

## 紫色土坡耕地细沟发育的形态演变

严冬春<sup>1,3</sup>, 王一峰<sup>2</sup>, 文安邦<sup>1</sup>, 史忠林<sup>1,3</sup>, 龙翼<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 山地表生过程与生态调控重点实验室, 四川 成都 610041;

2. 长江科学研究院水土保持研究所, 湖北 武汉 430010; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要:** 研究细沟发育的形态演变规律是认识细沟发生机理的前提, 本研究通过人工降雨与微地貌扫描相结合的方法, 调查了紫色土坡耕地细沟发生过程的形态演变特征。采用三维激光扫描仪扫描不同降雨时段坡面, 生成高精度坡面 DEM 图像, 统计各时段不同坡段等高线偏离度, 量算坡面凹陷区的表面积、周长、直径以及沟头下切深度; 结果表明, 等高线偏离度越大细沟发育越完全, 有细沟发生坡面等高线偏离度是无细沟坡面的 1 倍以上; 凹陷区的表面积、周长、直径相对于单位降雨量的扩展速率均在细沟贯穿时段出现最大值; 跌坑位置与坡面水平起伏关系不明显, 统计的 3 条沟头分别发育于水平方向起伏的最高点、中间点和低点; 跌坑下切深度及其单位降雨量的扩展速率在跌坑贯穿形成细沟时段出现最大值, 之后逐渐降低, 说明跌坑的形成是细沟造床的关键。

**关键词:** 紫色土; 坡耕地; 细沟; 形态演变

**中图分类号:** P931.1

**文献标识码:** A

细沟侵蚀是坡面侵蚀的主要形式之一, 已有的研究表明, 细沟一旦形成, 其侵蚀量将增加几倍至几十倍, 甚至占到了坡面总侵蚀量的 70% 以上<sup>[1-3]</sup>。基于对这一试验与调查结果, 国内外学者在细沟的发生、发展、侵蚀输沙、防治等方面开展了大量研究<sup>[4-7]</sup>。但是, 由于对细沟本身定义模糊, 只给出了细沟发育完成后的形态特征, 而细沟初始发育阶段的形态特征暂无定论。郑粉莉<sup>[8]</sup>认为坡面跌坑的发育是细沟发生的前提, 跌坑的贯穿是细沟发生的标志; 蔡强国<sup>[9]</sup>、白清俊<sup>[10]</sup>等的研究进一步证实了该种观点。吴普特<sup>[11]</sup>等采用 REE 示踪研究细沟在坡面的垂直分布特征, 提出了细沟平面密度和细沟平均深度表征细沟侵蚀形态; 王协康<sup>[12]</sup>等从水动力角度计算了细沟发育完全的形态特征, 进一步提出细沟密度分析坡地土壤侵蚀程度。本文在前人研究的基础上, 应用间断降雨与微地貌扫描相结合的方法,

采用跌坑-细沟表面面积、周长、直径及细沟下切深度扩展速率定量描述了细沟发育过程各阶段的形态特征, 以期揭示紫色坡耕地细沟发育过程中坡面形态的演变规律。

### 1 研究方法与试验设计

#### 1.1 试验区概况

试验在中国科学院三峡库区忠县水土流失与面源污染观测站内开展(108°10'25" E, 30°24'53" N), 该站地处三峡库区中游, 四川盆地东部平行岭谷区, 浅丘地貌, 区内出路岩层为侏罗系中统沙溪庙组(J<sub>2s</sub>)砂岩、粉砂岩和泥岩。属亚热带东南季风区, 四季分明, 年均气温 19.2 °C, 无霜期 320 d 左右。年均降水量 1 150 mm, 季节分配不均, 其中 70% 以上集中于 4—10 月。土壤为中性紫色土, 坡耕地广

收稿日期(Received date): 2010-04-10; 改回日期(Accepted): 2010-12-30。

基金项目(Foundation item): 国家科技支撑计划项目(课题号: 2008BAD98B01), 国家科技重大专项课题(课题号: 2009ZX07104-002-06)。

[Science and technology support project in china (No. 2008BAD98B01), Nation important vocation project (No. 2009ZX07104-002-06).]

作者简介(Biography): 严冬春, 男, 1981 年出生, 湖北宜昌人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。[Yan Dongchun, male, come from Yichang and was born in 1981, doctor graduate student, mostly engage soil erosion and soil and water conservation study.] phone number: 13438382030, E-mail: yandc@imde.ac.cn

布,垦殖率复种指数均较高,作物按照季节不同采用轮作制种植冬小麦、油菜、花生、土豆、玉米、红薯等。

### 1.2 试验设计

本试验采用间断人工降雨与微地貌扫描相结合的方式,调查紫色坡面细沟发生过程中坡面形态演变特征。试验地块为 $8 \times 2 \text{ m}^2$ 的 $15^\circ$ 小区,实验前将表层20 cm土层挖出,取临近紫色坡耕地表层10 cm表土,过1 cm筛,去除石砾,分层均应填充到小区里,并压实抹平,保持土壤容重与原坡面一致。设计雨强 $1.3 \text{ mm/min}$ ,每次降雨5~10 min,降雨间隔25 min,降雨间隔期采用三维激光扫描仪扫描坡面。降雨器为中国科学院水土保持研究所研制生产的双侧双喷降雨机,通过调整喷头射流孔板调节雨强,喷头距离中轴线高度6.5 m,实际降雨高度大于8 m,钢架挡风棚高度9 m。坡面扫描采用美国徕卡HDS3000激光扫描系统,该系统理想测距范围1~200 m,视场角度为 $360^\circ \times 270^\circ$ ,50 m距离内单点距离 $\pm 4 \text{ mm}$ 、角度 $\pm 12''$ ,形成模型表面精度为 $\pm 2 \text{ mm}$ ,标靶获取精度可达 $\pm 1.5 \text{ mm}$ ,最大采样密度 $1.2 \text{ mm}$ ,测速1 800点/s。共降雨40 min,间隔6次,降雨前后扫描坡面7次,获得数据点700余个。

## 2 结果与讨论

从整个降雨过程来看,细沟发育过程中跌坑是

至关重要的一环,跌坎的出现表明细沟开始发育,跌坑的贯穿标志着细沟的形成。跌坑出现以后坡面漫流在跌坑处汇集成股流,坡面侵蚀方式由薄层水流悬移输送转变为股流冲刷,跌坑在股流作用下溯源侵蚀和下切坡面导致跌坑的贯穿形成沟道。

### 2.1 细沟发生前后坡面形态特征

图1是在间隔人工降雨期间采用三维激光扫描得到的坡面高程等值线图(等高距25 mm),图1-A为降雨前坡面状况,1-B、C、D、E、F、G分别为降雨5 min、10 min、15 min、20 min、30 min和40 min时刻的坡面高程等值线图。图1-B显示距坡顶4.5 m以下形成一些列串珠状跌坑;1-C显示跌坑在顺坡方向延伸贯穿,细沟初步形成;1-D、E、F、G为细沟的进一步发育,从图G中来看,共发育了3条比较明显的细沟,左边细沟有分叉合并现象,中间细沟在10 min时刻贯穿后形状变化不大,从等高线的弯曲程度和间距进一步密集可以看出细沟下切侵蚀明显。

为了定量表达细沟发生前后坡面特征变化,以坡面等高线偏离度作为量化指标,即等高线长度 $L'$ 与直线距离 $L$ 的差偏离直线距离 $L$ 的百分数:偏离度 $= (L' - L) / L \times 100\%$ 。偏离度越大,说明坡面细沟发育越明显。图1中显示了细沟沟头在距离坡顶4.5 m附近发育,统计偏离度时以4.5 m为界限,分别统计4~4.5 m和4.5~5 m两个区间各20条等高线平均偏离度(图2)。图2显示,初始状态时刻4

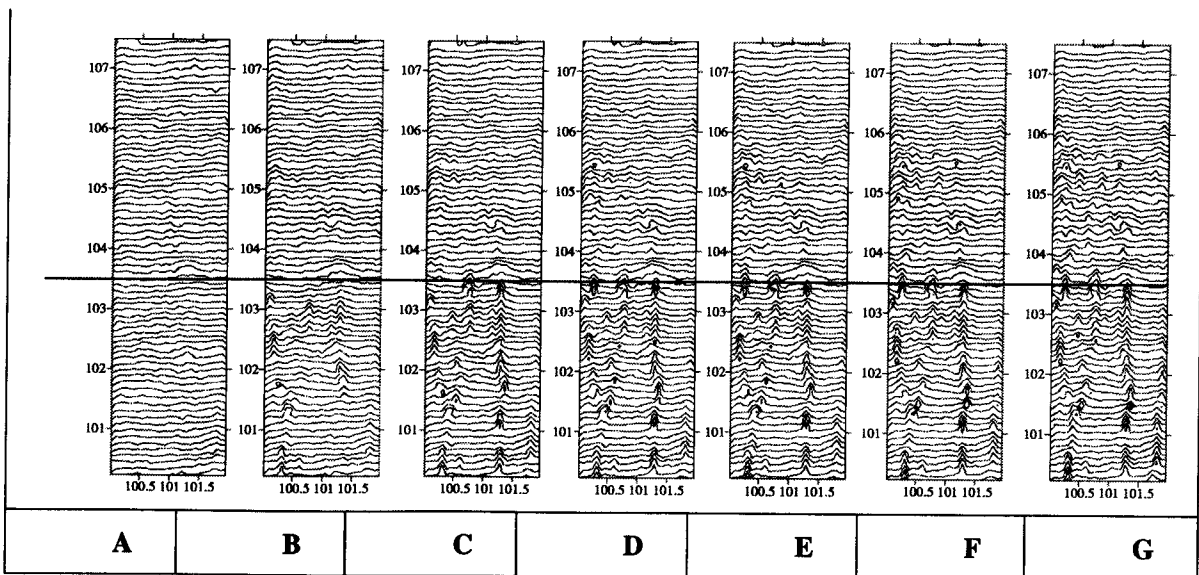


图1 侵蚀坡面高程等值线图

Fig. 1 Contour line on the slope

~4.5 m 和 4.5 ~ 5 m 区间等高线平均偏离度基本一致,在 3% ~ 4% 间;随着降雨历时的延长,两个区间等高线平均偏离度均呈递增趋势,但 4.5 ~ 5 m 区间平均偏离度递增趋势明显大于 4 ~ 4.5 m 区间;特别是 5 ~ 10 min 时刻,4.5 ~ 5 m 区间平均偏离度迅速增加,比 4 ~ 4.5 m 区间大 1 倍以上,而该时段正好对应着跌坎贯穿细沟形成。10 min 以后,4.5 ~ 5 m 区间平均偏离度线性递增,与细沟贯穿下切一致。

## 2.2 细沟平面形态演变特征

降雨 5 min 后,坡面共发育明显跌坑 9 个,最上部 3 个跌坑距离坡顶 4.66 m、4.78 m、4.83 m,平均距离坡顶距离 4.75 m,顺坡跌坑之间间距 0.16 ~ 0.45 m,平均间距 0.33 m。降雨 10 min 后,坡面跌坑之间发生贯穿,形成明显沟道(图 3),其中沟道 C 全线贯穿。降雨 15 min 后,坡面跌坑基本贯通,形成 3 条主沟道。降雨 20 min 后跌坑全面贯通,形成 5 条明显的沟头。20 ~ 40 min 时间段沟道表面形态变化不大,以下切为主,此处不做统计。

为了定量描述细沟形态演变过程,以单位降雨量内跌坑 - 细沟面积/周长/直径扩展速率定量描述,结果见表 1,其中扩展速率分别为单位降雨量的面积/周长/直径变化。从表 1 来看,跌坑贯穿形成细沟前后面积和周长扩展速率均先增大后减小,均

在 10 min 时刻出现转折,说明跌坑贯通前细沟以平面扩展为主,细沟贯通后以下切侵蚀为主。直径扩展变化率在 10 ~ 15 min 时段出现转折,滞后于面积和周长扩展一个时段,可能是由于沟道崩塌导致。

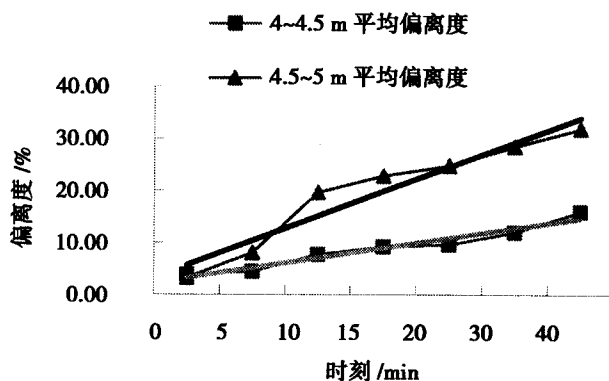


图 2 等高线偏离趋势图

Fig. 2 Trend of contour line departure

## 2.3 细沟剖面形态演变特征

从细沟平面形态演变图上可以看出距离坡顶最近的沟头在 4.66 m 处,为了定量描述细沟沟头垂向下切过程,以 100.898 m 等高线为基准,在距离坡顶 4.66 m 处绘制水平方向跌坑 - 细沟垂向下切变化趋势图(图 4)。图 4 显示有 3 处明显的沟头,与图 3

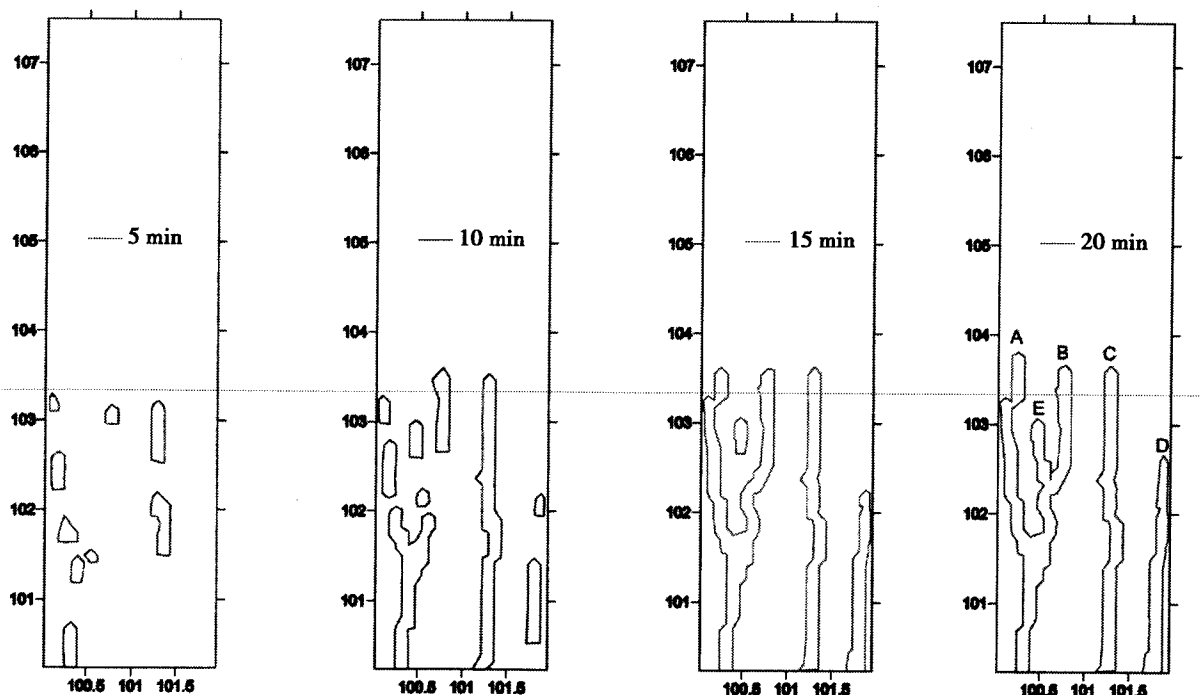


图 3 跌坎(坑) - 细沟平面形态演变过程

Fig. 3 Surface configuration evolvement about drop-pit & rill

注:图中数字为扫描时定义坐标,单位 m,以试验小区水泥框左下角为(100,100)。

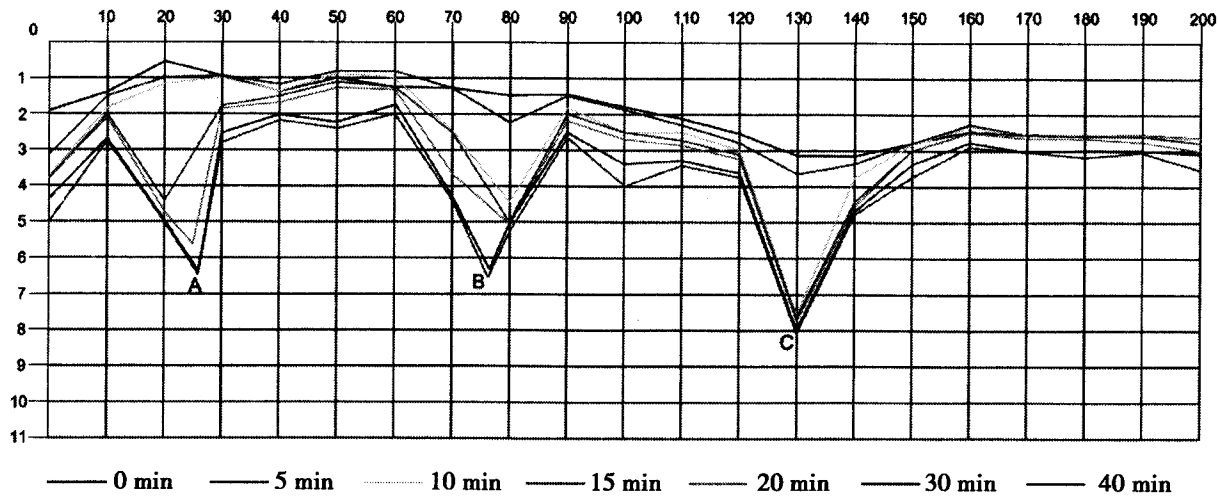


图4 跌坎(坑)-细沟垂向下切变化趋势图

Fig.4 Trend of cutting about drop-pit & rill  
注:图中数字单位为 cm。

表1 跌坎(坑)-细沟平面尺寸扩展速率

Table 1 Rate of surface configuration evolvement about drop-pit & rill

量化指标	扩展速率			
	0~5 min	5~10 min	10~15 min	15~20 min
面积扩展 m <sup>2</sup> /mm	0.071	0.139	0.047	0.019
周长扩展 m/mm	1.34	1.85	0.55	0.27
直径扩展 m/mm	0.053	0.075	0.085	0.070

中显示的一致。初始阶段坡面水平起伏垂直落差最大 2.5 cm,最大水平比降 2.3%。沟头 A、B、C 的位置与坡面水平落差无直接关联,分别位于初始坡面水平起伏最高点、中间点和最低点。

进一步统计 3 条沟头下切深度与速率见表 2,其中下切速率为单位降雨量的下切深度(mm/mm)。从统计结果来看,沟头 A、B、C 分别下切 59.2 mm、50.5 mm、49.3 mm,平均下切速率 1.14 mm/mm、0.97 mm/mm、0.95 mm/mm,其中最大下切速率发生在沟头 A 10~15 min 时间段为 9.63 mm/mm。总体来看,3 条沟头下切最大值及最大速率出现在 5~15 min 时间段,与跌坑贯穿形成细沟时间一致,说明跌坑的形成是细沟造床的关键。从降雨过程来看,沟头下切速率均为先增大后减小,主要是由于沟头溯源侵蚀形成的泥沙暂时堆积在沟道内。但沟头 B、C 最大下切速率比沟头 A 提前一个时间段,可能是由于沟头 B、C 水平位置相对低洼,径流优先汇集下切沟道。

表2 沟头下切速率统计表

Table 2 Rate of cutting about drop-pit & rill

沟头	A		B		C	
时间段	深度/mm	速率	深度/mm	速率	深度/mm	速率
0~5 min	4.5	0.77	7.5	1.15	5.2	0.80
5~10 min	1.7	0.26	22.1	3.40	39.0	6.00
10~15 min	32.6	9.63	5.5	0.85	0.9	0.14
15~20 min	12.0	1.85	0.7	0.11	0.9	0.14
20~30 min	7.4	0.57	12.4	0.95	2.4	0.18
30~40 min	1.0	0.08	2.3	0.18	0.9	0.07
合计	59.2	1.14	50.5	0.97	49.3	0.95

3 结语

研究细沟发育的形态演变特征是进一步认识细沟发生机理的前提,定量调查细沟发生过程各时段坡面形态对开展细沟发生的水动力试验具有指导意义。已有的细沟水动力过程模拟研究主要集中在细沟的侵蚀输沙方面,而对于水力侵蚀过程中跌坑的突变形成和贯穿开展模拟试验的比较少,主要的原因在于坡面流作用下,很难开展动床试验,也没有现成的水力模型供参考。本研究通过间断降雨试验定量调查细沟发生过程的形态演变,发现跌坑的形成对细沟造床起着关键性的作用。因此对细沟发生机理的水动力模拟试验应着眼于坡面流作用下的跌坑发生机制的探索。

## 参考文献(References)

- [1] Tang Keli, Zheng Shiqing. Soil and water conservation about slopeland on Xingzi watershed[J]. Bulltin of Soil and Water Conservation, 1984, 4: 5-8 [唐克丽, 郑世清. 杏子河流域坡耕地的水土流失及其防治[J]. 水土保持通报, 1984, 4: 5-8]
- [2] Cai Q C, S H Luk, H Chen, et al. Effect of surface crusting on water erosion laboratory experiments [C]//On the assessment of soil surface sealing and crusting, Ghent, Belgium, 1985: 99-105
- [3] Cai Qiangguo, Zhu Yuanda, Wang Shiyang. Process and affecting factor about rill erosion on some soils[J]. Advance of Water Science, 2004, 15(1): 12-18 [蔡强国, 朱远达, 王石英. 几种土壤的细沟侵蚀过程及其影响因素[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 12-18]
- [4] Zheng Fenli. Critical length and gradient about rill taken place[J]. Soil and Water Conservation in China, 1989, 8: 23-24 [郑粉莉. 发生细沟侵蚀的临界坡长与坡度[J]. 中国水土保持, 1989, 8: 23-24]
- [5] Zhangkeli, Akryoshi Yashiro. Study on critical hydraulic condition about rill erosion taken place[J]. Soil and Water Conservation in China, 1998, 4(1): 41-46 [张科利, 秋吉宏康. 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, 4(1): 41-46]
- [6] G R Foster, L F Huggins, L D Meyer. A laboratory study of rill hydraulics: I: Velocity relationship [J]. Trans of ASAE, 1984, 27(3): 790-796
- [7] G Covers. Relationships between discharge, velocity, and flow area for rills eroding loose, non-layered materials [J]. Earth surface processes landforms, 1992, 17: 515-528
- [8] Zheng Fenli, Tang Kkeli, Zhou Peihua. Study on affecting factor about rill erosion on slopeland[J]. Journal of soil science, 1989, 26(2): 109-116 [郑粉莉, 唐克丽, 周佩华. 坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究[J]. 土壤学报, 1989, 26(2): 109-116]
- [9] Cai Qiangguo. A study on critical condition about rill taken place on slope[J]. Journal of sediment study, 1998, (1): 52-59 [蔡强国. 坡面细沟发生临界条件研究[J]. 泥沙研究, 1998, (1): 52-59]
- [10] Bai Qingjun, Ma Shusheng. A discuss on mechanism of drop-pit taken place in the process of rill erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(6): 62-65 [白清俊, 马树升. 细沟侵蚀过程中水流跌坑的发生机理探讨[J]. 水土保持学报, 2001, 15(6): 62-65]
- [11] Wu Pute, Zhou Peihua, Wu Chunlong, et al. Research on the spatial distribution characters of slope rill erosion[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1997, 4(2): 47-56 [吴普特, 周佩华, 武春龙, 等. 坡面细沟侵蚀垂直分布特征研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 47-56]
- [12] Wang Xiekang, Fang Duo. Study on hydraulic geometry properties for the shreshold cross-section of the rill[J]. Mountain Research, 1997, 15(1): 24-29 [王协康, 方铎. 临界细沟水力几何形态问题的研究[J]. 山地研究(现山地学报), 1997, 15(1): 24-29]

## Configuration Evolvment of Rill Development on Purple Slopeland

YAN Dongchun<sup>1,3</sup>, WANG Yifeng<sup>2</sup>, WEN Anbang<sup>1</sup>, SHI Zhonglin<sup>1</sup>, LONG Yi<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Environment Evolvment and Regulation, Institute of Mountain Hazards and

Environment, CAS, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Changjiang Academy of Sciences, Wuhan 430010, Hubei, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The investigation on the configuration evolvment of rill is the precondition of rill development mechanism research. This study adopted the methods of artificial rainfall and macro-morphology scan to investigate the configuration evolvment of rill development on purple soil slopeland. The results displayed that some indexes were effective to express configuration evolvment of rill, such as the degree of contour line departure, enlarge rate of surface area, perimeter, diameter and rill deepness with unit precipitation. The higher the degree of contour line departure, the more entireness of rill development, and the degree of contour line departure in the rill development region was more than one time to the no rill development area. The maximum of enlarge rate about surface area and diameter, was taken place when the drop-pit was rush through. And the position of drop-pit was not directness relation with the undulation of surface level, because the positions of three drop-pit we surveyed were taken place on the vertex, middle and low. The enlarge rate of rill deepness was augment firstly, then played down gradually, and the maximum took place at the drop-pit rush through period, so it implies that the forming of drop-pit was the key of rill cutting channel.

**Key words:** purple soil; slopeland; rill; configuration evolvment

作者: 严冬春, 王一峰, 文安邦, 史忠林, 龙翼, YAN Dongchun, WANG Yifeng, WEN Anbang, SHI Zhonglin, LONG Yi

作者单位: 严冬春, 史忠林, YAN Dongchun, SHI Zhonglin(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所山地表生过程与生态调控重点实验室, 四川成都610041; 中国科学院研究生院, 北京100049), 王一峰, WANG Yifeng(长江科学研究院水土保持研究所, 湖北武汉, 430010), 文安邦, 龙翼, WEN Anbang, LONG Yi(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所山地表生过程与生态调控重点实验室, 四川成都, 610041)

刊名: 山地学报 ISTIC PKU

英文刊名: Journal of Mountain Science

年, 卷(期): 2011, 29(4)

被引用次数: 3次

## 参考文献(12条)

1. 唐克丽; 郑世清 杏子河流域坡耕地的水土流失及其防治 1984
2. Cai Q C; S H Luk; H Chen Effect of surface crusting on water erosion laboratory experiments 1985
3. 蔡强国; 朱远达; 王石英 几种土壤的细沟侵蚀过程及其影响因素[期刊论文]-水科学进展 2004(01)
4. 郑粉莉 发生细沟侵蚀的临界坡长与坡度 1989
5. 张科利; 秋吉宏康 坡面细沟侵蚀发生的临界水力条件研究 1998(01)
6. GR Foster; L F Huggins; L D Meyer A laboratory study of rill hydraulics: I: Velocity relationship 1984(03)
7. G Govers Relationships between discharge, velocity, and flow area for rills eroding loose, non-layered materials 1992
8. 郑粉莉; 唐克丽; 周佩华 坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究 1989(02)
9. 蔡强国 坡面细沟发生临界条件研究 1998(01)
10. 白清俊; 马树升 细沟侵蚀过程中水流跌坑的发生机理探讨[期刊论文]-水土保持学报 2001(06)
11. 吴普特; 周佩华; 武春龙 坡面细沟侵蚀垂直分布特征研究[期刊论文]-水土保持研究 1997(02)
12. 王协康; 方铎 临界细沟水力几何形态问题的研究 1997(01)

## 引证文献(4条)

1. 李仲春 云阳县紫色土坡耕地水土流失及其综合治理[期刊论文]-现代农业科技 2012(15)
2. 刘俊体, 孙莉英, 张学培, 蔡强国, 陈俊杰 2次降雨条件下不同土壤细沟侵蚀分析[期刊论文]-中国水土保持科学 2013(4)
3. 刘俊体, 孙莉英, 张学培, 蔡强国, 陈俊杰 黄土坡面细沟发育过程及侵蚀产沙特征研究[期刊论文]-水土保持通报 2013(3)
4. 张永东, 吴淑芳, 冯浩, 霍云云 黄土陡坡细沟侵蚀动态发育过程及其发生临界动力条件试验研究[期刊论文]-泥沙研究 2013(2)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_sdx201104011.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdx201104011.aspx)