

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.008.

李龙,张尚轩,高鑫宇,等.次降雨下砒砂岩坡面细沟形态发育及其对侵蚀产沙的影响[J].水土保持研究,2023,30(3):1-9.

LI Long, ZHANG Shangxuan, HE Jun, et al. Development of Rill Morphology on Sandstone Slopes Under Individual Rainfall Event and Its Effect on Erosion and sediment Production [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 1-9.

次降雨下砒砂岩坡面细沟形态发育及其对 侵蚀产沙的影响

李 龙^{1,2}, 张尚轩¹, 高鑫宇³, 李 强⁴, 袁 亮⁴, 贺 俊⁵

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010018; 2.荒漠化生态系统保护与修复国家林业和
草原局重点实验室, 呼和浩特 010000; 3.南京信息工程大学 遥感与测绘工程学院, 南京 210044;

4.鄂尔多斯市林草事业发展中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 5.国家能源集团准能集团环境保护部, 内蒙古 鄂尔多斯 010399)

摘 要: [目的]以水蚀剧烈的砒砂岩区裸露坡面为研究对象,分析次降雨下坡面细沟形态演变及侵蚀产沙特征,以期
为坡面沟蚀发育演变及坡面水土流失治理提供理论依据。[方法]基于野外径流小区原位监测试验,采用三维激光扫
描仪监测径流小区两个雨季13次自然降雨下细沟发育过程及产流产沙规律。[结果](1)小区内细沟发育过程分为4
个阶段:跌坎发育—断续细沟—连续细沟—沟网形成;(2)细沟长度、宽度、深度及细沟体积、细沟密度、细沟复杂度均
随着降雨的继续呈上升趋势,而细沟宽深比呈下降趋势;(3)研究区内中雨对细沟发育贡献最大,其发生频率为
53.69%,对细沟形态的影响占比71.25%。[结论]细沟形态变化对产沙的影响较大,细沟出现后产沙量明显上升,产
沙量与细沟发育过程对应关系较好,而对产流过程的影响有限,尤其细沟体积与产沙量及含沙量的相关性最强。

关键词: 次降雨; 坡面; 细沟形态; 产流; 产沙

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0001-09

Development of Rill Morphology on Sandstone Slopes Under Individual Rainfall Event and Its Effect on Erosion and Sediment Production

LI Long^{1,2}, ZHANG Shangxuan¹, HE Jun³, LI Qiang⁴, YUAN Liang⁴

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University,
Hohhot 010018, China; 2. Key Laboratory of State Forest Administration for Desert Ecosystem

Protection and Restoration, Hohhot 010000, China; 3. School of Remote Sensing & Geomatics
Engineering Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu, 210044;

4. Erdos Forestry and Grass Business Development Center, Erdos, Inner Mongolia 017000, China; 5. Environmental
Protection Department of National Energy Group Zhongneng Group, Erdos, Inner Mongolia 010399, China)

Abstract: [Objective] The exposed slope was selected to reveal the evolution of the pattern of rill and the
characteristics of erosion-induced sediment generation on the slope, in order to provide theoretical basis for
the development of slope terrain and soil erosion management. [Methods] Rill development and runoff and
sediment production under 13 natural rainfall events in two rainy seasons were analyzed based on in situ
detection conducted by using the three-dimensional laser scanner under the natural rainfall conditions in the
field. [Results] (1) Rill development can be divided into four stages: drop ridge development-intermittent
rill-continuous rill-furrow network formation (2) The length, width, depth and volume of rill, density of
fine rills, and complexity of rills all show the increasing trend with the continuation of rainfall, while the

收稿日期: 2022-03-06

修回日期: 2022-04-14

资助项目: 国家自然科学基金“砒砂岩坡面侵蚀时空变异与植被斑块格局演变互馈机制”(42267049); 内蒙古教育厅“高等教育改革发展项目—青年科技英才计划”(NJYT22046); 内蒙古自治区科技计划项目“黄河十大孔兑流域生态修复空间精准识别与智慧水土保持技术”(2021GG0052)

第一作者: 李龙(1989—)男, 吉林桦甸人, 副教授, 博士, 主要从事土壤侵蚀及水土保持相关研究。E-mail: lilongdhr@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

ratio of width to depth of rill shows the decreasing trend. (3) The largest contribution to its development is the medium rainfall with the frequency of 53.69%, and the effect of medium rainfall on rill morphology accounts for 71.25%. [Conclusion] The change of rill morphology has a greater impact on sediment production, and sediment production increases significantly after the appearance of rills, and sediment production corresponds well with the development process of rills, while the impact on the runoff production process is limited. In particular, the correlation between rill volume and sediment production and sediment content is the strongest.

Keywords: rainfall; slope; rill morphology; runoff; sediment yield

坡面作为侵蚀中最基本的单元,侵蚀过程极其复杂,坡面上最主要的侵蚀方式是细沟侵蚀^[1],其发育过程中的形态特征对坡面侵蚀有着显著影响^[2],裴冠博等^[3]通过室内人工降雨分析了晋西黄绵土坡面细沟的发育过程,指出坡中及坡下最先开始发育,其顺序为跌坎—细沟—细沟网—细沟崩塌。细沟形态的演变是由降雨、侵蚀及其自身变化间相互作用而形成的动态系统^[4],其中次降雨的降雨强度、降雨历时及降雨量等因素对细沟发育起决定性作用。郑良勇等^[5]在次降雨条件下,利用稀土元素通过室内模拟降雨试验来揭示坡面侵蚀过程中面蚀和细沟侵蚀的发育形态,结果表明仅有30%的侵蚀量来源于面蚀。细沟的发展使地表径流在网络中不断汇集,输沙能力增强,又加速了裸露坡面细沟的发展过程^[6],严重影响了坡面产流产沙过程,加剧了土壤的流失,耿晓东^[7]以我国主要水蚀区为研究地,通过模拟降雨试验,对细沟发生过程进行观测并计算其特征,揭示了坡面细沟侵蚀发展过程及其对坡面侵蚀产沙动态变化的影响。在细沟出现后土壤侵蚀量剧烈增加^[8],研究表明坡面侵蚀量的70%以上都由细沟侵蚀导致^[9],有时在极特殊情况下甚至能增长到90%。Meyer LD等^[10]也指出随着坡面侵蚀的发展,细沟的发育使坡面总侵蚀量较原来增加3倍。近年来,将坡面细沟形态特征作为揭露坡面侵蚀过程中各要素相互影响机制的微地貌要素,由坡面微地貌变化来推进坡面径流输沙运移规律,已经成为业内研究的新趋势。计算机数字近景摄影测量^[11]及三维激光扫描技术等高新科技的精确监测开始在土壤侵蚀领域内广泛应用,不仅解决了人为测量精度低,工作量繁琐及人为干扰的影响问题,对于细沟形态的研究也由定量研究替代了定性描述^[12]。黎武就以微流域为研究对象,采用RIGEL-400三维激光扫描仪测量了单沟及沟系两个尺度下细沟发育形态及其影响因素^[13]。

砒砂岩区处于典型丘陵沟壑大环境下,总面积达1.67万km²,主要分布在我国黄土高原北部晋陕蒙交界地带。其成岩程度低,矿物颗粒间胶结能力差,极易侵蚀产沙并导致严重的水土流失,该区土壤侵蚀

的治理为业内研究重点及解决黄河粗沙集中来源区泥沙问题的关键^[14]。水力侵蚀是导致砒砂岩区侵蚀严重的重要原因和表现,降雨是水蚀的首要动力因子,该区降雨87%~95%都集中在7—8月^[15]。到目前为止,关于砒砂岩区侵蚀输沙的研究多基于WEPP模型^[16-17],从细沟形态特征入手将径流产沙和降雨相结合的研究鲜有报道。因此研究次降雨条件下坡面侵蚀所产生细沟的形态对产流产沙及侵蚀动力机制有重要意义^[18]。目前来看,对于细沟形态演变的研究多为固定雨强理想状态下的室内模拟试验,而多雨强交叉下的自然降雨研究较少,且砒砂岩的岩性特殊,基岩的原状结构在取样和运输过程中容易产生裂隙,重塑土无法准确描述坡面细沟形态发展的真实过程。因此本文以砒砂岩区坡面径流小区为研究对象,在自然降雨条件下对其进行野外原位监测,通过高精度三维激光扫描仪来准确还原次降雨后坡面细沟形态变化特征及规律,保证试验结果的科学性和可比性。结合产流产沙,明确降雨特征如何对细沟侵蚀产沙过程产生影响,揭示砒砂岩区坡面降雨水沙运移机制,以期为研究砒砂岩坡面侵蚀机理及水土流失治理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗暖水镇(110°31′—110°35′E, 39°46′—39°48′N)。海拔高度为1145~1330m,地形分布北部较高,南部偏低,主要地带性土壤为栗钙土,有机质含量较少。研究区按照上层覆土的类型和基岩出露程度可分为:盖沙砒砂岩区、盖土砒砂岩区和裸露砒砂岩区,其中又以裸露砒砂岩区的生态环境最为恶劣。该区为典型大陆性气候,年平均气温为6~9℃,昼夜温差大,冬季寒冷干燥且时令长,夏季炎热且时令短。年均降水量400mm,降雨类型多为暴雨,侵蚀强度大,多集中分布在夏季(7—8月),占全年总降雨量的3/4。无霜期为100~140d,日照充足,年均风速2~4m/s。主要植被为松科的油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.),豆科的柠条

(*Caragana Korshinskii* Kom.), 沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.), 羊草(*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel), 猪毛菜(*Salsola collina* Pall.) 以及其他沙生类植物、沼泽草甸和退化的草地。

1.2 试验设计

该试验为野外径流小区自然降雨原位监测试验, 于2019年6月30日开始准备, 观测时间为2019—2020年两个雨季(6—8月), 共观测到13场出现产流产沙的有效降雨。根据当地实际地形条件, 选取坡度为30°规格为5 m(长)×2 m(宽)的径流小区。在扫描之前, 将径流小区内植被清除近自然裸地, 以免对扫描产生影响。测得坡面土壤粒度组分以粉粒为主, 占50.86%, 其次为砂粒, 占比43.86%, 黏粒含量最少为5.35%。径流小区旁设置有固定雨量监测点, 采用虹吸式自计雨量计记录大气降水过程, 并配备雨量筒进行相互校验, 测定降雨量、降雨强度及降雨历时等基本数据。参考气象学上划分降雨等级的标准, 将所观测到的自然降雨分为小雨(<10.0 mm)、中雨(10.0~24.9 mm)、大雨(25.0~49.9 mm)3个等级^[19]。小区长边界垂直于等高线, 底端设出水口, 并配备集流桶以便采集水沙样品。采用烘干法测定坡面产沙量, 总径流量为自制铁皮集流桶测量所得的径流体积与产沙样累计值的总和。

1.3 地形测量

采用奥地利产RIGEL-400三维激光扫描仪, 该仪器使用近红外激光束快速扫描机制获取三维点云数据, 具有高速、无接触高精度的特点。其激光发射频率为300 000 bit/s, 扫描精度(单次测量100 m)为3 mm(水平精度)×2 mm(垂直精度), 仪器的垂直扫描范围为0°~270°, 水平范围为0°~360°, 扫描一个坡面约用1 min。在降雨开始前对径流小区进行一次扫描, 获取初始坡面点云数据, 每次降雨后待坡面水分下渗完全再对其进行扫描, 获取坡面形态发展数据。每次扫描开始前采用高清摄像设备进行记录, 扫描时设置相同位置及三脚架高度架设仪器, 并在小区边界用配套反射样片进行标记, 方便各次数据进行裁剪叠加。

1.4 数据处理

将扫描后的所有点云数据导入到RiSCAN_PRO软件中, 以所放置反射片为定位点, 将降雨前所扫描数据作为基站对各次降雨后数据进行拼接。拼接完成后对坡面残留零星植被进行过滤处理并裁剪掉除坡面以外的多余区域, 将最后成图三维点云坐标导出为TXT格式。将导出数据加载到ArcGIS 10.2软件中, 生成格式为.shp的矢量数据, 接着将其转换为TIN数据, 通过“TIN转栅格”可以得到坡面高精度

DEM(精度为5 mm×5 mm), 此时通过设置合适的颜色就可以清晰看出坡面的形态。同时使用ArcGIS软件提取细沟沟长、沟宽及沟深等参数用于计算体现细沟形态特征的参数并分析其变化情况。对前后两次降雨的DEM进行相减, 计算出坡面侵蚀体积, 乘以土壤容重可得该时段坡面侵蚀量, 经验证发现实测产沙量与DEM计算所得侵蚀量间误差在允许范围内。使用R语言进行相关分析, 并通过Origin 9.6软件进行数据分类及图形的绘制。

学者们提出了许多传统的几何参数来量化细沟形态特征, 包括细沟长度^[20]、细沟宽度^[21]以及细沟深度^[22], 但随着降雨场次的增加, 细沟形态发育更为复杂, 只用传统的单因素指标不能完全体现细沟形态变化特征, 因此结合其他学者提出的量化细沟形态特征的最优衍生参数, 即细沟密度、细沟复杂度、细沟宽深比及细沟体积。细沟形态参数计算^[23]如下:

$$\rho_s = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{S} \quad (1)$$

$$C = \frac{L_i}{L_{ti}} \quad (2)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{\sum_{i=1}^n D_i} \quad (3)$$

$$V = \sum_{i=1}^n W_i \times D_i \times L_i \quad (4)$$

式中: ρ_s 为细沟密度, 表示坡面面积上细沟的总长度, 用来体现坡面的破碎等级(m/m²); S 为坡面面积(m²); L_i 为第*i*条细沟长(m); i 为细沟条数($i=1, 2, \dots, n$); C 为细沟复杂度; 用来体现坡面细沟的丰富程度; L_{ti} 为第*i*条细沟的垂直有效长度(m); R 为细沟宽深比, 用来表示细沟侧向侵蚀与下切侵蚀间的关系; W_i 为第*i*条细沟宽度(cm); D_i 为第*i*条细沟深度(cm); V 为细沟体积(m³)。其次, 降雨等级对细沟特征参数贡献率的计算方法为各降雨等级下每场降雨特征参数之和与两个雨季13次降雨后细沟特征参数之和的比值。

2 结果与分析

2.1 次降雨特征分析

降雨是砒砂岩区侵蚀剧烈的主要因素, 尤其是历时较短却产生大量径流泥沙的强降雨。本试验共观测两个雨季, 出现产流产沙的有效降雨有13次, 总降雨量为276.4 mm。将其进行降雨等级的划分, 其中小雨1场(R_{10})、中雨9场($R_2, R_3, R_5, R_6, R_7, R_8, R_{11}, R_{12}, R_{13}$)、大雨3场(R_1, R_4, R_9)。中雨降雨频率最大, 为53.69%, 小雨和大雨降雨频率分别为3.04%

和 43.27%。选取降雨量、降雨强度、最大 30 min 降雨强度 I_{30} 、降雨侵蚀力等指标来分析不同降雨等级下变化规律。平均降雨量和平均降雨侵蚀力均随着降雨等级的上升而增加,大雨平均降雨量分别为小雨和中雨的 4.75 倍和 2.42 倍且平均降雨侵蚀力的变化范围为 24.73~46.39 MJ·mm/(hm²·h)。而平均降雨强度随着降雨等级的增加而降低,为 0.06~0.34 mm/h。平均 I_{30} 表现为小雨<中雨<大雨,分别为 8.40,10.04,15.80 mm/h(表 1)。

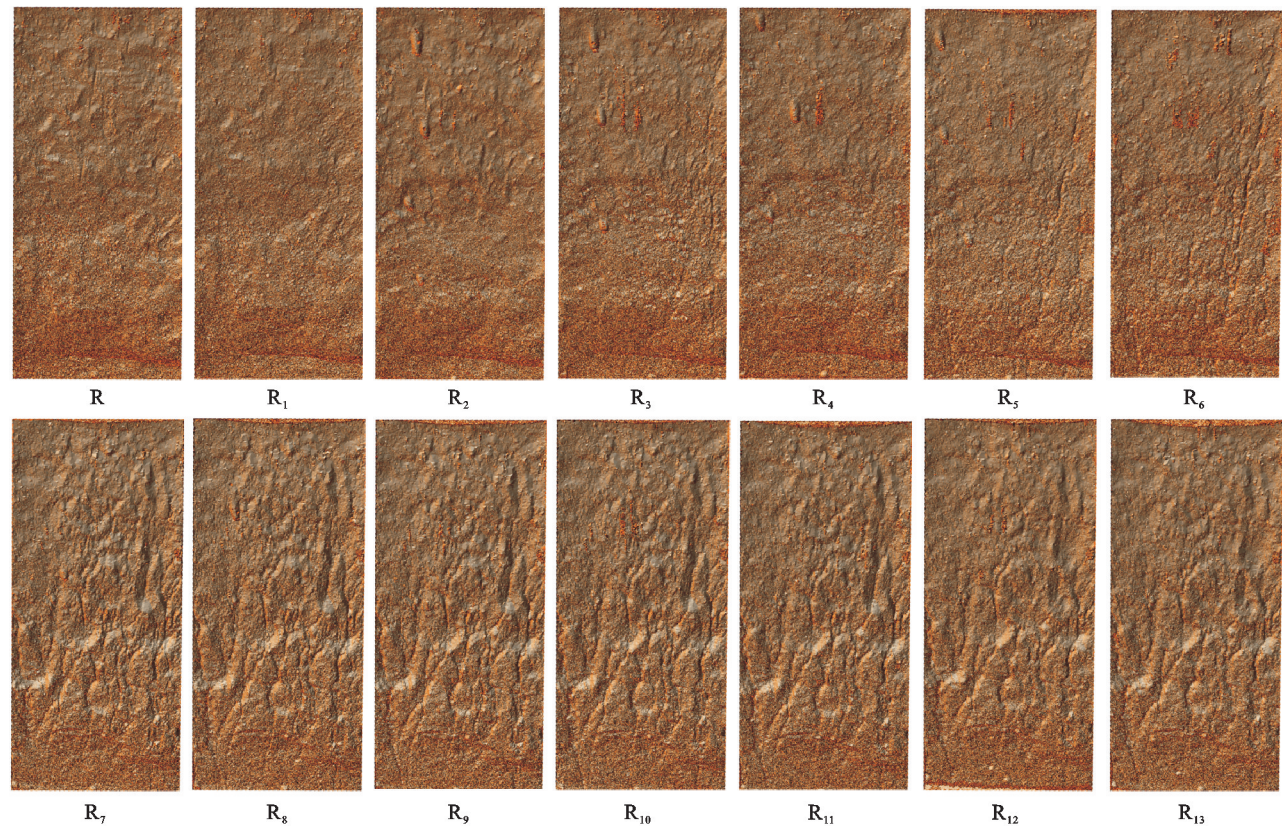
表 1 各场降雨基本特征

编号	降雨 时间	降雨 历时/min	降雨量/ mm	I_{30} / (mm·h ⁻¹)	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)
R ₁	2019-07-16	862	31.2	26	2.17
R ₂	2019-07-22	517	17	8	1.97
R ₃	2019-07-31	1495	10.4	10.8	0.42
R ₄	2019-08-04	597	56.4	11.2	5.67
R ₅	2019-08-10	479	24.6	10.4	3.08
R ₆	2019-08-20	244	22.8	27.2	5.61
R ₇	2020-07-09	180	13.6	4.8	4.53
R ₈	2020-07-10	244	12	6.6	2.95
R ₉	2020-07-12	856	32	10.2	2.24
R ₁₀	2020-07-14	25	8.4	8.4	20.16
R ₁₁	2020-07-17	117	12.4	3.8	6.36
R ₁₂	2020-08-12	85	10.8	3.2	7.62
R ₁₃	2020-08-23	263	24.8	6	5.66

2.2 次降雨下坡面细沟几何特征的变化

由图 1 可知,在坡度不变情况下,两个雨季的降雨足够使细沟微地形在裸露基岩坡面上得到完整塑造。降雨前坡面相对完整,随着降雨次数的增加,细沟在坡面右侧中下部最先出现,通过在坡面上分支、连接、合并等不断地扩展连通进而演变为复杂的细沟网。

2.2.1 细沟累积长度 结合图 1—2 可知,R₁与 R₂坡面主要以片蚀和面蚀为主,坡面表土被冲散且出现零星小土包,出现跌坎,跌坎最深可达 0.224 cm,标志着细沟侵蚀的开始。降雨 R₃中径流继续侵蚀,陡坎链开始出现,且在坡面右部首次出现 5 条细小沟道,细沟总长 4.98 m,R₄细沟条数减少,总长 3.6 m,R₅过后细沟新增 4 条,部分细沟发育出分支由右侧向坡中延伸,且上坡部小土包被冲塌沿坡面重新发育,此时细沟总长为 10.47 m,R₆中细沟开始出现合并连通现象,细沟条数新增 5 条,细沟网络雏形形成,细沟总长 15.89 m,R₇中下坡部分塌陷,整个坡面跌宕起伏,陡坎链进一步扩展,细沟连通性增强,新增细沟数为 12,细沟网络基本形成,该场降雨过后细沟总长为 29.29 m,R₈细沟开始向下延伸到坡底,树枝形细沟网络发育成熟,基本稳定,此时细沟总长 37.11 m,到最后一场降雨 R₁₃,细沟累积长度达最高值 40.52 m。



注:R 表示降雨前原始坡面,其余为表 1 中编号的各场次降雨。

图 1 细沟形态发育过程

2.2.2 细沟平均宽度 沟壁的坍塌是在重力侵蚀的作用下,使细沟加宽的一种方式,观察每场降雨后细沟的平均宽度,来定量研究沟壁坍塌。根据图 2B 所示,细沟的平均宽度呈波动式增加, R_1 的第一次降雨细沟平均宽度就有 1.45 cm,随后几场降雨开始增宽,到 R_5 时细沟条数减少平均宽度也随之减少。 R_6 时随着细沟长度的增加细沟宽度又随之增加,到 R_7 时细沟平均宽度稍有降低, R_8 细沟平均宽度达到最高值 4.6 cm。 R_9 — R_{10} 细沟平均宽度又一次降低但仍有 3.15 cm,3.2 cm 宽,最后 R_{11} — R_{13} 的三次降雨细沟宽度再次得

到加强,但也基本稳定维持在 2.6 cm。
2.2.3 细沟平均深度 在径流剪切的作用下,沟床底部被侵蚀产生泥沙,沟底下切是导致细沟加深的主要原因。采用对比每次降雨后细沟的平均深度,来研究细沟沟底下切的情况。由图 2C 可知,细沟的平均深度为 0.17~1.32 cm。13 场降雨虽然能够持续的对该坡面的平均深度进行加深,但最多也仅有 1.32 cm,可见砒砂岩区土壤质地结构的特殊。分析其原因,一方面是土壤入渗率高,坡面径流剪切力下降;另一方面是沟壁坍塌下来的土壤增加了阻力,减弱了径流能量。

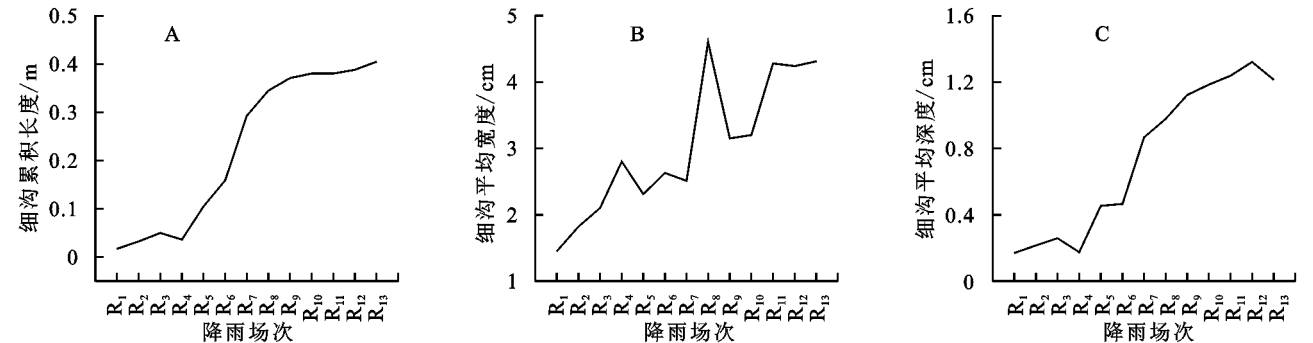


图 2 细沟几何形态随次降雨的变化

2.3 次降雨下坡面细沟形态特征的变化

除细沟长度、平均宽度、平均深度基本几何参数外,本文又选取了细沟密度、细沟复杂度、细沟体积及细沟宽深比这 4 个具有代表性的细沟特征参数来描述次降雨下细沟形态连续演变过程(图 3)。随着细沟条数的增加细沟间距离不断缩小,细沟体积与细沟密度总体呈上升趋势,其变化范围分别为 0.002 8~30.635 9 m³与 0.360~4.052 m/m²,其中密度为 3~4 m/m²的占 45%, R_4 降雨时密度最小为 0.36 m/m²。细沟宽深比可以体现细沟在发展中更趋向于侧向侵蚀还是下切侵蚀,由图 4 可知,次降雨作用下细沟宽深比变化范围为 2.702~16.138,表现出一定的震荡和交替,但总体呈下降趋势, R_4 降雨时宽深比为最大值 16.138。细沟复杂度表现为先增大,后在 R_4 — R_6 降雨后减小,后一直增大且后期变化范围较小,介于 1.062~1.167,其中 R_8 以后变化幅度较大均在 1.1 以上,说明前几次降雨为细沟发育初期,坡面起伏度较小且跌坎链发育不完全,细沟比较笔直,而后几次降雨过后细沟发育迅速条数增多,径流不断下切使得坡面起伏度变大,细沟曲线长度及弯曲度增加,细沟网络更发达复杂度更强。

次降雨对细沟特征参数有重要的影响,不同降雨等级对其变化的贡献不同。降雨等级对细沟体积的贡献为中雨>小雨>大雨,贡献率分别为 77%,13%和 10%;对细沟复杂度的贡献表现为中雨>大雨>

小雨,其贡献率为 72%,19%,9%;不同降雨等级对细沟密度的贡献率分别为中雨 73%、大雨 14%和小雨 13%;对细沟宽深比的贡献率分别为中雨 63%、大雨 32%及小雨 5%。各次降雨中只有一次降雨类型为小雨,故贡献率较小,但本次小雨正好发生在细沟基本网络形成之后,此时细沟多以下切侵蚀为主,所以深度有所增加,对细沟体积的贡献较其他三者更大。当降雨类型为大雨时,对细沟形态变化的贡献多表现在细沟宽深比,其他参数中贡献较少。可能因为一次大雨 R_2 发生在降雨初期,土壤入渗较强,无细沟产生及大雨 R_4 为细沟发育初期,又因大雨降雨侵蚀力较强,导致细沟被向下侵蚀的土壤颗粒所填埋,深度减小,大雨 R_9 时细沟沟网基本形成,下切侵蚀发育剧烈,深度变化幅度大。

不同降雨等级下单次降雨对各细沟特征参数的贡献率,13 场降雨对细沟体积的贡献率差异性较大,大雨等级下的 3 场降雨 R_1 , R_4 的贡献率均为 0, R_9 单场降雨贡献 10.1%,中雨等级下的 9 场降雨贡献率分别为 0, 0.01%, 0.05%, 0.24%, 3.14%, 9.66%, 17.64%, 20.29%, 26.20%, 小雨等级下单场降雨 R_{10} 的贡献率为 12.65%。13 场降雨对细沟复杂度的贡献率差异不大,最大值为小雨等级下的一场降雨 R_{10} 为 9%,最小值为大雨等级下的 R_1 , R_9 均为 6%。大雨等级下的 3 场降雨对细沟密度的贡献率分别为 0.57%, 1.22%, 12.53%, 中雨等级下的 9 场降雨对细沟

密度的贡献率分别为 1.09%, 1.68%, 3.53%, 5.36%, 9.89%, 11.64%, 12.84%, 13.12%, 13.68%, 小雨等级下的 1 场降雨 R_{10} 对细沟密度的贡献率为 12.84%。13 场降雨对细沟宽深比的贡献率差异明显, 中雨等级下的 9 场

降雨贡献率分别为 11.24%, 10.80%, 6.76%, 7.48%, 5.00%, 6.24%, 6.00%, 4.26%, 4.71%, 大雨等级下的 3 场降雨贡献率分别为 10.00%, 19.00%, 3.73%, 小雨等级下的 1 场降雨贡献率为 5.00% (表 2)。

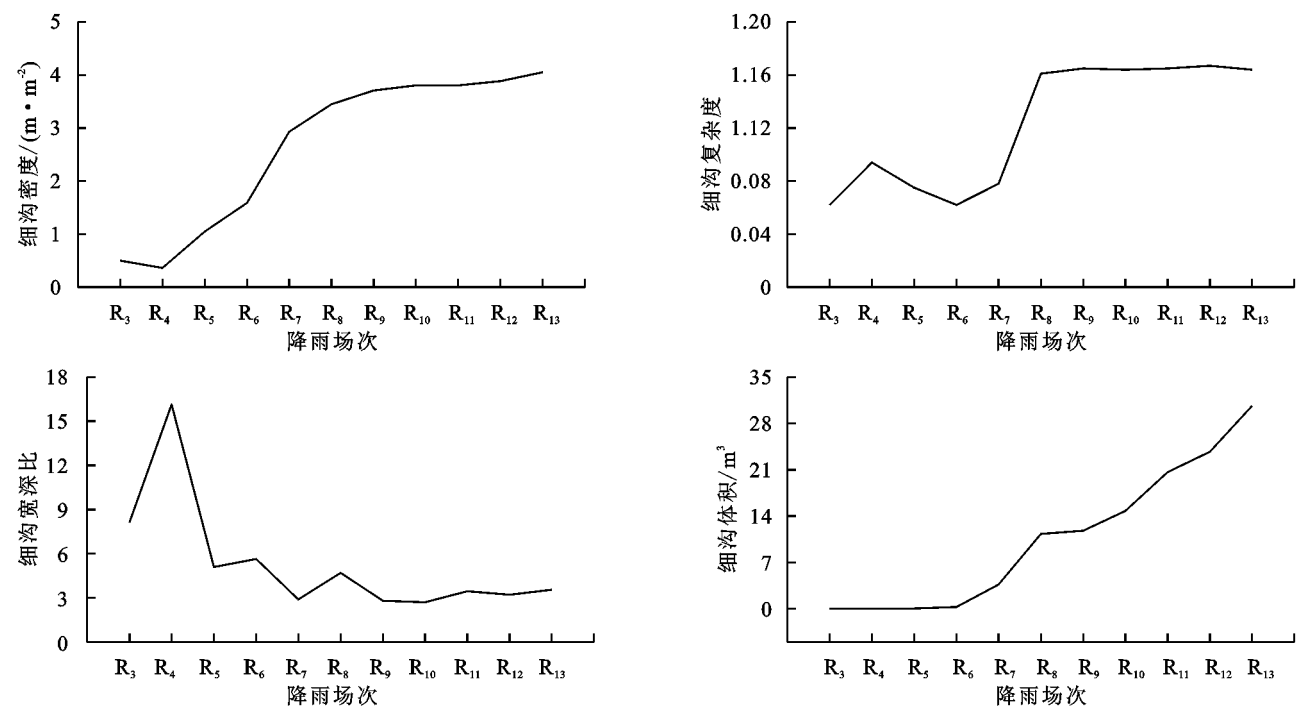


图 3 次降雨下细沟特征参数连续变化

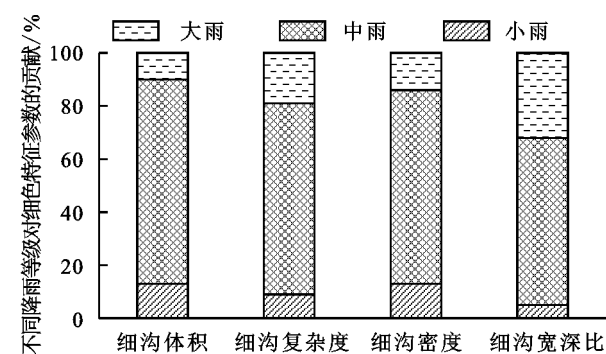


图 4 降雨等级对细沟特征参数的贡献

2.4 次降雨下细沟形态参数与坡面水沙的关系

由细沟演变下侵蚀产沙过程可知 (图 5), 前两次降雨主要为面蚀, 没有细沟产生, 产沙量较少, 且第一次降雨下坡面土壤存在较多表面浮土, 使得产沙量大于第二次降雨, 又因两次降雨前长时间未经历降水, 土壤入渗

作用强, 产生径流能力弱且过程较平缓。第三次降雨后细沟出现, 产沙量明显增加, 较第一次降雨产沙量增加 13 倍。第四次降雨为大雨, 降雨量大, 产生径流量多, 但细沟条数减少产沙量又有所降低。后几次降雨发生后, 由于砒砂岩土体不稳定, 土壤中黏粒含量极低, 细沟边缘在侵蚀的推动下极易出现裂隙或坍塌, 产沙逐渐剧烈并导致地表径流发生明显波动。当细沟基本形成, 由侧向侵蚀转向下切侵蚀, 沟壁坍塌事件极少发生, 产沙量又趋向平稳。总的来说, 在侵蚀过程中, 径流量与降雨关系较密切, 细沟的发育对产沙量的影响显著, 细沟雏形出现前, 径流泥沙量都相对较低, 细沟发展活跃期产沙量振幅明显, 树枝状网络基本构成后, 基本稳定, 泥沙量也随之平缓, 待细沟网络完全成熟后, 产沙量多少被降雨影响较多。

表 2 单次降雨对细沟特征参数的贡献

类别	中雨										大雨		
	小雨	R ₂	R ₃	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈	R ₁₁	R ₁₂	R ₁₃	R ₁	R ₄	R ₉
细沟密度	12.84	1.09	1.68	3.53	5.36	9.89	11.64	12.84	13.12	13.68	0.57	1.22	12.53
细沟复杂	9.00	8.00	8.00	8.00	8.00	7.46	8.04	8.06	8.08	8.06	6.00	7.00	6.00
细沟宽深比	5.00	11.24	10.80	6.76	7.48	5.00	6.24	6.00	4.26	4.71	10.00	19.00	3.73
细沟体积	12.65	0.00	0.01	0.05	0.24	3.14	9.66	17.64	20.29	26.20	0.00	0.00	10.10

为了进一步明确细沟发育演变对产流产沙的影响, 将每次降雨后 ArcGIS 软件提取出的单次细沟形

态特征参数变化值与每次降雨后所收集到的单次产流量、单次泥沙量数据进行相关分析。从分析结

果来看(表 3),产沙量(SL)及含沙量(SC)均与细沟复杂度(C)、细沟密度(ρ)与细沟体积(V)成正相关,其中产沙量(SL)与细沟密度(ρ)及细沟体积(V)的相关性最强,含沙量(SC)则只与细沟体积(V)有较强相关性。而径流量(RP)及径流深(RD)均与细沟宽深比(R)成正相关,与其余参数相关性较弱。因此认为,细沟发育过程与产沙量过程极为密切,对径流量的影响不大。

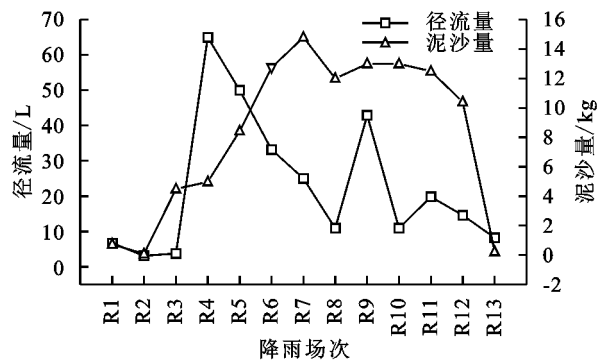


图 5 细沟演变对产流产沙的影响

3 讨论

3.1 次降雨对细沟形态发育的影响

裸露坡面经过两个雨季 13 次自然降雨的塑造,细沟规模不断增大,形成了较完整的细沟网络,沟网呈深“V”型树枝状。R₁—R₂降雨出现了零星跌水,R₃—R₅降雨后细沟陆续发育,在 R₆—R₈降雨后细沟网络连续贯穿,R₉降雨后沟网稳定,由此可见坡面细沟发展过程大致分为跌水发育—断续细沟—细沟连续—沟网形成 4 个阶段,这与王莹等^[24]对紫色土坡面细沟侵蚀发育过程的研究一致。细沟首次出现在坡面中下部,这可能因为坡长较小,上坡部汇水面积小,较难形成集中股流,而中下坡具有产生大量股流的条件。细沟发展演变是多维度变化的^[25-26],其基本几何参数细沟长度、宽度及深度总体表现为上升趋势,但单次增加程度不同,前期可能由于各次降雨的

降雨强度、历时及土壤入渗的影响,后期随着沟网的基本形成,主导细沟继续发育的方式有所改变,故对下一次细沟长度宽度深度的发育存在一定的影响。从细沟形态参数来看,细沟密度及细沟体积总体呈上升趋势,细沟宽深比呈波动下降趋势,符合一般认知,由表 4 可知,降雨历时与细沟密度呈显著负相关,与其细沟复杂度、细沟宽深比、细沟体积相关性不高,降雨量与细沟宽深比有着显著正相关,相关系数为 0.714, I_{30} 与细沟密度、细沟复杂度、细沟体积均呈显著负相关关系,降雨强度与 4 个细沟特征参数的相关性均不高。其中细沟密度及细沟宽深比在 R₄降雨时有明显波动,可能由于该场降雨为大雨,降雨量大且发生在细沟发育初级阶段,大量土壤颗粒被径流携带沿坡面向下侵蚀,导致坡下细沟部分又被土壤所填埋,使得细沟深度减小,除此之外相邻细沟间存在夺袭情况,即细沟间发生合并,合并现象发生后,即便细沟仍处于发育状态,但相比之前细沟长度被减少很多,故细沟密度在 R₄处有所减小且宽深比有所增加。细沟复杂度在 R₄—R₆降雨下表现为减小趋势,与一般情况相悖,这与张建文等^[27]对覆沙坡面细沟形态发育的研究一致,可能原因为细沟复杂度代表细沟弯曲长度与垂直长度的比值,每次降雨发生后,其分子分母都在改变,与细沟密度这类只变化分子的参数相比,它更倾向于是一种瞬时比值,不能全面体现细沟连续变化过程,可以看作细沟在某个时刻的丰富程度。细沟宽深比首先波动较大可能原因为坡面土壤黏粒含量少,稳定性差,其次呈下降趋势则推断为前几次降雨细沟雏形出现,为初级发育阶段,在坡面上表现为侧向侵蚀,细沟形状大致为“宽浅式”后几次降雨细沟网络基本稳定,侧向侵蚀到一定程度,更偏向于下切侵蚀,此时细沟形状表现为“窄深式”,细沟深度向下延伸幅度大,这也是细沟体积前期增加幅度小,后期增加波动大的原因。

表 3 细沟特征参数与坡面径流产沙相关关系

参数	细沟宽深比	径流量	径流深	细沟复杂度	细沟密度	细沟体积	泥沙量	含沙量
细沟宽深比	1							
径流量	0.51	1						
径流深	0.51	1	1					
细沟复杂度	-0.46	-0.37	-0.37	1				
细沟密度	-0.78	-0.52	-0.52	0.87	1			
细沟体积	-0.52	-0.53	-0.53	0.86	0.85	1		
泥沙量	-0.76	-0.67	-0.67	0.66	0.89	0.87	1	
含沙量	-0.22	-0.85	-0.85	0.25	0.26	0.52	0.47	1

表4 次降雨特征与细沟特征参数的相关系数

参数	降雨历时	降雨量	I_{30}	降雨强度	细沟密度	细沟复杂度	细沟宽深比	细沟体积
降雨历时	1							
降雨量	0.262	1						
I_{30}	0.317	0.359	1					
降雨强度	-0.602*	-0.237	-0.174	1				
细沟密度	-0.614*	-0.428	-0.561*	0.466	1			
细沟复杂度	-0.496	-0.236	-0.631*	0.465	0.907**	1		
细沟宽深比	0.451	0.714**	0.328	-0.288	-0.787**	-0.536	1	
细沟体积	-0.509	-0.304	-0.557*	0.388	0.861**	0.865**	-0.579*	1

注: * 在 0.05 级别(双尾)相关性显著; ** 在 0.01 级别(双尾)相关性显著。

3.2 细沟形态发育对坡面侵蚀的影响

坡面为细沟侵蚀开展研究的基础,且在坡面水力侵蚀作用下,细沟发展过程中形态的变化对坡面侵蚀特征有重要的影响,是牵动坡面产流与土壤流失量最主要的因素^[28-29]。本研究中,前两次降雨主要侵蚀方式为面蚀,出现零星跌坎但无细沟形成。这一结果与霍云云等^[30]在人工模拟降雨下对坡面细沟形态动态变化研究结果一致。坡面在面蚀阶段的产沙量为 0.07~0.73 kg,第三次降雨后细沟出现,产沙量大幅增加,且变化规律与细沟演变过程较为一致,两个雨季降雨结束后细沟侵蚀阶段产沙量为 4.97~20.62 kg,细沟微地形出现后产生的泥沙量远远大于面蚀。这一结论与速欢等^[31]对露天排土场边坡系统的产流产沙及细沟演变规律的研究一致。通过对细沟形态参数与径流产沙情况进行相关分析,揭示了细沟形态演变过程对产沙量影响较大,对径流量及径流深影响有限,可能原因为在细沟的发育过程中,土壤含水量、土壤结皮、产流方式及土壤透水性等因素较细沟形态变化更容易影响坡面产流,这一结论印证了张攀等^[32]在人工模拟降雨下所展开的细沟形态发展对坡面侵蚀产沙影响的研究。其中产沙量与细沟密度及细沟体积相关性较好,但张建文^[27]所研究的结果为细沟累积泥沙量与细沟密度拟合较差,可能原因为张建文所研究坡面为覆沙坡面及黄土坡面,与砒砂岩裸露坡面土壤性质有所不同,导致其细沟发育有所差异,再加上他所研究为人工模拟降雨,固定 4 种雨强,较为理想化且细沟到一定阶段进行合并,致使细沟密度表现为减小趋势,而细沟累计泥沙量一直表现为增加,故其研究中细沟累积泥沙量与细沟密度拟合较差。而本研究为多雨强穿插情况下的自然降雨,其中几次降雨雨滴较大,动能也随着增大,侵蚀破坏力增强,对土壤剥离影响大,虽细沟也存在合并现象但同时产生了许多新的分支使得细沟密度增加,故与一

直表现为增加的产沙量相关性较好。含沙量作为表征坡面产沙过程的一个重要参数,其变化也表现为与细沟体积相关性较好,根据赵宇等^[33]利用细沟侵蚀体积所估算的黄土坡面侵蚀量来验证实测泥沙量的研究来看,细沟体积可以很准确的表征泥沙量,并且很直观的体现细沟发育过程,故细沟体积与产沙量和含沙量相关性均较高。

4 结论

(1) 砒砂岩区坡面细沟发育的最大贡献者为中型降雨,两个雨季下中雨发生频率为 53.69%,且对细沟形态的影响占比 71.25%。不同降雨等级下降雨特征有所差异,平均降雨量、平均降雨侵蚀力及 I_{30} 表现为大雨>中雨>小雨,平均降雨强度表现为大雨<中雨<小雨。

(2) 根据所观测到的次降雨下坡面地形变化情况来看,跌坎通常出现在坡面的中下部,再不断发育成跌坎链,随着降雨的继续发生产生断续细沟,最后不断分叉、合并形成完整的树枝状细沟网络。在次降雨条件下,标注细沟发育过程的几何参数细沟长、宽、深不断增加,最宽一条细沟发展到 4.316 cm。细沟密度、细沟复杂度及细沟体积总体表现为上升趋势,细沟宽深比为波动性下降趋势。

(3) 通过对细沟形态演变下径流泥沙的变化情况来看,产沙量与细沟演变过程有很好的对应关系,而对径流量的影响较弱,在细沟出现后产沙量明显上升。通过细沟形态参数与产流产沙特征参数进行相关分析,结果表明细沟特征参数与产沙特征相关性较好,与径流参数相关性差,细沟形态发育对产沙过程影响较大。

参考文献:

- [1] 肖培青,郑粉莉,汪晓勇,等.黄土坡面侵蚀方式演变与侵蚀产沙过程试验研究[J].水土保持学报,2008,22(1):

- 24-27.
- [2] He J J, Sun L Y, Gong H L, et al. Laboratory Studies on the influence of rainfall pattern on rill erosion and its runoff and sediment characteristics[J]. *Land Degradation and Development*, 2017, 28:1615-1625.
- [3] 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.
- [4] 张宽地, 王光谦, 吕宏兴, 等. 模拟降雨条件下坡面流水动力学特性研究[J]. *水科学进展*, 2012, 23(2):229-235.
- [5] 郑良勇, 李占斌, 李鹏, 等. 稀土元素示踪坡面次降雨条件下的侵蚀过程[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3):87-91.
- [6] Shi Z H, Fang N F, Wu F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 455(3):123-130.
- [7] 耿晓东. 主要水蚀区坡面土壤侵蚀过程与机理对比研究[D]. 陕西杨凌: 中国科学院水土保持与生态环境研究中心, 2010.
- [8] Bryan R B. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope[J]. *Geomorphology*, 2000, 32(3):385-415.
- [9] 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.
- [10] Meyer L D, Foster G R, Romkens M J M. Source of soil eroded by water from upland slopes[J]. *Agricultural Research Service Report*, 1975, 40:177-189.
- [11] Yan M J, Hai J S, Zhong M W, et al. The dynamic process of slope rill erosion analyzed with a digital close range photogrammetry observation system under laboratory conditions[J]. *Geomorphology*, 2020, 350:106893.
- [12] 赵新凯, 龚家国, 任政, 等. 黑垆土坡面细沟形态演变规律试验研究[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(2):205-212.
- [13] 黎武. 基于三维激光扫描的坡面细沟形态演化研究[D]. 四川南充: 西华师范大学, 2018.
- [14] 张若曦, 秦富仓, 李龙, 等. 水力侵蚀对砒砂岩区土壤有机碳空间变异性的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6):117-124.
- [15] 常平, 李晓丽, 李明玉, 等. 冲蚀条件下砒砂岩坡面细沟侵蚀特性分析[J]. *人民黄河*, 2018, 40(5):98-102, 106.
- [16] 胡剑汝. 基于 WEPP 的坡面尺度砒砂岩复合侵蚀治理生态水文效应评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [17] 常平. 冲蚀条件下砒砂岩坡面水力侵蚀特性试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [18] 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 雨滴打击对黄土坡面细沟侵蚀特征的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(8):104-112, 89.
- [19] 胡伟, 翟星雨, 李浩, 等. 黑土区农地集水区次降雨径流与输沙特征研究[J]. *土壤与作物*, 2019, 8(4):405-414.
- [20] Shen H O, Zheng F L, Wen L L, et al. An experimental study of rill erosion and morphology [J]. *Geomorphology*, 2014, 231(231):193-201.
- [21] 雷廷武, Nearing M A. 侵蚀细沟水力学特性及细沟侵蚀与形态特征的试验研究[J]. *水利学报*, 2000, 31(11):49-54.
- [22] 何育聪, 郑浩杰, 韩剑桥. 间歇性与连续性降雨对黄土坡面细沟侵蚀影响的比较[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6):8-13.
- [23] 王颢霖, 焦菊英, 唐柄哲, 等. 陕北子洲“7·26”暴雨后坡耕地细沟侵蚀及其影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(11):122-130.
- [24] 王莹. 紫色土坡面细沟侵蚀发育过程研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2019.
- [25] 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.
- [26] Ou X Y, Hu Y X, Li X W, et al. Advancements and challenges in rill formation, morphology, measurement and modeling[J]. *Catena*, 2021, 196:104932.
- [27] 张建文. 覆沙坡面细沟侵蚀发育过程与形态特征研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [28] 郭明明, 王文龙, 李建国, 等. 野外模拟降雨条件下矿区土质道路径流产沙及细沟发育研究[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(24):155-163.
- [29] Shi Q H, Wang W L, Guo M M, et al. The impact of flow discharge on the hydraulic characteristics of head-cut erosion processes in the gully region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12):3891-3899.
- [30] 霍云云, 吴淑芳, 冯浩, 等. 基于三维激光扫描仪的坡面细沟侵蚀动态过程研究[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(2):32-37, 46.
- [31] 速欢, 王文龙, 康宏亮, 等. 露天矿排土场平台一边坡系统侵蚀形态及径流产沙特征[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(9):3194-3206.
- [32] 张攀, 唐洪武, 姚文艺, 等. 细沟形态演变对坡面水沙过程的影响[J]. *水科学进展*, 2016, 27(4):535-541.
- [33] 赵宇, 陈晓燕, 米宏星, 等. 基于体积法对黄土细沟侵蚀沿程分布模拟的研究[J]. *土壤学报*, 2014, 51(6):1234-1241.