

黄土坡面细沟形态及其量化参数特征

张攀^{1,2}, 姚文艺¹, 肖培青¹

(1. 黄河水利科学研究院 水利部 黄土高原水土流失过程与控制重点实验室,
河南 郑州 450003; 2. 河海大学 水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 通过黄土坡面模型和人工模拟降雨试验, 定量分析了在 45, 87 和 127 mm/h 降雨强度下坡面细沟形态量化参数特征。结果表明, 细沟形态量化参数随雨强的增加并不是单一的增加或减少, 而是随着侵蚀的发展呈波动变化。裸地 1 和裸地 2 由于土壤容重的不同表现出不同的变化趋势。细沟分形维数与长度、密度间存在良好的正相关关系, 说明非线性量化参数与传统单因子量化参数之间不是孤立的。分形维数作为整体性的量化参数, 在坡面侵蚀发育的一定阶段内能够较好地表征细沟长度、密度的变化趋势。

关键词: 坡面细沟; 形态量化参数; 分形维数; 模拟降雨

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)05-0015-03

中图分类号: S157.1

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.05.010

Morphological Development of Rill and Its Quantitative Morphological Parameters Characteristics in Loess Hillslope

ZHANG Pan^{1,2}, YAO Wen-yi¹, XIAO Pei-qing¹

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Key Laboratory of Soil and Water Loss

Process and Control on the Loess Plateau, Ministry of Water Resources, Zhengzhou, Henan 450003, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098 China)

Abstract: Using the loess hillslope model and the artificial simulated rainfall experiment, morphological development of rill and the quantitative characteristics of morphological parameters were analyzed quantitatively under the rainfall intensities of 45, 87, and 127mm/h. The results showed that the quantitative morphological parameters of rill was not a single increase or decrease with the rainfall intensity increase, it presented the volatility changes with soil erosion development. Bare ground 1 and bare ground 2 showed different trends of change because of their different soil volume weight. A good relationship between the rill length and density and the fractal dimension of rill showed that the non-linear quantization parameter was not independent with the traditional one-factor quantization parameters. The fractal dimension as a quantitative parameter, can better reflect the change of rill length and density.

Keywords: rill in hillslope; quantitative morphological parameters; fractal dimension; simulated rainfall

坡面细沟形态是影响坡面侵蚀产沙过程的重要边界条件之一。在坡面细沟侵蚀过程中, 雨滴降落到坡面后在坡面上会发生水沙运移和能量消耗, 从而影响坡面细沟形态的演变, 这种形态的不断变化又影响着细沟中水流的水力学特性, 因此细沟演变的过程是一个降雨、侵蚀、水流水力学特性、细沟形态变化间相互影响的动态耦合系统, 涉及水力学、地貌学、土壤侵蚀学等多学科交叉, 对细沟形态进行科学量化是揭示该系统形成机制的关键科学问题。随着分形理论在

土壤侵蚀研究领域的逐渐深入和细沟分形试验研究的开展, 目前国内外在坡面细沟形态研究中已经取得了一些进展^[1-4], 但是, 鉴于研究方法和测量手段的限制, 通过坡面细沟形态的变化过程来揭示坡面侵蚀产沙变化规律仍是土壤侵蚀研究领域的薄弱环节。已有的研究对细沟发育过程的描述主要停留在对现象的定性描述上, 而缺少对过程的定量分析, 对分形结果的合理性缺乏论证, 对坡面分形地貌与坡度、产沙、水流水力学参数的关系有一些涉及, 却鲜见揭示其与

收稿日期: 2013-10-16

修回日期: 2013-11-06

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土坡面细沟形态量化描述及侵蚀产沙响应规律”(51409001); 水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室项目“黄土坡面不同雨强对细沟侵蚀发育形态的影响”(201206); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项“坡面细沟形态非线性量化指标体系研究”(HKY-JBYW-2014-02)

作者简介: 张攀(1982—), 女(汉族), 河南省洛阳市人, 博士研究生, 工程师, 主要从事土壤侵蚀及河流泥沙研究。E-mail: zpyrc@163.com。

降雨的响应关系,降雨驱动下的坡面细沟形态响应机制尚待揭示。鉴于此,本文拟采用室内人工模拟降雨试验,研究不同雨强下的细沟形态量化参数特征,以期从侵蚀形态的角度定量揭示坡面细沟形态对降雨侵蚀产沙的响应机制。

1 试验设计与方法

采用人工模拟降雨的方法,研究 3 种降雨强度下同一降雨时间内陡坡坡面(20°)裸地 1 和裸地 2 的细沟形态。

试验在黄河水利科学研究院模型黄河试验基地进行。试验土槽长 5 m,宽 1 m,深 60 cm。土槽底部钢板钻有直径 5 mm 的透水孔并粘有大小不等的沙粒,以降低填土和钢板之间的边界影响,保证土壤水自由入渗。

试验用土采用郑州邙山坡面表层黄土,颗粒组成中,粒径 0.005~0.01 mm 的颗粒占 43.4%,粒径 0.02~0.05 mm 的颗粒占 35.45%,其他粒径的颗粒占 21.15%。试验土槽填土采取分层填土和分层压实的方法,土壤水分含量控制在 15%左右,试验设计了两种土壤容重,裸地 1 容重控制在 1.30 g/cm³ 左右,裸地 2 土壤容重控制在 1.05 g/cm³ 左右,模拟野外农耕地和撂荒地自然状态。

根据黄土高原典型暴雨频率,试验设计的 3 种降雨强度分别为 45,87 和 127 mm/h,降雨均匀性分别达到 86%,87%和 92%,降雨时间均为 60 min。每场降雨结束后用三维激光扫描仪扫描坡面地形,获得坡面 DEM 数据。试验方案如表 1 所示。

表 1 试验设计

试验区	容重/(g·cm ⁻³)	坡度/(°)	雨强/(mm·h ⁻¹)
裸地 1	1.30	20	45
			87
			127
裸地 2	1.05	20	45
			87
			127

注:降雨时间为 60 min。下同。

2 试验结果与分析

在细沟形态的众多影响因素中,降雨提供了侵蚀的动力条件,坡度、坡形、坡长等为侵蚀提供了边界条件。降雨对细沟形态的影响可以通过控制其他边界条件一致的情况下,通过改变雨强、对比同一时间不同雨强下的细沟形态得到。细沟形态的量化采用传统参数与非线性参数相结合的量化方法,通过分析不

同情况下的细沟长度、密度、分形维数来揭示降雨驱动下的坡面细沟形态响应机制。

细沟形态的科学量化是以准确的沟网形态为基础的,本次沟网形态的获取采用以坡面 DEM 为基础数据源,通过 ArcGIS 中的水文分析模块得到。在实际操作过程中汇流阈值的设定至关重要,它直接影响最终沟网形态的生成,本文结合现场试验照片中细沟沟网形态,将汇流阈值统一设定为 70,此时提取出的细沟形态与实际形态拟合最好。

2.1 分形维数变化特征

近年来随着分形理论的发展,分形维数开始应用于细沟形态的描述,成为细沟沟网最具代表性的非线性量化参数之一。它克服了传统单因子量化参数的局限性,能够全面描述沟网结构复杂程度,是描述复杂形态较为灵敏和本质的参数^[5-7]。坡面细沟从简单到复杂的发育过程可以在分形维数的变化上体现出来,在一定程度上能反映整个坡面侵蚀过程中侵蚀强弱的动态变化。由表 2 可见,裸地 1 和裸地 2 在各量级雨强下坡面细沟分形维数表现出不同的变化趋势。

表 2 不同雨强下坡面细沟分形维数变化特征

雨强/ (mm·h ⁻¹)	分形维数	
	裸地 1	裸地 2
45	1.111 0	1.139 3
87	1.158 6	1.081 9
127	1.089 5	1.138 3

在裸地 1 条件下,细沟分形维数随雨强的增加呈先增大后减小的趋势,87 mm/h 雨强对应的分形维数最大,127 mm/h 雨强对应的分形维数最小。这主要由于当雨强处于相对较低强度时,雨滴的击溅和径流的冲刷作用促使坡面发生水沙的运移和能量的交换,随着雨强的增加这种作用得到不断加强,反映在坡面上表现为土壤侵蚀的加剧、坡面破碎、细沟沟网复杂。但雨强达到一定强度后,随着径流冲刷的进一步加强,细小的沟网不断合并、加深,小股径流合并为大股径流,冲刷能量加剧,细沟合并贯通,促使沟网结构趋向简单化,沟网的分形维数表现为下降的趋势。

在裸地 2 条件下,细沟分形维数随雨强的变化与裸地 1 不同,表现出先减小后增加的趋势。45 mm/h 雨强与 127 mm/h 雨强产生的细沟分形维数相当,87 mm/h 雨强产生的细沟分形维数最小,这一点从图 1 中的细沟形态可以明显看出。由于裸地 2 容重较小,土壤结构较松散,较小雨强下细沟已经发育比较复杂,当雨强增加至 87 mm/h 时,径流冲刷作用增强导致产生的细沟较宽、较深,但沟网形态简单,不易形成较小较密的细沟沟网。当雨强增加至 127 mm/h

时,坡面细沟又进一步发育成为较宽、较深且较复杂的沟网形态,反映在分形维数上表现为数值的增加。虽然此时的沟网分形维数从数值上看与 45 mm/h 时相当,但此时的细沟更宽、更深。

将裸地 1 和裸地 2 坡面细沟分形维数进行横向比较,可以看出在 45 和 127 mm/h 雨强下细沟分形维数裸地 2 较裸地 1 大,87 mm/h 雨强下裸地 1 较裸地 2 大。

2.2 细沟分形维数与传统量化参数间的关系

细沟长度、细沟密度是量化细沟形态的传统单因子参数,细沟形态的演变直接影响细沟长度的变化,从而使细沟密度发生改变。通过统计细沟长度、密度的变化可以获得复杂过程的频率和趋势,但对于复杂形态的描述较之非线性量化参数缺乏整体的空间性、区位性。

由表 3 可见,细沟长度、密度的变化与分形维数的变化趋势大致相同,同样表现为裸地 1 随降雨强度的增加先增加后减少,裸地 2 随降雨强度的增加先减少后增加。裸地 1 细沟长度、密度最小值出现在 127 mm/h 雨强下,最大值出现在 87 mm/h 雨强下。裸地 2 由于土体结构较为松散,细沟长度、密度最小值出现在 87 mm/h 雨强下,最大值出现在 45 mm/h 雨强下。裸地 2 在 45 mm/h 和 127 mm/h 雨强下细沟长度较裸地 1 大,87 mm/h 雨强下裸地 1 较裸地 2 大。由细沟长度的变化趋势对比分形维数的变化趋

势,可见,非线性量化参数与传统单因子量化参数间存在较好的相关性。

表 3 不同雨强下坡面细沟长度、密度变化特征

雨强/ (mm · h ⁻¹)	细沟长度/mm		细沟密度/(mm · mm ⁻²)	
	裸地 1	裸地 2	裸地 1	裸地 2
45	32 996	55 540	0.008 3	0.015 0
87	50 216	19 286	0.014 1	0.005 1
127	26 175	44 921	0.006 3	0.011 6

为了揭示非线性量化参数与传统单因子量化参数的这种相关性,需要做进一步的相关分析。虽然不同的量化参数在概念、计算方法等方面有明显的差异,但彼此之间不是孤立的,而是相互关联、相互制约、相互影响的,这种关联的强弱与趋势从不同角度反映了细沟发育的内在本质。对坡面细沟形态分形维数与传统量化参数的相互关系进行统计分析,有助于深化认识细沟的非线性量化参数与线性量化参数之间的关系,揭示细沟发育特征的本质。

由图 1 可见,坡面细沟分形维数与细沟长度、密度之间关系呈现良好的正相关关系,其关系可近似用线性函数描述。随着细沟长度的增大,细沟密度随之增大,坡面形态逐渐复杂破碎,坡面细沟分形维数也不断增大。分形维数与长度间的 $R^2=0.889 4$,与密度间的 $R^2=0.906 5$,说明坡面细沟分形维数与细沟长度、密度之间存在一定的表征关系。

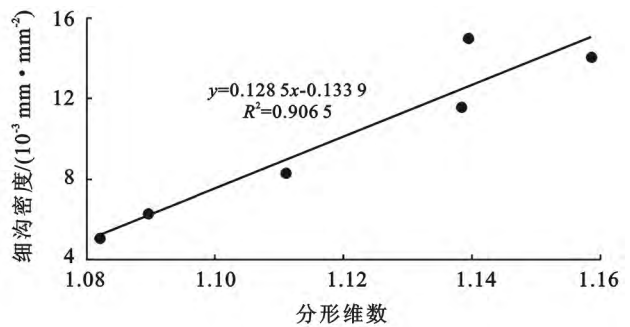
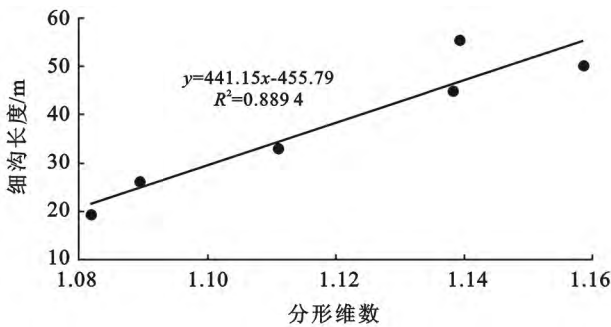


图 1 细沟分形维数与长度、密度相关关系

3 结论

(1) 雨强的增大会促使侵蚀的加剧,但侵蚀的加剧反映在细沟形态量化参数的变化上并不是单一的增加或减少,而是随着侵蚀的发展呈波动变化。裸地 1 和裸地 2 由于土壤容重的不同表现出不同的变化趋势。

(2) 细沟分形维数与传统形态量化参数间存在良好的相关关系,其关系可近似用线性函数描述,说明非线性量化参数与传统单因子量化参数之间不是

孤立的,彼此之间存在内在联系。

从上述分析可知,分形维数和传统量化参数虽然能够准确量化沟网的形态,但是与侵蚀量的相关性却不够理想,无法全面描述整个坡面形态随侵蚀过程的变化,因此还需引进能反映地形起伏度的非线性量化参数,才能有效克服分形维数和传统量化参数难以描述非线性动态响应关系的不足,拓展侵蚀形态量化指标的内涵,达到对坡面侵蚀系统发育过程的全面刻画。

(下转第 24 页)

- [20] 李燕,夏广义. 淮河流域易涝洼地涝灾特性及成因研究[J]. 水利水电技术, 2012, 43(6): 93-96.
- [21] 郑永红,张治国,姚多喜,等. 煤矸石充填复垦对土壤特性影响研究[J]. 安徽理工大学学报:自然科学版, 2013, 33(4): 7-11.
- [22] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [23] 姜凌,李佩成,胡安焱,等. 干旱区绿洲土壤盐渍化分析评价[J]. 干旱区地理, 2009, 32(2): 234-239.
- [24] 何毓蓉,徐祥明,刘黎. 西南地区水耕人为土诊断层土壤特性及 SEM 特征[J]. 山地学报, 2009, 27(6): 727-734.
- [25] 王志亚,林大仪,赵景逵,等. 煤矸石复垦工程中绿肥牧草对矸石风化层生态环境影响[J]. 土壤学报, 1996, 33(3): 317-321.
- [26] 许丽,周心澄,王冬梅. 煤矸石废弃地复垦研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(3): 117-122.
- [27] 胡振琪. 半干旱地区煤矸石山绿化技术研究[J]. 煤炭学报, 1995, 20(3): 322-327.
- [28] 李阳兵,杨霞,宋晓利,等. 岩溶生态系统土壤非保护性有机碳含量研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 402-406.
- [29] 贾晓红,李新荣,陈应武,等. 植被恢复对旱区表土颗粒中有机碳和氮分布的影响[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5): 560-564.
- [30] 刘涛泽,刘丛强,张伟. 植被恢复中坡地土壤颗粒有机碳分布特征和 $\delta^{13}\text{C}$ 值组成[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 2031-2036.
- [31] 王晶,解宏图,朱平,等. 土壤活性有机质(碳)的内涵和现代分析方法概述[J]. 生态学杂志, 2003, 22(6): 109-112.
- [32] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: A sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35(9): 1231-1243.
- [33] Smith C K, Munson A D, Coyea M R, et al. Nitrogen and phosphorous release from humus and mineral soil under black spruce forests in Central Quebec [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1998, 30(12): 1491-1500.

(上接第 17 页)

[参 考 文 献]

- [1] 张风宝,杨明义. 基于 ^7Be 示踪和细沟沟网分形维数研究坡面土壤侵蚀[J]. 核农学报, 2010, 24(5): 1032-1037.
- [2] 严冬春,王一峰,文安邦,等. 紫色土坡耕地细沟发育的形态演变[J]. 山地学报, 2001, 29(4): 469-473.
- [3] 王贵平,白迎平,贾志军,等. 细沟发育及侵蚀特征初步研究[J]. 中国水土保持, 1988(5): 13-16.
- [4] 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.
- [5] 李水根. 分形[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [6] 姚文艺,李占斌,康玲玲. 黄土高原土壤侵蚀治理的生态环境效应[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [7] 崔灵周,朱永清,李占斌. 基于分形理论和 GIS 的黄土高原流域地貌形态量化及应用研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.