不同降雨强度及坡度条件下饱和紫色土坡面细沟形态特征

麻力文,陈晓燕,陶婷婷,李丹丹,谭文浩,孔令勇

(西南大学资源环境学院,重庆 400715)

摘要:坡面细沟形态特征的定量分析是研究细沟侵蚀的基础。通过设计3种降雨强度(30,60,90 mm/h) 和5种坡度(2°,5°,10°,15°,20°)组合条件下的人工降雨模拟试验,定量研究饱和紫色土坡面降雨强度及坡 度对细沟形态及其空间变化特征的影响。结果表明:饱和紫色土坡面细沟平均宽度、深度和细沟宽深比分 别为3.44~9.64 cm、1.01~8.14 cm和1.18~3.87,细沟宽度和深度沿坡面从上至下整体均表现出先增大 后减小的趋势,细沟宽深比沿坡面表现为上坡<中坡<下坡的变化特征。整体来看,坡面细沟宽度和深度 均与降雨强度和坡度呈正相关关系,且降雨强度和坡度对坡面细沟宽度的影响相近,而坡度对细沟深度的 影响较降雨强度更显著;细沟宽深比与降雨强度和坡度呈负相关关系,且坡度对坡面细沟宽深比的影响显 著大于降雨强度的影响。研究结果对认识饱和土壤坡面细沟侵蚀形态变化规律、进一步探究坡面细沟发 育过程具有重要参考价值。

关键词:饱和紫色土;细沟侵蚀;形态特征;模拟降雨
 中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2023)01-0077-07
 DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.012

Morphological Characteristics of Rills on the Slope Surface of Saturated Purple Soil Under Different Rainfall Intensities and Slopes

MA Liwen, CHEN Xiaoyan, TAO Tingting, LI Dandan, TAN Wenhao, KONG Lingyong

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715)

Abstract: Quantitative analysis of slope rill morphological characteristics is the basis of rill erosion research. The artificial rainfall simulation tests under the combinations of three rainfall intensities (30, 60 and 90 mm/h) and five slopes (2° , 5° , 10° , 15° and 20°) were conducted, and the effects of rainfall intensity and slope on rill morphology and its spatial change characteristics of saturated purple soil slope were quantitatively studied. The results showed that the average width, depth and ratio of width to depth of rill on the saturated purple soil slope was $3.44 \sim 9.64$ cm, $1.01 \sim 8.14$ cm and $1.18 \sim 3.87$, respectively. The width and depth of rill along the slope surface followed the order of upper < middle < lower. On the whole, the width and depth of the rill were positively correlated with rainfall intensity and slope on rill depth was more significant than that of rainfall intensity. The ratio of rill width to depth was negatively correlated with rainfall intensity. Above all, this study has important reference value for understanding the change law of rill erosion morphology on saturated soil slope and further exploring the development process of rill on slope.

Keywords: saturated purple soil; rill erosion; morphology character; simulated rainfall

细沟侵蚀是坡耕地土壤侵蚀最广泛存在的侵蚀 形式之一,定量分析坡面细沟形态特征是研究细沟侵 蚀的基础^[1-2]。细沟宽度、深度和宽深比等参数是表 征细沟形态特征的基本参数,受土壤类型、降雨强度 和坡度等的影响,细沟形态具有显著的空间异质性, 将其进行定量研究能在一定程度上反映坡面水动力 学特征和细沟侵蚀情况[3-5]。

目前国内外学者[68]关于细沟形态特征已开展大量 研究,并取得丰硕成果。Bruno 等^[9]和 Di Stefano 等^[10]通 过野外试验发现,黏土坡面细沟平均宽度为3.00~ 15.80 cm,细沟平均深度为 1.60~9.65 cm,且坡度对坡面细 沟宽度和深度的影响显著,随着坡度的增加,坡面细沟宽 度减小,而细沟深度增加。我国黄土区的研究[11-12]结果表 明,黄土坡面细沟宽度<30 cm,细沟深度<20 cm,细沟宽 度和深度均沿坡面从上到下呈先增大后减小的变化规 律,宽深比为1.93~2.35。送土的研究[13]结果表明, 送土细沟平均宽度 1.6~2.5 cm,平均深度为 2.9~6.6 cm,细沟宽深比为 0.25~0.72。此外,和继军等[14-15]将送 土和黄绵土坡面细沟形态进行对比发现,搂土和黄绵土 坡面细沟宽深比都随着降雨强度和坡度的增大而减小, 送土坡面更易产生细沟,但其细沟的崩塌程度和发育程 度都较低,而黄绵土易饱和,饱和后土壤稳定性降低,导 致边壁扩张和沟头坍塌更剧烈,从而使得黄绵土坡面 细沟宽深比更大。车晓翠等[16]在黑土区野外径流小 区冲刷试验结果表明,黑土坡面细沟宽深比为2.3~ 4.9,细沟横断面形态沿坡面从上至下呈"宽浅型一窄 深型一宽浅型"变化特征;随着坡度增大,细沟横断面 形态由"宽浅型"向"窄深型"转化。红壤区的研 究[17-18] 结果表明,红壤坡面细沟宽深比沿坡面从上到 下呈减小的变化趋势。

综上可知,前人针对细沟形态特征开展大量研究, 但主要集中在我国的黄土区、黑土区和红壤区。而紫色 土作为我国西南地区特有土壤资源,与其他土壤类型不 同,紫色土的耕作层与母质层入渗性能的差异性导致耕 层土壤在持续降雨条件下易饱和^[19-20],使紫色土的侵蚀 过程和侵蚀形态特征与其他类型土壤存在差异。土壤 饱和后,土壤抗蚀性显著降低,坡面细沟流速、流态等表 现出显著差异性,加剧饱和土坡面细沟侵蚀,从而导致 坡面细沟侵蚀形态的空间异质性。目前,关于饱和紫 色土坡面细沟侵蚀的研究主要集中在细沟流水(动) 力学特征^[21-23]、水流含沙量^[19]、土壤剥蚀率^[24]等方 面,而鲜有针对饱和紫色土坡面细沟形态特征的相关 研究。基于此,本研究以饱和紫色土为研究对象,分 析不同降雨强度和坡度下细沟形态空间变化特征,以 及降雨强度和坡度对细沟形态的影响程度,以期为进 一步认识饱和土壤坡面细沟侵蚀规律和建立相应的 细沟侵蚀预报模型提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2021 年 8—10 月在黄土高原土壤侵蚀与 旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅进行。 供试土壤来自于西南紫色土典型区域重庆市北碚区 (29°44′41″N,106°21′07″E)发育良好的耕层土壤。供试土 壤的机械组成采用马尔文激光粒度仪测得,其中黏粒 (<0.002 mm)含量为 34.55%,粉粒(0.05~0.002 mm)含 量为 48.84%,砂粒(0.05~2 mm)含量为 16.61%。土壤 容重为 1.3 g/cm³,土壤前期含水量为 3%。试验前,将 自然风干的土壤去除石块和草根等杂质后,碾碎过 5 mm 筛备用。

1.2 试验装置与方法

试验装置由可调节坡度的钢制土槽和饱和供水 装置组成。土槽规格(长×宽×深)为8.0 m×0.2 m ×0.3 m,土槽坡度调节范围为0~30°。饱和供水装 置由渗流管、供水管、输水管3部分构成。渗流管直 径为2 cm,横向平行布设于土槽底端。每处渗流管 都均匀钻有5个直径为2 mm的渗流孔,用透水性较 好的纱布包裹以防止土壤颗粒进入渗流孔阻塞水流 渗出。每根水平的渗流管都连接1根垂向的供水管, 供水管高度设置与供试土壤填入高度齐平,每根供水 管安装水流控制开关用于控制供水速度。输水管与 供水管连接,其末端设置溢流孔,使管中水流始终与 大气保持连通状态,试验装置见图1。



a



注:a为输水管;b为溢流孔;c为供水管;d为控制开关;e为渗流管。

土槽内土层分为弱透水层和耕作层。弱透水层用 黏土填装并压实,土层厚度为5 cm,土壤容重控制为1.5 g/cm³。在犁底层上方填入20 cm 深的供试土壤用于模

图 1 试验土槽

拟耕作层,采用分层填土方式以保证填土均匀性,每层 5 cm,土壤容重控制为 1.3 g/cm³。填土完成后,通过供水 装置向土槽内部持续供水至饱和状态。

根据已有研究和野外调查实际情况,且便于与前 人研究进行对比分析,最终将试验降雨强度设置为 30,60,90 mm/h。根据野外坡耕地情况调查,细沟发 育的临界坡度为 2°,且 5°以上发育最为广泛,考虑到 坡度的分级和代表性,最终将试验坡度设置为 2°,5°, 10°,15°,20°。人工模拟降雨试验开始前,率定降雨强 度使其误差控制在 5%以内,降雨均匀性系数达到 85%以上,降雨至细沟基本稳定后结束,历时 16 min。降雨结束后,采用精度为 1 mm 的钢尺沿坡面 每隔 1 m 测量细沟宽度及深度,并对特殊沟槽位置 进行加密测量,最终取平均值作为该坡段的沟宽及沟 深。每组试验重复 3 次,共进行 45 场试验。

1.3 数据处理

细沟平均宽度和深度是研究区域内所有细沟宽 度和深度的加权平均值,计算公式分别为:

$$\overline{W} = \frac{\sum_{i=1}^{n} W_i A_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i}$$
(1)

$$\overline{D} = \frac{\sum_{i=1}^{n} D_i A_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i}$$
(2)

式中: A_i 为第i条细沟的表面积(cm²); W_i 为第i条 细沟所有监测点宽度值的均值(cm); D_i 为第i条细 沟所有监测点宽度值的均值(cm)。由于本试验中仅 出现1条细沟,因此细沟平均宽度 \overline{W} 为此条细沟所 有测量点宽度值的均值(cm); \overline{D} 为此条细沟所有测 量点深度值的均值(cm)。

细沟宽深比是坡面细沟宽度与深度的比值,计算 公式为:

$$R_{\rm wd} = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i}{\sum_{i=1}^{n} d_i}$$
(3)

式中: R_{wd} 为细沟宽深比,为无量纲参数; w_i 为第i个测量点的细沟宽度(cm); d_i 为第i个测量点的细沟 深度(cm)。

采用 SPSS 26 软件单因素方差分析(one-way ANOVA)中的最小显著性差异法(LSD)对不同降雨 强度/坡度下细沟形态参数进行分析;文中图形的制 作采用 Origin 2018 软件。

2 结果与分析

2.1 降雨强度对细沟形态的影响

由表1可知,不同降雨强度和坡度条件下,坡面 细沟平均宽度和深度分别为3.44~9.64,1.01~8.14 cm。坡度一定时,坡面细沟平均宽度和深度均随着 降雨强度的增大而增大。通过对细沟平均宽度和深 度增幅的比较发现,坡度≤5°时,坡面细沟平均宽度 随降雨强度的增幅(23.42%~57.85%)大于细沟平 均深度增幅(19.80%~36.90%);坡度≥10°时,坡面细沟 平均宽度随降雨强度的增幅(24.87%~40.13%)小于细 沟平均深度增幅(25.42%~90.48%)。这表明,随着降 雨强度的增大,小坡度条件下细沟沟壁崩塌侵蚀作用 增强的程度大于细沟沟底下切侵蚀,大坡度条件下细 沟沟壁崩塌侵蚀作用增强的程度小于细沟沟底下切 侵蚀。其主要原因是随着降雨强度的增大,水流的冲 刷作用增强,导致沟底下切侵蚀和沟壁坍塌作用增 强。此外,水流与土壤的交互作用增强,细沟间的分 水岭在水流的冲刷作用下逐渐被侵蚀,使得相邻细沟 合并[25],以上共同作用导致坡面细沟平均宽度和深 度增大。但与小坡度条件相比,大坡度条件下细沟股 流集中速度更快[12],随着降雨强度的增大,股流对沟 底的冲刷作用更为显著,导致大坡度条件下细沟平均 深度增幅大于细沟平均宽度。

不同降雨强度和坡度条件下,坡面细沟宽深比为 1.18~3.87。坡度为 2°和 20°时,细沟宽深比随着降 雨强度的增加无显著变化,表明在极缓坡和陡坡条件 下,细沟横断面形态变化受降雨强度作用较小;坡度 为5°时,降雨强度由 30 mm/h 增大到 60 mm/h,再 增大到 90 mm/h时,细沟宽深比随降雨强度的增大 呈先增大后减小的变化规律;坡度为10°,15°时,细沟 宽深比随降雨强度的增大而减小,这也印证不同坡度 条件下,坡面细沟平均宽度和深度随降雨强度增大而 呈现的变化规律。裴冠博等[26]研究发现,坡面细沟 宽深比随降雨强度增大而减小,与本试验的研究结果 存在一定差异。其主要原因是与紫色土相比黄绵土 黏性更小,土壤抗冲性能更差,因此随着降雨强度增 大,坡面径流量增大时,黄绵土坡面细沟下切侵蚀作 用更显著[16],细沟深度增大的程度大于细沟宽度,导 致细沟宽深比减小。

2.2 坡度对细沟形态的影响

由表1可知,降雨强度一定时,坡面细沟平均宽度 和深度均随着坡度的增大而增大。倪世民等^[27]研究发 现,坡面细沟平均深度随坡度增大而增大,而细沟平均 宽度随坡度增大而减小,与本试验结果存在一定差异。 其主要原因在于,与非饱和土壤相比,饱和土壤的土壤 团聚体在土壤水分的作用下易分解成单个土壤颗粒, 土壤的稳定性显著降低^[28],导致细沟沟壁由于土壤 间的作用减弱,因此坡度增大时,饱和紫色土坡面细 沟宽度随之增大。进一步比较细沟平均宽度和深度 的增幅发现,降雨强度一定时,随着坡度的增大,坡面 表1 坡面细沟形态参数随降雨强度/坡度的变化特征

细沟平均宽度的增幅(105.54%~130.79%)小于细 沟平均深度增幅(247.06%~613.86%),这说明随着 坡度的增加,细沟沟底下切侵蚀作用增强程度大于细 沟沟壁崩塌侵蚀。

降雨强度/ (mm•h ⁻¹)	坡度/(°)	细沟平均宽度/	细沟平均深度/	细沟宽深比
		cm	cm	
30	2	_	—	_
	5	3.44 ± 0.06 Cd	1.87 ± 0.04 Cd	1.84±0.03Cb
	10	5.52 ± 0.07 Cc	$2.31 \pm 0.04 Cc$	$2.39 \pm 0.08 Aa$
	15	$6.13 \pm 0.07 \text{Cb}$	3.91±0.11Cb	$1.56 \pm 0.06 \mathrm{Ac}$
	20	7.72±0.16Ca	6.49±0.09Ca	$1.19 \pm 0.03 \text{Ad}$
60	2	$3.80\!\pm\!0.09\mathrm{Be}$	$1.01\!\pm\!0.04\mathrm{Be}$	3.78±0.21Aa
	5	$5.21\!\pm\!0.06\mathrm{Bd}$	$2.01 \pm 0.03 Bd$	$2.60\!\pm\!0.03\mathrm{Ab}$
	10	$6.60\pm0.13\mathrm{Bc}$	$3.41\!\pm\!0.07\mathrm{Bc}$	$1.98\!\pm\!0.02\mathrm{Bc}$
	15	$7.73\!\pm\!0.08\mathrm{Bb}$	$5.49 \pm 0.10 \mathrm{Bb}$	$1.41 \pm 0.03 Bd$
	20	$8.77 \pm 0.21 \mathrm{Ba}$	7.21±0.10Ba	1.21±0.03Ae
90	2	$4.69\!\pm\!0.06\mathrm{Ae}$	$1.21 \pm 0.04 \mathrm{Ae}$	3.87±0.18Aa
	5	5.43±0.10Ad	$2.56 \pm 0.05 \mathrm{Ad}$	$2.12\pm0.08Bb$
	10	7.28±0.11Ac	4.40±0.04Ac	$1.65\pm0.02Cc$
	15	$8.59 \pm 0.16 \mathrm{Ab}$	6.72±0.11Ab	1.28±0.04Cd
	20	9.64±0.49Aa	8.14±0.15Aa	$1.18 \pm 0.05 \text{Ad}$

注:表中数据为平均值士标准差;一表示在该试验条件下坡面无细沟产生;同列不同大写字母表示同一坡度不同降雨强度之间差异显著(p<0.05);不同小写字母表示同一降雨强度不同坡度之间差异显著(p<0.05)。

降雨强度为 30 mm/h 时,细沟宽深比为 1.19~ 2.39,随着坡度的增大呈先增大后减小的变化规律。 降雨强度为 60,90 mm/h 时,细沟宽深比分别为 1.21~ 3.78 和 1.18~3.87,表现为随坡度的增大而减小(表 1)。这表明在小降雨强度条件下,坡度由 5°增大到 10°时,细沟沟壁崩塌侵蚀的程度大于沟底下切侵蚀 程度,随着坡度的继续增大,细沟沟底下切侵蚀大于 沟壁崩塌侵蚀;在中、大降雨强度条件下,随着坡度的 增大,细沟沟底下切侵蚀程度明显大于沟壁崩塌侵蚀 程度,细沟横断面形态由"宽浅型"向"窄深型"发展。 而薛姣姣等^[29]研究发现,杨凌镂土坡面细沟宽深比 稳定在 1.5~2.0, 目随坡度的增大而增大, 与本试验 研究结果存在一定差异。主要原因在于杨凌楼土的 细沟发育主要表现为溯源侵蚀和沟底下切侵蚀[14], 而处于持续饱和状态的紫色土土体稳定性降低,随着 坡度增大,细沟沟壁崩塌产生明显坍塌,从而使得其 细沟宽深比更大。而本试验中细沟宽深比随坡度变 化呈现不同变化规律的主要原因在于本试验考虑降 雨强度与坡度的综合影响,薛姣姣等^[29]则仅研究坡 度对细沟宽深比的单一影响。

2.3 降雨强度和坡度对细沟形态的影响

为进一步分析降雨强度和坡度对细沟形态的影响, 建立降雨强度和坡度与各细沟形态参数的关系方程:

 $\overline{W} = 0.893 \times R^{0.277} \times S^{0.380}$ ($R^2 = 0.959, n = 11$)

(4)

 $D = 0.108 \times R^{0.344} \times S^{0.935} \quad (R^2 = 0.971, n = 11)$ (5) $R_{\rm wd} = 5.617 \times R^{-0.018} \times S^{-0.478} \quad (R^2 = 0.884, n = 11)$

(6)

式中:R 为降雨强度(mm/h);S 为坡度(°)。降雨强 度和坡度均是影响坡面细沟形态的重要因素,但其对 各形态参数的影响程度不同。由公式(4)可知,降雨 强度和坡度对平均细沟宽度的影响相近。王龙生 等[13]研究发现,坡度对细沟宽度的影响显著大于降 雨强度,与本试验结果之间存在差异。分析原因在 于,细沟宽度的变化主要受重力作用影响,重力沿坡 长方向的分力随坡度增大而增大[30],土壤稳定性降 低,越容易坍塌崩解。而在饱和土壤坡面,土壤颗粒 间滞水产生的浮力平衡土壤颗粒间的作用力及重力, 导致饱和土坡面土壤结构的稳定性减弱,即使在缓坡 条件下,坡面土壤结构仍处于不稳定状态,因此在饱 和土坡面细沟形态中,土壤重力作用显著降低,坡度 对细沟宽度的影响也相对减小,使得其影响程度与降 雨强度相近。由公式(5)可知,坡度对细沟平均深度 的影响显著大于降雨强度。其原因是与降雨强度的 增大相比,坡度的增大使得坡面径流更易在细沟集 中,且流速也显著增大,导致细沟下切侵蚀更剧烈,因 此细沟深度的增加速度更显著。公式(6)表明,坡度 对细沟宽深比的影响显著大于降雨强度的影响,表明 在坡面横断面形态的塑造中,细沟宽深比对坡度的变

化更为敏感,与沈海鸥等^[12]的研究结果一致。

2.4 细沟形态空间变化特征

图 2 为细沟宽度和深度沿坡面的空间变化特征, 上、中、下坡细沟宽度分别为 3.22~10.35,2.94~11.82, 3.34~10.02 cm,均值分别为 5.61,7.04,6.87 cm;细沟 深度分别为 1.09~8.55,0.74~9.92,0.68~7.92 cm, 均值分别为 3.93,5.00,3.57 cm。整体上,饱和紫色 土坡面从上至下,细沟宽度和深度表现出先增大后减 小的趋势,这与龙琪等^[31]的研究结果基本一致。其 原因在于,上坡段细沟形态的形成主要是坡面溯源 侵蚀作用的结果,该坡段沟壁崩塌侵蚀和沟底下切侵 蚀作用均不显著,因此细沟宽度和深度都较小;随 着坡面水流的不断集中和冲刷,坡面中上部径流对沟 壁的掏蚀和沟底的切蚀作用逐渐增强,细沟不断扩宽加深,在距离坡顶 5~7 m处,细沟宽度、深度达到最大值;下坡段径流含沙量处于近饱和状态,与中坡段相比,其水流侵蚀能力降低,所携带的泥沙量减小,导致沟宽和沟深呈减小趋势。当坡度为 2°、降雨强度为 60 mm/h 和坡度为 5°、降雨强度度为 30 mm/h时,细沟宽度沿坡面从上至下呈先减小后增大的趋势,这主要是由于坡面跌坎的存在对细沟形态的塑造具有一定影响。坡度较缓时,坡面径流比较宽广和分散^[32],水流下切能力较弱,细沟横向发育的速度更快,细沟不断拓宽,在跌坎处径流集中下切能力增强,对沟壁的扰动作用削弱^[33],导致跌坎形成后细沟窄而深(图 3)。







图 4 为不同降雨强度和坡度条件下坡面细沟宽 深比空间变化特征。坡面上、中、下坡段细沟宽深比 分别为 1.13~3.21,1.11~3.56,1.24~5.42,均值分 别为 1.81,1.84,2.54。分析可知,坡面细沟宽深比整 体呈上坡<中坡<下坡的变化规律,这表明细沟横断 面形态沿坡面从上至下由"窄深型"向"宽浅型"发展。 细沟横断面形态的形成是细沟沟壁崩塌侵蚀与沟底 下切侵蚀共同作用的结果,细沟沟壁崩塌导致细沟宽 度增大,沟底下切侵蚀导致细沟深度增加^[29]。饱和 紫色土坡面从上至下,沟壁崩塌侵蚀和沟底下切侵蚀 作用均呈先增大后减小趋势。上坡至中坡段,径流不 断汇集,对沟壁的掏蚀作用增强,导致细沟宽度不断 增大,径流对细沟沟底的切蚀作用也不断增强,但径 流在输移泥沙的过程中受到沟底微地形和泥沙颗粒 的阻滞作用,因此细沟深度的增幅小于细沟宽度,导 致中坡的细沟宽深比大于上坡。坡面中部至下部,细 沟宽度和深度均减小,细沟宽度减小的原因在于径流 含沙量接近饱和,对沟壁的掏蚀作用减弱,而细沟深 度减小的原因除径流对沟底的切蚀作用减弱之外还 存在泥沙沉积过程,因此细沟深度的减幅大于细沟宽 度,导致下坡的细沟宽深比大于中坡。





3 结论

坡面上、中、下坡段细沟宽度分别为 3.22~10.35, 2.94~11.82,3.34~10.02 cm,均值分别为 5.61,7.04, 6.87 cm;细沟深度分别为 1.09~8.55,0.74~9.92,0.68~ 7.92 cm,均值分别为 3.93,5.00,3.57 cm;细沟宽深比分 别为 1.13~3.21,1.11~3.56,1.24~5.42,均值分别 为 1.81,1.84,2.54。饱和紫色土坡面细沟形态发展 具有显著的空间特征,细沟宽度和深度沿坡面从上至 下整体表现出先增大后减小的趋势,坡面细沟宽深比 呈上坡<中坡<下坡的变化特征。同时,建立降雨强 度和坡度与各细沟形态参数的关系方程(决定系数 *R*²均大于 0.88),坡面细沟平均宽度和深度与降雨强 度和坡度呈正相关关系,细沟宽深比与降雨强度和坡 度呈负相关关系,且降雨强度和坡度对细沟平均宽度 和坡面细沟宽深比的影响更显著。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Bingner R L, Wells R R, Momm H G, et al. Ephemeral gully channel width and erosion simulation technology [J].Natural Hazards,2016,80(3):1949-1966.
- [3] 赵春红,高建恩.坡面不同侵蚀沟断面特征及水力几何 形态[J].水科学进展,2016,27(1):22-30.
- [4] 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.
- [5] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊.细沟发育与形态特征研究进展 [J].生态学报,2018,38(19):6818-6825.
- [6] Shen H O, Zheng F L, Wen L L, et al. An experimental study of rill erosion and morphology [J]. Geomorphology, 2015, 231:193-201.
- [7] Zhang P, Tang H W, Yao W Y, et al. Experimental investigation of morphological characteristics of rill evolution on loess slope[J].Catena,2016,137:536-544.
- [8] 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.

- [9] Bruno C, Di Stefano C, Ferro V. Field investigation on rilling in the experimental Sparacia area, South Italy[J].
 Earth Surface Processes and Landforms, 2008, 33 (2): 263-279.
- [10] Di Stefano C, Ferro V, Pampalone V, et al. Field investigation of rill and ephemeral gully erosion in the Sparacia experimental area, South Italy [J]. Catena, 2013,101:226-234.
- [11] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.黄土坡面细沟侵蚀形态试验[J].生态学报,2014,34(19):5514-5521.
- [12] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J].农业机械学报,2015,46(7): 162-170.
- [13] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面细沟形态变化及 其与流速之间的关系[J].农业工程学报,2014,30(11): 110-117.
- [14] 和继军,吕烨,宫辉力,等.细沟侵蚀特征及其产流产沙 过程试验研究[J].水利学报,2013,44(4):398-405.
- [15] 和继军,宫辉力,李小娟,等.细沟形成对坡面产流产沙 过程的影响[J].水科学进展,2014,25(1):90-97.
- [16] 车晓翠,赵文婷,沈海鸥,等.黑土坡面细沟形态及剖面 特征试验研究[J].水土保持通报,2020,40(5):55-59.
- [17] 郝好鑫,郭忠录,李朝霞,等.红壤坡面细沟横断面形态 及水动力学特性研究[J].长江流域资源与环境,2018, 27(2): 363-370.
- [18] 廖凯涛,宋月君,杨洁,等.红壤坡面细沟侵蚀参数提取 研究[J].中国水土保持,2021(2):45-49.
- [19] Huang Y H, Li F H, Wang W, et al. Rill erosion processes on a constantly saturated slope[J].Hydrological Processes,2020,34(20):3955-3965.
- [20] 丁文斌,蒋平,史东梅,等.紫色土坡耕地耕层蓄水保土及 耕性特征研究[J].水土保持学报,2016,30(6):24-29.
- [21] Huang Y H, Chen X Y, Li F H, et al. Velocity of water flow along saturated loess slopes under erosion effects[J].Journal of Hydrology,2018,561:304-311.
- [22] 邢行,陈晓燕,韩珍,等.饱和与非饱和黄绵土细沟径流 水动力学特征及侵蚀阻力对比[J].水土保持学报, 2018,32(3):92-97.

- [23] 陶婷婷,陈晓燕,陈仕奇,等.饱和紫色土初始态和稳定 态细沟水力学特征研究[J].土壤学报,2022,59(1): 129-138.
- [24] Han Z, Chen X Y, Li Y H, et al. Quantifying the rilldetachment process along a saturated soil slope[J].Soil and Tillage Research.2020,204:e104726.
- [25] 刘森,杨明义,张风宝.黄土坡面细沟发育及细沟与细沟间 侵蚀比率研究[J].水土保持学报,2015,29(1):12-16.
- [26] 裴冠博,龚冬琴,付兴涛.晋西黄绵土坡面细沟形态及 其对产流产沙的影响[J].水土保持学报,2017,31(6): 79-84,182.
- [27] 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):49-156.
- [28] 韩珍,陈晓燕,李彦海,等.近饱和与非饱和土壤细沟水
- (上接第70页)
- [17] 王永平,周子柯,滕吴蔚,等.东大河小流域林地土壤侵蚀 及养分特征研究[J].核农学报,2021,35(7):1658-1667.
- [18] 邓威,汪晶晶,白云,等.苦驴河上游小流域土壤侵蚀及其 养分流失特征[J].水土保持通报,2020,40(1):85-90,2.
- [19] 刘丹,丁明军,文超,等.赣南红壤丘陵区¹³⁷C示踪土壤
 侵蚀对土壤养分元素的影响[J].水土保持学报,2019, 33(1):62-67.
- [20] 魏晗梅,郑粉莉,冯志珍,等.薄层黑土区流域尺度土壤 养分对侵蚀-沉积的响应[J].水土保持学报,2021,35 (4):49-54.
- [21] 周华坤,赵新全,周立,等.青藏高原高寒草甸的植被退化 与土壤退化特征研究[J].草业学报,2005,14(3):31-40.
- [22] Kristensen J A, Boëtius S H, Abekoe M, et al. The
- (上接第76页)
- [17] 张光辉.土壤分离能力测定的不确定性分析[J].水土保 持学报,2017,31(2):1-6.
- [18] 张风宝,杨明义,李占斌,微小区土壤侵蚀试验中田口 方法代替全因子设计的可行性分析[J].农业工程学 报,2015,31(13):1-9.
- [19] Wang E H, Cruserichard M, Chen X W, et al. Effects of moisture condition and freeze/thaw cycles on surface soil aggregate size distribution and stability[J].Canadian Journal of Soil Science, 2011, 92(3):529-536.
- [20] 高广磊,丁国栋,赵媛媛,等.生物结皮发育对毛乌素沙 地土壤粒度特征的影响[J].农业机械学报,2014,45 (1):115-120.
- [21] 余韵.黄土丘陵区人工培育生物结皮对坡面水蚀的影响研究[D].南昌:江西农业大学,2014.
- [22] 王军光,李朝霞,蔡崇法,等.集中水流内红壤分离速率

流输沙能力的对比研究[J].山地学报,2020,38(6): 841-850.

- [29] 薛姣姣,王健,李鹤,等.重粉质壤土坡面细沟侵蚀发育 规律实验分析[J].灌溉排水学报,2016,35(1):67-70.
- [30] 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.
- [31] 龙琪,韩剑桥,何育聪,等.黄土坡面细沟侵蚀强度的空间分布及形态分异特征[J].水土保持学报,2022,36 (1):1-7.
- [32] 郝好鑫,郭忠录,王先舟,等.降雨和径流条件下红壤坡面 细沟侵蚀过程[J].农业工程学报,2017,33(8):134-140.
- [33] 严冬春,文安邦,史忠林,等.紫色土坡面跌坑贯穿发生 细沟的水动力过程[J].长江流域资源与环境,2012,21 (1):94-99.

combined effect of termite bioturbation and water erosion on soil nutrient stocks along a tropical forest catena in Ghana[J].Catena,2019,178:307-312.

- [23] Zhang L L, Huang Y, Rong L, et al. Effect of soil erosion depth on crop yield based on topsoil removal method: A meta-analysis[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2021, 41(5):1-13.
- [24] Mahadevan R, Gonemaituba W. A note on soil erosion and the loss in crop production: Case study of Fiji's ginger farms[J].Journal of the Asia Pacific Economy, 2013,18(3):502-511.
- [25] 鄂丽丽,胡伟,谷思玉,等.黑土农田极端侵蚀对土壤质 量及作物产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(2): 142-149,172.

与团聚体特征及抗剪强度定量关系[J].土壤学报, 2011,48(6):1133-1140.

- [23] 王芳芳,肖波,李胜龙,等.黄土高原生物结皮对土壤养 分的表层聚集与吸附固持效应[J].植物营养与肥料学 报,2021,27(9):1592-1602.
- [24] 高丽倩.黄土高原生物结皮土壤抗水蚀机理研究[D]. 北京:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中 心,2017.
- [25] 冯梦蝶,陈展鹏,何丙辉,等.不同土壤容重水平下喀斯 特黄壤分离能力水动力学特性[J].水土保持学报, 2021,35(2):1-7.
- [26] Zhang G H, Liu B Y, Liu G B. Detachment of undisturbed soil by shallow flow[J].Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(3):713-719.
- [27] 王展,张玉龙,虞娜,等.冻融作用对土壤微团聚体特征 及分形维数的影响[J].土壤学报,2013,50(1):83-88.