流功率; Dr : 土壤剥蚀率; Sum: 累计产沙量。Note: **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$; $n=68$; number of samples=68; w stands for rill width; d for rill depth; τ for shear stress; ω for stream power; Dr for soil erosion rate; and Sum for cumulative sediment yield.

表 5 水动力学参数与细沟形态指标关系

Table 5 Relationship between hydrodynamic parameters and rill morphology indexes

土壤类型 Soil type	参数 Parameters	拟合方程 Fitting function	决定系数 R^2	P
红土 Red soil	τ, d	$d = 0.775\tau^{0.618}$	0.651	<0.01
红土 Red soil	ω, d	$D = 1.921\omega^{0.613}$	0.602	<0.01
壤土 Lou soil	τ, w	$w = 2.103\tau^{0.430}$	0.728	<0.01
壤土 Lou soil	ω, w	$w = 3.150\omega^{0.536}$	0.732	<0.01

坡面侵蚀产沙与细沟形态相互影响, 其侵蚀过程伴随沟宽拓展、沟深下切、沟长延伸, 坡面侵蚀产沙过程复杂, 为明确细沟形态对累计产沙量的影响, 选取与累计产沙量关系最为密切的沟宽、沟深作为因变量进行回归分析(表 6), 由表可知两种堆积体累计产沙量与二者均存在极显著线性函数关系($r > 0.952$, $P < 0.01$), 方程中参数前的系数表征该参数对累计产沙量的影响大小, 就红土而言, 沟宽、沟深对累计产沙量贡献依次为 84.9%、15.1%, 沟宽的影响大于沟深, 对壤土而言, 则依次为 22.5%、77.5%, 沟深的影响大于沟宽, 说明土壤类型不同,

沟宽、沟深的发育对坡面侵蚀产沙的影响不同。

3 讨论

工程堆积体作为生产建设区水土流失量的主要来源, 对于项目建设区的水土资源和项目本身的安全意义重大。虽然红土堆积体和壤土堆积体分属不同地域, 但无论是红土区还是壤土区均属于水区, 降雨和径流是致使土壤发生侵蚀的主要外营力, 土壤侵蚀强度和侵蚀量的大小直接受降雨强度及年内分配程度影响^[29], 因而, 在降雨和径流特点各异的

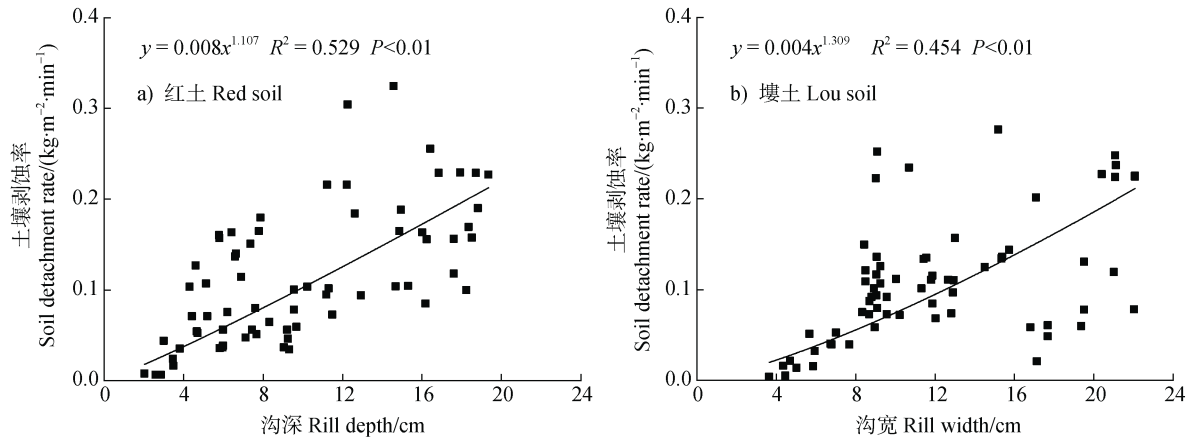


图 5 细沟形态参数与土壤剥蚀率的关系

Fig. 5 Relationship between rill morphology parameters and soil denudation rate

表 6 累计产沙量与细沟形态参数间的函数关系

Table 6 Function relationship between cumulative sediment yield and rill morphology parameters

土壤类型 Soil type	参数 Parameters	拟合方程 Fitting function	决定系数 R^2	P
红土 Red soil	w, d, Sum	$\text{Sum}=16.387w+2.904d-146.568$	0.898	<0.01
壤土 Lou soil	w, d, Sum	$\text{Sum}=3.666w+12.627d-71.232$	0.906	<0.01

这两个区域其侵蚀特点具有显著差异。红土隶属的南方红壤区降雨年内分布不均，且多为持续性暴雨^[30]，暴雨形成的径流量超过全年总径流量的 15%，引发的以面蚀为主^[31]的土壤侵蚀量超过全年总侵蚀量的 37%^[32]。壤土所属的黄土高原地区降雨年内分布不均，且多为短历时、高强度暴雨，水土流失集中度高，以沟蚀为主^[33]的多年侵蚀量往往决定于几场降雨^[34]。对于结构疏松、植物根系缺失、堆置坡度大的工程堆积体而言，暴雨发生时，将在堆积体坡面形成强烈的细沟侵蚀，引发严重的水土流失，因此本文通过野外径流冲刷试验，尝试从描述细沟的基本形态参数着手，对比分析两种土壤类型工程堆积体坡面细沟的侵蚀过程，以期为不同土壤类型工程堆积体坡面水土保持措施合理配置提供理论依据。

3.1 细沟形态参数变化

本文中两种堆积体坡面沟宽、沟深均随冲刷历时延长呈增大趋势，与牛耀彬等^[19]关于黑垆土的研究结果相似，同时本文指出小流量条件下（8、12 L·min⁻¹），红土沟宽尺寸较壤土大，而沟深尺寸较壤土小，大流量条件下（16、20 L·min⁻¹）则相反，说明红土坡面更易侵蚀形成细沟，而壤土坡面一旦形成细沟，其侵蚀产沙及细沟尺寸将会急剧增大，造

成差异的主要原因在于土壤本身性质不同，红土土壤颗粒较细遇水易黏结，易在坡面形成结皮，延缓了雨水入渗，促进坡面径流形成^[35]，小流量条件下，红土土体结皮下层土壤含水量低，土体中水的存在形式以结合水为主，有利于提高其颗粒间联结引力，使红土坡面在小流量条件下更易形成宽浅的细沟，相反，壤土土壤质地粗、孔隙大、透水通气性能强于红土^[32]，在小流量条件下，试验初期入渗强烈，不易产生径流冲刷形成细沟，而大流量条件下随着水分入渗，土壤颗粒逐渐吸水饱和，使得土壤颗粒间接触点变少，分子引力减弱，加之结合水膜的增厚，使得土壤颗粒间更易发生相对位移，摩擦力减弱^[36]，壤土抗剪强度参数中的黏聚力和内摩擦角均随含水率增大而显著减小^[37]，加之大流量条件下降雨强度大于入渗速率，产流迅速，随着细沟逐渐形成，径流剪切力随之增大^[3]，故而在大流量条件下，壤土的细沟尺寸远大于红土。对壤土而言，沟宽、沟深与时间拟合关系均为对数函数关系，这与齐星圆等^[38]在变坡长条件下的研究结果一致，但对于红土而言则为线性函数关系，表明壤土堆积体在经历一定时间冲刷后，其细沟发育速率将会减慢，而红土坡面细沟随时间发育平稳，其主要原因在于壤土

中决定土壤抗侵蚀性主导因子之一的粗粉粒(0.01~0.05 mm)和砂粒(>0.05 mm)含量较红土高^[39], 壤土坡面细颗粒经冲刷流失后, 残余粗颗粒致使其内部孔隙进一步增大, 进而入渗能力增强, 加上大的粗颗粒本身固有的较强抗蚀能力, 致使壤土堆积体在冲刷后期细沟尺寸发育平缓。宽深比在两种堆积体中均呈先减小后平稳的变化趋势, 随流量增大红土宽深比减幅明显, 而壤土减幅不显著甚至宽深比增大, 表明红土堆积体坡面更易向“窄深式”发展, 而壤土则更趋向于“宽浅式”发育, 主要原因是细沟断面形态受土壤质地影响显著, 而南方红土与北方壤土在土壤结构性上有较大的差异^[31], 壤土中团聚体较多容易分散, 易发生侵蚀, 而红土黏粒和有机质含量高, 土壤胶结力强, 团聚体稳定, 水稳性团粒含量多, 使得细沟沟壁较为稳定^[40], 而壤土土壤颗粒胶结力强、沟壁稳定性差易失稳坍塌, 同时, 沟壁的坍塌引发流速降低、流宽增大进而使得径流挟沙能力变弱, 易在细沟下部发生沉积^[41], 因而壤土细沟更易向“宽浅式”发展。

3.2 水动力学参数与细沟形态、细沟形态与侵蚀产沙关系

水动力学参数与细沟形态、细沟形态与侵蚀产沙间相互影响, 三者之间关系复杂^[6]。本研究表明径流剪切力较径流功率更适合描述红土沟深的发育趋势, 而径流功率较径流剪切力更适合描述壤土沟宽的发育过程, 与倪世民等^[7]提出的单位水流功率相比水流功率适合描述不同含沙量条件下红黏土细沟形态中的沟深与宽深比的发育不同, 究其原因可能在于作为侵蚀对象的土壤类型不同。此外, 本研究指出细沟形态参数沟宽、沟深和土壤剥蚀率之间存在幂函数关系, 其中红土堆积体土壤剥蚀率与沟深关系密切, 壤土堆积体土壤剥蚀率则与沟宽关系密切, 与张攀等^[21]指出细沟形态参数沟宽、沟深与土壤剥蚀率间具有对数函数关系不同, 其原因可能是红土堆积体坡面细沟沟深的下切发育致使径流进一步汇集增大了径流动能, 进而显著提升了土壤剥蚀率, 而壤土堆积体坡面细沟沟壁的失稳坍塌导致沟宽的快速发育是径流剥蚀能力增大的主要原因。坡面泥沙的侵蚀与细沟形态发育具有密切关系, 土壤类型深刻影响着坡面侵蚀, 本研究指出累计产沙量与沟宽、沟深之间均具有显著的线性正相关关系, 而与细沟宽深比则存在显著的负相关关系, 且沟宽、

沟深对两种堆积体累计产沙量的贡献率不同, 对于红土堆积体而言, 沟宽的扩大对其累计产沙量影响显著, 而沟深的下切发育对壤土累计产沙量的作用明显, 与盛贺伟等^[42]对黑垆土的研究结果“累计产沙量与沟宽呈显著负相关关系”完全不同, 进一步印证了土壤类型深刻影响着坡面侵蚀过程。

综上, 针对红土和壤土堆积体细沟侵蚀过程的差异, 在防控工程堆积体坡面水土流失和合理配置治理措施方面, 不仅要考虑土壤本身质地的因素, 也要考虑当地降雨径流对侵蚀的影响, 综合考虑采取不同的防控措施。南方红壤区土壤黏粉粒含量高, 加之当地多持续性暴雨, 红土易发生蓄满产流, 但红土土壤颗粒遇水易黏结, 易在坡面形成结皮, 延缓了雨水入渗, 促进坡面径流形成, 因此, 在治理与防护时应在坡面上方合理布设截排水措施, 适当的布设植物篱也可以有效削弱径流侵蚀动力^[43], 针对这种持续性暴雨, 还应在坡面底部布设挡土墙设置反滤层, 加大坡体内部排水, 防治壤中流、管涌等现象的发生影响坡体稳定; 壤土所属的北方黄土高原区, 其土壤粉砂粒含量高、孔隙大, 加之短历时高强度暴雨的影响, 工程堆积体堆置时应加大密实度, 提高土壤容重, 同时也应加强坡面排水, 布设如鱼鳞坑和水平阶之类的径流消能设施^[44]。堆置时进行适当的削坡分级可显著提高坡面土壤的抗蚀能力^[45], 同时也要重视植物措施的布设, 促进堆积体自然生态能力的恢复。

4 结 论

本文通过对红土和壤土工程堆积体进行野外放水冲刷试验, 对比研究了两种土壤类型的工程堆积体坡面细沟侵蚀过程, 结果表明: 两种堆积体坡面细沟沟宽和沟深均随冲刷历时延长, 呈增大趋势, 且放水流量增大与 $8 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 相比红土沟宽均值分别增加0.8%、19.3%、27.2%, 沟深均值分别增加24.5%、126.2%、95.1%, 而壤土则为3.7%、62.4%、108.2%和18.2%、87.9%、95.5%。放水流量增至 $16 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 其促进沟宽、沟深发育的作用逐渐减弱。两种工程堆积体坡面沟宽、沟深与冲刷历时拟合函数关系各异, 红土堆积体可用线性函数表示, 而壤土堆积体可用对数函数描述。两种堆积体坡面细沟宽深比变化呈现先波动后平稳趋势, 随放水流量增大,

红土堆积体宽深比减幅明显，最大减幅出现在 $16 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ，红土最高减少了 1.15，壤土最高减少了 0.20。径流剪切力相比径流功率更适合描述红土堆积体沟深发育状况，而径流功率较径流剪切力更能体现壤土堆积体沟宽发育过程；沟宽、沟深对坡面累计产沙影响各异，红土中沟宽、沟深对累计产沙量贡献依次为 84.9%、15.1%，在壤土中则为 22.5%、77.5%。该研究可深入了解两种质地工程堆积体细沟侵蚀过程，为不同土壤类型的工程堆积体边坡细沟防护与治理提供参考，同时，今后研究应继续优化测量方法，纳入更多变量（如砾石含量），分析间歇性降雨或放水冲刷试验中细沟侵蚀过程，以提高研究的全面性和精准性。

参考文献 (References)

- [1] 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. [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.]
- [2] Zhang L T, Gao Z L, Li Z B, et al. Downslope runoff and erosion response of typical engineered landform to variable inflow rate patterns from upslope[J]. Natural Hazards, 2016, 80 (2): 775—796.
- [3] Niu Y B. Study on characteristics of soil erosion of engineering accumulation under the conditions of rainfall and inflow[D]. Yangling, Shannxi: Northwest A&F University, 2019. [牛耀彬. 降雨和上方来水条件下工程堆积体土壤侵蚀特征研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2019.]
- [4] Kimaro D N, Poesen J, Msanya B M, et al. Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains, Tanzania: Interrill and rill erosion[J]. Catena, 2008, 75 (1): 38—44.
- [5] Li Z B, Qin B S, Kang W, et al. Indoor experimental studies on hydrodynamic characteristics of runoff in rill procession steep slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24 (6): 64—68. [李占斌, 秦百顺, 亢伟, 等. 陡坡面发育的细沟水动力学特性室内试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24 (6): 64—68.]
- [6] Dong Y Q, Zhuang X H, Lei T W, et al. A method for measuring erosive flow velocity with simulated rill[J]. Geoderma, 2014, 232/233/234: 556—562.
- [7] Ni S M, Feng S Y, Wang J G, et al. Relationship between rill erosion morphology and hydraulic characteristics and sediment yield on artificial soils slope with different textures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34 (15): 149—156. [倪世民, 冯舒悦, 王军光, 等. 不同质地重塑土坡面细沟侵蚀形态与水力特性及产沙的关系[J]. 农业工程学报, 2018, 34 (15): 149—156.]
- [8] 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. [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.]
- [9] Wang J, Li H, Meng Q Q, et al. Characteristics of rill cross section morphology, hydrodynamics and sediment-carrying capacity on loess slopes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29 (3): 32—37. [王健, 李鹤, 孟秦倩, 等. 黄土坡面细沟横断面形态及其水流动力学与挟沙特性[J]. 水土保持学报, 2015, 29 (3): 32—37.]
- [10] Zhang R B, Zhang L P, Fu X T. Research on relationships between sediment yield and hydraulics parameters on slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31 (5): 81—86. [张锐波, 张丽萍, 付兴涛. 坡面侵蚀产沙与水力学特征参数关系模拟[J]. 水土保持学报, 2017, 31 (5): 81—86.]
- [11] Chen J J, Sun L Y, Cai C F, et al. Rill erosion on different soil slopes and their affecting factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (2): 281—288. [陈俊杰, 孙莉英, 蔡崇法, 等. 不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素[J]. 土壤学报, 2013, 50 (2): 281—288.]
- [12] Raff D A, Ramírez J A, Smith J L. Hillslope drainage development with time: A physical experiment. Geomorphology, 2004, 62 (3/4): 169—180.
- [13] Rong Y B, Luo H, Xie Y S, et al. Effect of rainfall intensity on erosion and rill evolution of engineering piles[J]. Journal of Sediment Research, 2016(6): 12—18. [戎玉博, 骆汉, 谢永生, 等. 雨强对工程堆积体侵蚀规律和细沟发育的影响[J]. 泥沙研究, 2016 (6): 12—18.]
- [14] Han J Q, Gao J E, Li X H, et al. Differentiation of cross section morphology in gully influenced by combined action of rainfall and runoff[J]. Water Resources and Power, 2019, 37 (2): 115—118. [韩剑桥, 高建恩, 李兴华, 等. 降雨和径流综合作用下的细沟断面形态分异特征[J]. 水电能源科学, 2019, 37 (2): 115—118.]
- [15] Zhang P, Yao W Y, Liu G B, et al. Experimental study on soil erosion prediction model of loess slope based on rill morphology[J]. Catena, 2019, 173: 424—432.
- [16] Shi D M, Jiang G Y, Peng X D, et al. Runoff erosion process on slope of engineering accumulation with different soil-rock ratio[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (17): 12—18. [石大明, 蒋国英, 彭晓东, 等. 不同土岩比工程堆积体坡面径流侵蚀过程[J]. 农业工程学报, 2015, 31 (17): 12—18.]

- 152—161. [史东梅, 蒋光毅, 彭旭东, 等. 不同土石比的工程堆积体边坡径流侵蚀过程[J]. 农业工程学报, 2015, 31 (17): 152—161.]
- [17] Ding W B, Li Y X, Shi D M, et al. Contrast study on simulated runoff erosion of two engineering accumulation slopes[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (3): 558—569. [丁文斌, 李叶鑫, 史东梅, 等. 两种工程堆积体边坡模拟径流侵蚀对比研究[J]. 土壤学报, 2017, 54 (3): 558—569]
- [18] Lin Z, Shi D M, Lou Y B, et al. Development of rills on slopes of mine-engineering dumps and its relationship with water and sediment in Karst area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (3): 615—626. [林姿, 史东梅, 娄义宝, 等. 岩溶区煤矿工程堆积体边坡细沟发育及其水沙关系研究[J]. 土壤学报, 2019, 56 (3): 615—626.]
- [19] Niu Y B, Gao Z L, Li Y H, et al. Rill morphology development of engineering accumulation and its relationship with runoff and sediment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (19): 154—161. [牛耀彬, 高照良, 李永红, 等. 工程堆积体坡面细沟形态发育及其与产流产沙量的关系[J]. 农业工程学报, 2016, 32 (19): 154—161.]
- [20] Wen Y F, Gao P, Mu X M, et al. Effect of rainfall intensity on rill erosion on terrace wall[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25 (3): 6—10. [温永福, 高鹏, 穆兴民, 等. 降雨强度对梯田边坡细沟侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25 (3): 6—10.]
- [21] Zhang P, Yao W Y, Tang H W, et al. Rill morphology change and its effect on erosion and sediment yield on loess slope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34 (5): 114—119. [张攀, 姚文艺, 唐洪武, 等. 黄土坡面细沟形态变化及对侵蚀产沙过程的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34 (5): 114—119.]
- [22] Yan X, Chang Q R, Pan J P. Classification of loess soil in Chinese soil taxonomy in Guanzhong region[J]. *Soils*, 2004, (3): 318—322, 330. [闫湘, 常庆瑞, 潘靖平. 陕西关中地区壤土在系统分类中的归属[J]. 土壤, 2004, (3): 318—322, 330.]
- [23] Li J M, Wang W L, Huang P F, et al. Impact on erosion and sediment yield by gravel in pile body of development construction in Loess Area[J]. *Journal of Sediment Research*, 2014 (4): 10—17. [李建明, 王文龙, 黄鹏飞, 等. 黄土区生产建设工程堆积体石砾对侵蚀产沙影响[J]. 泥沙研究, 2014 (4): 10—17.]
- [24] Wang X S. The study on soil erosion and sediment yield characteristic of the spoil bank of red clay[D]. Yangling, Shannxi: Northwest A&F University, 2016. [王雪松. 红粘土工程堆积体侵蚀规律研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2016.]
- [25] Luo R T, Zhang G H, Shen R C, et al. Study on optimal length for measuring velocity of overland flow with dye tracing[J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30 (3): 5—9. [罗榕婷, 张光辉, 沈瑞昌, 等. 染色法测量坡面流流速的最佳测流区长度研究[J]. 水文, 2010, 30 (3): 5—9.]
- [26] 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. [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.]
- [27] 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. [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.]
- [28] 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. [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.]
- [29] Wang J, Xu M, Zeng H P, et al. Dynamic change analysis on soil erosion Yangbiji River Basin based on RS and GIS[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17 (5): 134—137. [王剑, 徐美, 曾和平, 等. 基于RS和GIS的漾濞河流域土壤侵蚀动态变化分析[J]. 水土保持研究, 2010, 17 (5): 134—137.]
- [30] Bao M. The statistical analysis of the persistent heavy rain in the last 50 years over China and their backgrounds on the large scale circulation[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31 (5): 779—792. [鲍名. 近50年我国持续性暴雨的统计分析及其大尺度环流背景[J]. 大气科学, 2007, 31 (5): 779—792.]
- [31] Zhang H R. Comparative study upon soil erosion processes on red soil hillslope and loess hillslope[D]. Yangling, Shannxi: Northwest A&F University, 2009. [张会茹. 红壤坡面与黄土坡面土壤侵蚀过程对比研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2009.]
- [32] Zuo C Q, Hu G H, Zhang H M. Study on soil and water erosion orderliness on sloping land of fourth century red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17 (6): 89—91. [左长清, 胡根华, 张华明. 红壤坡地水土流失规律研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17 (6): 89—91.]
- [33] Hao S S, Li M H, Ma Y Q, et al. Significance analysis of soil erosion factors in loess hilly gully region[J]. *Science*

- of Soil and Water Conservation, 2019, 17(2): 77—86. [郝姗姗, 李梦华, 马永强, 等. 黄土丘陵区土壤侵蚀因子敏感性分析[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(2): 77—86.]
- [34] Jia Z W, Jiang Z S, Liu Z. Study on relationship between rainfall characteristics and the loss of soil and water[J]. Memoir of NISWC, Academia Sinica & Ministry of Water Conservancy, 1990(2): 9—15. [贾志伟, 江忠善, 刘志. 降雨特征与水土流失关系的研究. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊(黄土高原试验区土壤侵蚀和综合治理减沙效益研究专集), 1990(2): 9—15.]
- [35] 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. [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.]
- [36] Shi B X, Chen Y S, Li N. Meso-structural experiment on influences of water content on intensity of slip zone[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(4): 13—16. [石北啸, 陈蕴生, 李宁. 含水量对滑动带强度影响的细观结构试验[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(4): 13—16.]
- [37] Ji X J, Wang S, Yu J J, et al. Experiment study about Nanyang yellow-cinnamon soil mechanics properties[J]. Journal of Nanyang Institute of Technology, 2017, 9(2): 47—51. [季宪军, 王爽, 俞晶晶, 等. 南阳黄褐土力学特性实验研究[J]. 南阳理工学院学报, 2017, 9(2): 47—51.]
- [38] Qi X Y, Gao Z L, Zhang X, et al. Rill dynamic development process accumulation with variable of loess engineering slope length[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(3): 42—48. [齐星圆, 高照良, 张翔, 等. 黄土堆积体变坡长坡面细沟动态发育过程[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 42—48.]
- [39] Li Y, Zhu X M, Tian J Y, et al. A preliminary study on soil anti - scour mechanism in loess plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 1990, 35(5): 390—393. [李勇, 朱显谟, 田积莹, 等. 黄土高原土壤抗冲性机理初步研究[J]. 科学通报, 1990, 35(5): 390—393.]
- [40] Barthès B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: Validation at several levels[J]. Catena, 2002, 47(2): 133—149.
- [41] Ni S M, Zhang D Q, Feng S Y, et al. Quantitative relationship between hydraulics parameters and soil erosion rate on remolded soil slopes with different textures[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(6): 1336—1346. [倪世民, 张德谦, 冯舒悦, 等. 不同质地重塑土坡面水沙定量关系研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1336—1346.]
- [42] Sheng H W, Sun L Y, Cai Q G. Impact of rill morphology on hillslope erosion for loess soils[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(4): 679—688. [盛贺伟, 孙莉英, 蔡强国. 黄土坡面细沟发育形态对侵蚀特征的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(4): 679—688.]
- [43] Yang S, Gao Z L, Li Y H, et al. Erosion resistance effects and mechanism of hedgerows in slope of engineering accumulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(15): 147—154. [杨帅, 高照良, 李永红, 等. 工程堆积体坡面植物篱的控蚀效果及其机制研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 147—154.]
- [44] Niu Y B, Gao Z L, Liu Z Z, et al. Experimental study on the effects of slope surface of engineering accumulation on overland flow and sediment reduction[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(5): 862—866, 904. [牛耀彬, 高照良, 刘子壮, 等. 工程堆积体坡面工程措施减流减沙效应的试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(5): 862—866, 904.]
- [45] Niu Y B, Gao Z L, Qi X Y, et al. Effects of treatment measures on soil anti-scour erodibility in engineering accumulation slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(2): 134—143. [牛耀彬, 高照良, 齐星圆, 等. 不同工程堆积体坡面治理措施对土壤抗冲刷侵蚀能力的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 134—143.]

(责任编辑: 檀满枝)