

降雨侵蚀过程中红壤坡耕地地表汇流网络特征

张利超^{1,2}, 刘窑军¹, 李朝霞², 葛佩琳¹, 杨伟³

(1. 江西省水土保持科学研究院 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 南昌 330029;

2. 华中农业大学 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070; 3. 湖北省水利水电科学研究院, 武汉 430070)

摘要:为研究降雨侵蚀过程中南方红壤区坡耕地地表汇流网络特征,应用亚毫米级高精度激光扫描和计算机数字图像处理相结合的方法在野外原位研究了南方几个典型母质发育的红壤模拟降雨条件下坡面汇流网络特征变化过程。结果表明:(1)在降雨侵蚀过程中,汇流密度和径流频度整体呈增加趋势,尤其是在第一场降雨过程中最为明显;(2)在第二、三场降雨侵蚀过程中的变化趋势因土壤性质和雨强的不同而出现差异;(3)在坡面侵蚀研究中,分形维数 D_s 可以较好的区别降雨前后整体汇流网络特征的变化。研究结果对南方红壤区坡耕地降雨侵蚀过程模拟与预测模型的研究、水土流失防治与水土保持规划设计具有一定的参考价值和借鉴意义。

关键词:微地貌;激光扫描;汇流网络;坡面水蚀;分形维数

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)01-0053-08

Characteristics of the Soil Surface Flow Networks on Red Soil Sloping Farmland Under Rainfall Simulation

ZHANG Lichao^{1,2}, LIU Yaojun¹, LI Zhaoxia², GE Peilin¹, YANG Wei³

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention, Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029, China; 2. Key Laboratory of Arable Land

Conservation in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River, ministry of Agriculture, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3. Hubei Water Resources Research Institute, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to measure the features of surface flow networks on red soil sloping farmland under rainfall simulation, the submillimeter level high precision laser scanning and the computer digital image processing methods were used for the in-situ measurement of the surface flow networks on the red soil sloping farmland which weathered from several typical parent materials in the southern China. The results showed that: (1) flow density and runoff frequency increased with the rainfall duration, especially in the first rainfall event; (2) in the second and third rainfall events, the differences of flow density and runoff frequency varied for the different soil properties and rainfall intensity; (3) in the study of slope erosion, the fractal dimension D_s were beneficial in distinguishing the variation of the overall network characteristics before and after rainfall. The results of this study provided the advice on the soil and water conservation of red soil sloping farmland in southern China.

Keywords: microrelief; laser scanning; flow networks; water erosion on slope; fractal dimension

细沟过程是基于过程的径流侵蚀模型的关键部分,如 WEPP 模型^[1]和 EUROSEM 模型^[2],对于细沟网络演变更深入的理解、描述和模拟将有助于增

加我们对坡面尺度侵蚀过程的理解,同时也会增加未来侵蚀模型的预测能力^[3]。但是目前,关于小尺度径流构型的研究较少。关于坡面侵蚀的大多数研究集

收稿日期:2018-04-08

修回日期:2018-05-22

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0505405);国家自然科学基金(41571266);江西省科技支撑计划重大项目(2015ZBBF60009);江西省水利科技计划项目(KT201517;KT201718);江西省青年科学基金项目(20171BAB213021)

第一作者:张利超(1983—),男,黑龙江省佳木斯市人,硕士,高级工程师,研究方向:水土保持科学研究、水土保持规划设计。E-mail:13617005728@163.com

通信作者:李朝霞(1976—),女,湖北丹江口市人,博士,教授,研究方向:土壤侵蚀过程及机理、水土保持与农业生态。E-mail:zxli@mail.hzau.edu.cn

中于径流和侵蚀过程,一些被普遍接受的概念,如水流剪切力^[4],或者是径流能量^[5],被有效地用于描述细沟间和细沟侵蚀过程。这些概念的应用大部分时候是在一维状态下,径流模式的空间变化对于径流水动力学的影响并没有被涉及。在细沟间坡面漫流的研究中,径流常常被认为是沿着坡面空间均一分布的^[6]。除了 Zhang 和 Cundy^[7]以及 Wilson 等^[8]的工作以外,关于描述细沟间径流模式以及细沟集中汇流的研究较少见于报道。Wilson 等^[8]详述了在汇流网络条件下描述径流模式的想法。他提出,细沟间水流能与其他径流路径的水流汇集集中,进而形成细沟,因此,细沟间水流能够用这些小的水流路径来表征。依据这个概念,一条细沟被定义为一个特定等级的水流路径。

目前河流网络的研究已经有较长的历史,初步形成了一定的理论基础。一些学者已经通过室内试验证明了河流网络和细沟网络之间的相似性^[8-9],因此采用河流网络的一些方法来描述地表侵蚀过程中的径流模式成为可能。侵蚀过程中地表微地貌的精确测量及量化,对地表侵蚀过程中的径流水文过程模

拟具有重要意义,近年来随着高精度激光扫描和计算机数字图像处理技术在水土保持研究领域的发展,使得该方面研究逐步深化^[10]。本研究以南方红壤为对象,利用激光微地貌扫描等技术手段,结合河流网络的一些理论和方法,研究降雨过程微地貌中汇流网络演变的过程和机理,从而探索径流模式和侵蚀过程之间的相互关系。研究对南方红壤区坡耕地降雨侵蚀过程模拟与预测模型的研究、水土流失防治与水土保持规划设计具有一定的参考价值和借鉴意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于我国南方红壤区中心区域,113°32′—114°58′E,29°02′—30°19′N,地形为平缓丘陵,属亚热带季风气候,年平均降雨量 1 455.3 mm。土壤类型主要为红壤和水稻土。本研究选取当地常见的坡耕旱地作为试验点,主要种植花生(降雨前割除)。拟选南方红壤区广泛分布的第四纪红黏土和泥质页岩发育的红壤(表 1)进行试验。采用常规分析法测定土壤质地等,具体结果见张利超等^[11]。

表 1 供试土壤基本情况

土壤	试验地点	母质	质地	土壤分类	侵蚀程度	土地利用	耕作年限/a
HS	低丘下坡	泥质页岩	黏壤土	常湿富铁土	中度	常年旱地	20
HQ ₁	低丘上坡	第四纪红黏土	黏土	常湿富铁土	中度	常年旱地	15
HQ ₂	低丘上坡	第四纪红黏土	黏壤土	常湿富铁土	轻度	林改旱地	3

注:HS,HQ 分别表示泥质页岩和第四纪红黏土,下同。

1.2 小区布设与人工模拟降雨

人工模拟降雨试验在野外田间进行,3 个试验点各布设 2 个 2 m×1 m 的平行小区,坡度为 16%。四周使用厚 0.5 cm 竹夹板打入 30 cm 作为隔水墙,以分隔小区内外径流;小区下设集流装置,可定时采集径流样。

降雨前,割除小区内作物,对土壤进行(10 cm 左右)耕翻和耙平。人工模拟降雨采用美国 SPRACO 喷头,喷头距地面 4.75 m,供水压力为 0.08 MPa,雨滴中数直径为 2.40 mm,降雨均匀度为 90%^[12]。降雨条件设计为间歇式,雨强为 60 mm/h^[13]。间隔 24 h 进行 3 场降雨,降雨历时视坡面侵蚀发展阶段和程度而确定,降雨量分别为 48,84,84 mm,总降雨量控制为 216 mm,2 次重复。

1.3 汇流网络特征

每次降雨结束后,采用美国 PLS 型瞬时剖面激光微地貌扫描仪^[14]进行地表微地貌扫描,其基于三角测量原理测量地表微地貌高程,定位精度和高程精度为 0.5 mm。激光扫描数据集通过二值化处理进行初

步筛选,保留高于预定阈值的像素值,经空间三维正射纠正后,将校准的规则栅格文件转化成 img 格式图像^[15]。然后通过无洼地 DEM 生成、水流方向提取和汇流累积量计算提取土表薄层水流的汇流网络^[16-17]。

为便于分析径流特征,本研究采用 Strahler^[18]河流分级法对汇流网络进行分级。该法定义从河源出发的河流为 1 级河流;同级的两条河流交汇形成的河流的级比原来增加 1 级;不同级的两条河流交汇形成的河流的级等于两者中较高者。

汇流密度是指单位面积上径流路径的总长度,径流频度表示单位面积上径流路径的总数量。两者从不同角度表征了汇流网络中径流排水的有效性,反映了径流的集中与分散程度。汇流密度、径流频度越大,表明汇流网络越发达,径流集中程度越低。

2 结果与分析

2.1 径流路径特征

图 1—3 是试验过程中汇流网络径流路径特征图,显示了在连续降雨过程中汇流网络的演变特征。

所有汇流网络的最大等级为 5 级。虽然试验结果表现出一定变异性,但是仍然能看出一定的趋势:在降雨初期,径流走向随机性较大,随着降雨过程,径流路径逐渐调整向下坡发展。随着连续降雨的进行,一条或两条主要径流路径不断发展,大部分主要径流路径的位置和形态在第一场降雨 48 mm 后已初步确定,其在后来的降雨过程中不断加宽,并且向坡上方向延

伸。同时,在降雨过程中,各级径流路径变得越来越有组织,有规律的交汇向主要径流路径。此外,随着降雨的进行,汇流网络各级径流路径的连通性增加,由于第 1,2 级径流路径总数目和长度的增加,单位面积上径流路径数量和长度呈增加趋势,这些变化在第一场雨过程中最为明显,为了进行量化研究,本文采用汇流密度与径流频度进行分析。

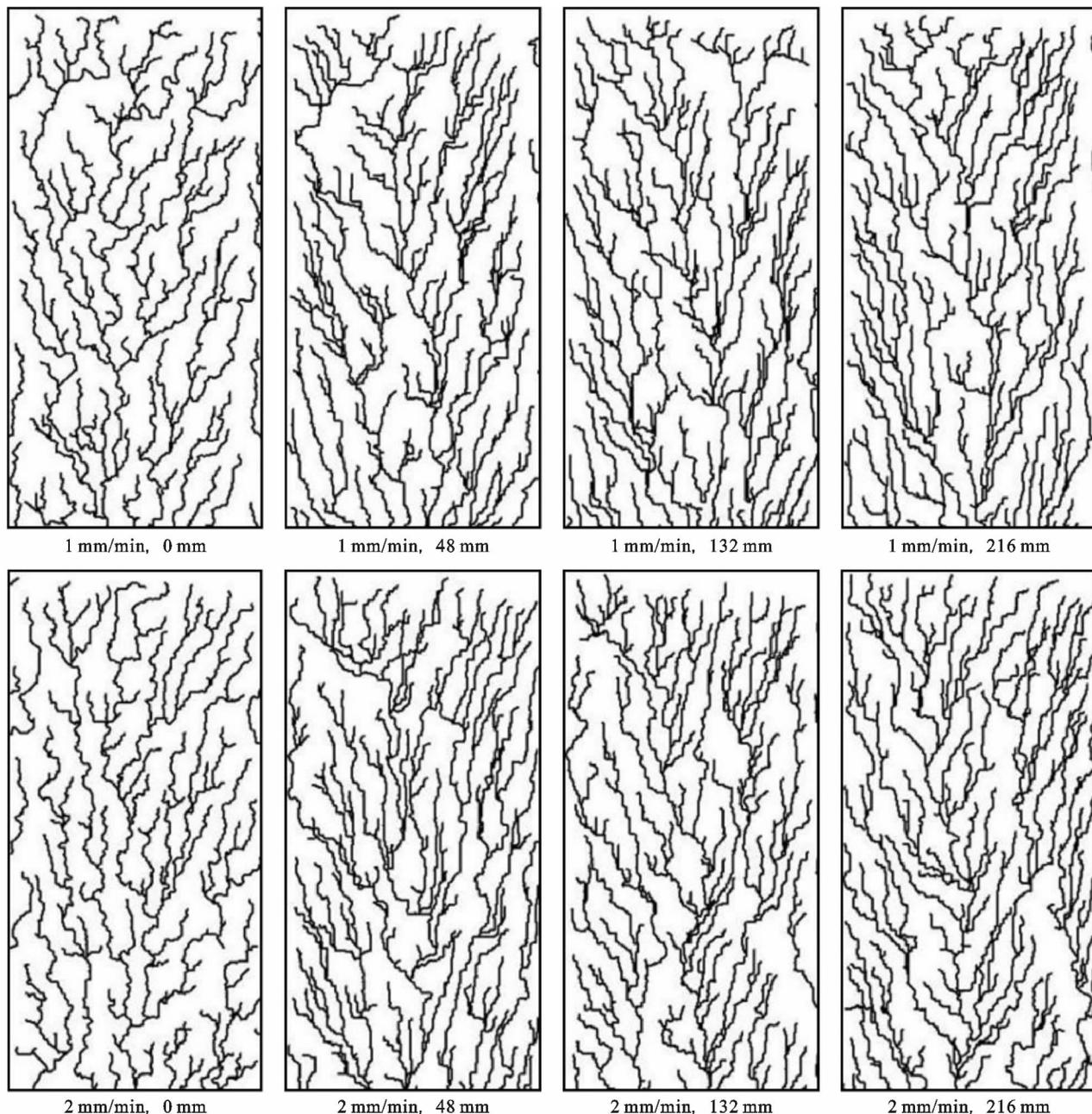


图 1 由 DEM 获得的 HS 土壤表面汇流网络演变

2.2 汇流密度和径流频度变化分析

在连续降雨过程中,汇流密度和径流频度整体呈增加趋势,尤其是在第一场降雨过程中最为明显(图 4)。原因可能是由于在连续降雨过程中,汇流网络的发展导致第 1,2 级径流总数目和长度的增加,而这一

增加在第一场降雨过程中最为明显。第一场降雨过程中,在初始覆盖着土块和团聚体的土壤表面区域,发生了径流分歧,在雨滴打击作用下土块和团聚体的破碎使地表糙度快速降低,土表越来越光滑,促进了低等级径流的发展。

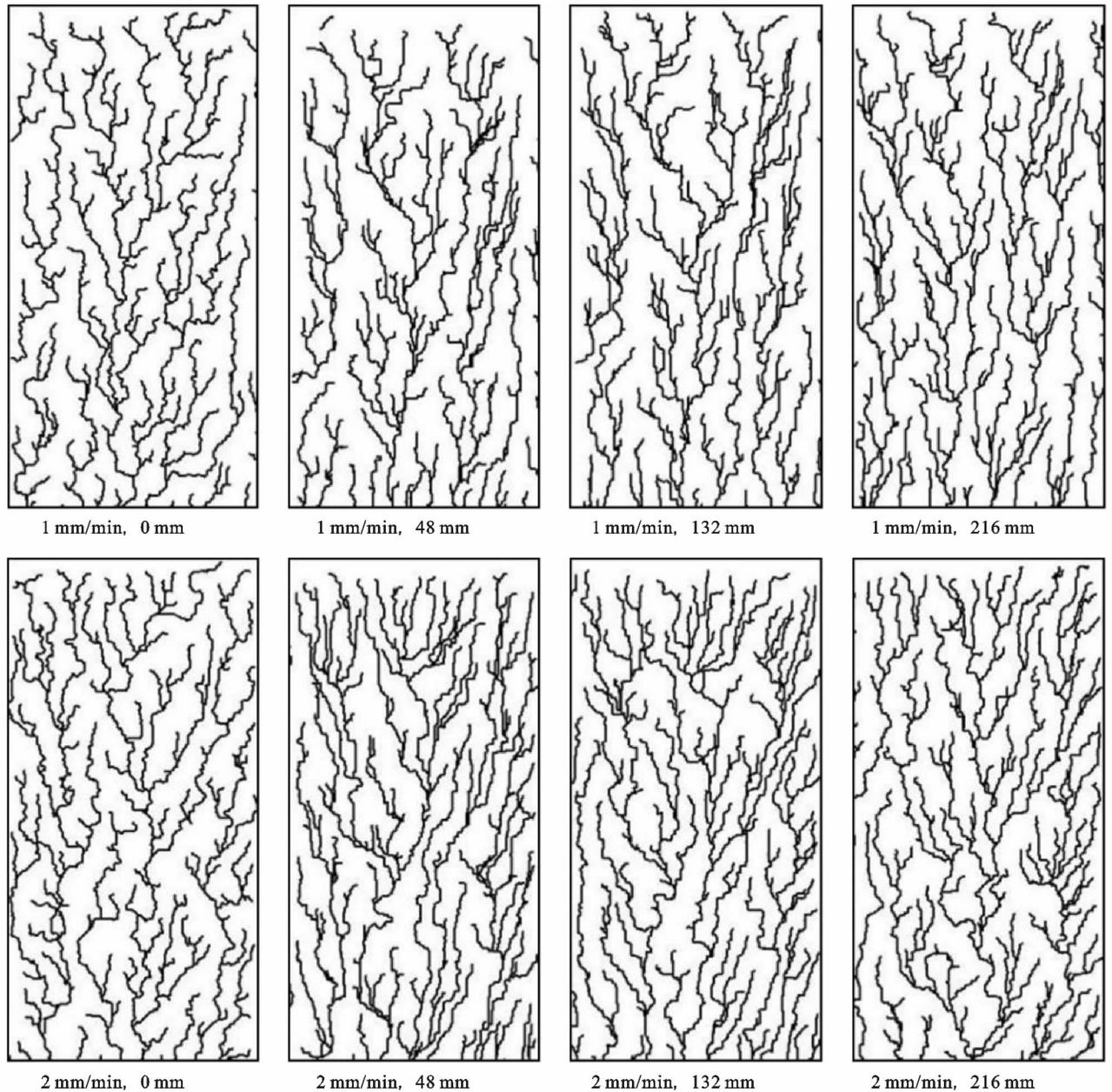


图 2 由 DEM 获得的 HQ_1 土壤表面汇流网络演变

在 1 mm/min 雨强下, 汇流密度一直保持增加趋势, 在第二、三场雨过程中增幅减小, 原因为第 1, 2 级径流数目和长度的增幅减小。2 mm/min 雨强下, 汇流密度呈现先增加后降低趋势。在第二、三场降雨过程中, 第 1, 2 级径流数目和长度的减少是造成这个现象的主要原因。对比 HS, HQ_1 , HQ_2 , 汇流密度的增幅 $HQ_2 > HS > HQ_1$ 。在连续降雨过程中, HQ_1 土表结皮更容易被破坏, 形成局部径流集中, 然后在径流的连续冲刷作用下形成细沟, 随着细沟逐渐的加深拓宽, 导致更高层次的径流集中, 使汇流密度维持在一个较低的水平。HS 在连续降雨作用下形成较为稳定的结皮层, 形成的细沟较少, 由细沟引起的径流集中程度也较低, 因此一直保持着较高的汇流密度。而 HQ_2 的团聚体稳定性较高,

土表结构破坏程度较低, 特别是在 1 mm/min 雨强下基本未见细沟产生, 导致坡面径流分布较分散, 集中程度较低, 汇流密度维持一个较高水平。但在 2 mm/min 雨强下后面阶段的降雨过程中, 由于土表局部区域产生细沟, 导致汇流密度有所降低。

径流频度的变化特点与汇流密度有所不同。由于 HS 很快形成了较为稳定的结皮层, 且面积较大, 径流贡献面积迅速增加, 同时形成的细沟较少, 所以 HS 的径流频度增幅最大, 在第一场降雨过程快速增大后, 在第二、三场雨过程中, 也有所上升。 HQ_2 在 1 mm/min 雨强下土表结构破坏程度较低, 基本未见细沟产生, 结皮在部分土表区域缓慢发育, 贡献于径流的区域面积较小, 径流路径较为稳定, 因此径流频度

增幅最小,保持在一个较低水平。第三场雨后径流频度略微下降,可能是由于土表部分结皮的破坏。但在 2 mm/min 雨强下,第二和三场雨过程中 HQ_2 径流频度明显下降,原因是在大雨强作用下,强大的雨滴动能分散土壤团聚体,再加上其表土较为松散,在较大的径流冲刷下容易被搬运,在局部形成了细沟,导

致局部汇流集中。 HQ_1 在 1 mm/min 雨强下的第三场雨以及 2 mm/min 雨强下的第二场雨过程中径流频度下降幅度较大,原因是此时土表结皮被破坏,细沟发育明显,形成高程度径流集中,使多条低等级径流合并,或者合并入更高等级的径流中,导致径流频度下降到一个较低水平。

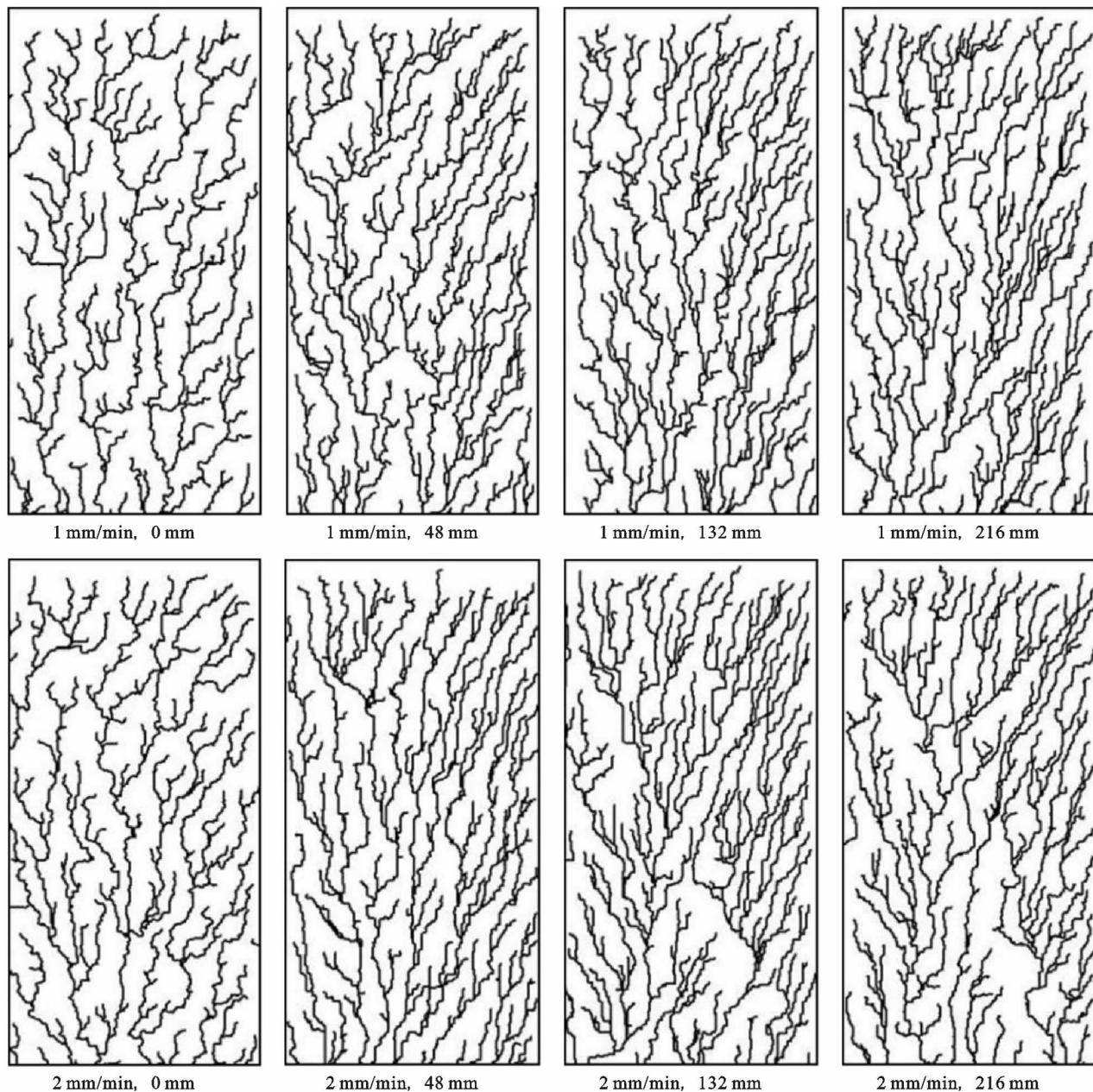


图 3 由 DEM 获得的 HQ_2 土壤表面汇流网络演变

2.3 降雨过程中汇流网络分形特征分析

汇流网络的分形维数用来描述网络的组织度。根据 Tarboton 等^[19],应用 Richardson 方法,先得到汇流长度相对于网络尺度 r 的对数曲线图,然后用公式计算得到分数维 D_R 。如图 5 所示,对于小的网络尺度 r ,曲线斜率较小,对应的分数维是 D_{R1} ,对于大的网络尺度 r ,曲线斜率较大,对应的分数

维是 D_{R2} 。 D_{R1} 对应单个径流的弯曲性,其值越小,表明径流越弯曲, D_{R2} 对应网络的整体分支特征,其值越大说明网络分支越多。对于所有的汇流网络,单个径流产生的分数维 D_{R1} 范围是 1.074~1.114,整个网络的分数维 D_{R2} 范围是 1.755~1.788。这与 Helming 等^[20]所得到的结果相近。通过表 3 可以看出,一方面, D_{R2} 一直处于较高水平,表明汇流网络整体上具有较高

的组织度。另一方面,对于所有的网络,甚至是初始未降雨的土表状态,具有类似的分形特征,均为达到显著差异由于降雨导致的变化是很小的。因此, D_{R2} 不太适合用于描述降雨前后汇流网络整体分形特征的变化,这

与 Helming 等^[20]得到的结果相似。由表 2 可知,对于表征单个径流路径弯曲性的 D_{R1} ,与径流路径蜿蜒度所要表达的物理意义基本一致,其变化所反映出来的规律与径流路径蜿蜒度相似,证明了前文得出的结论。

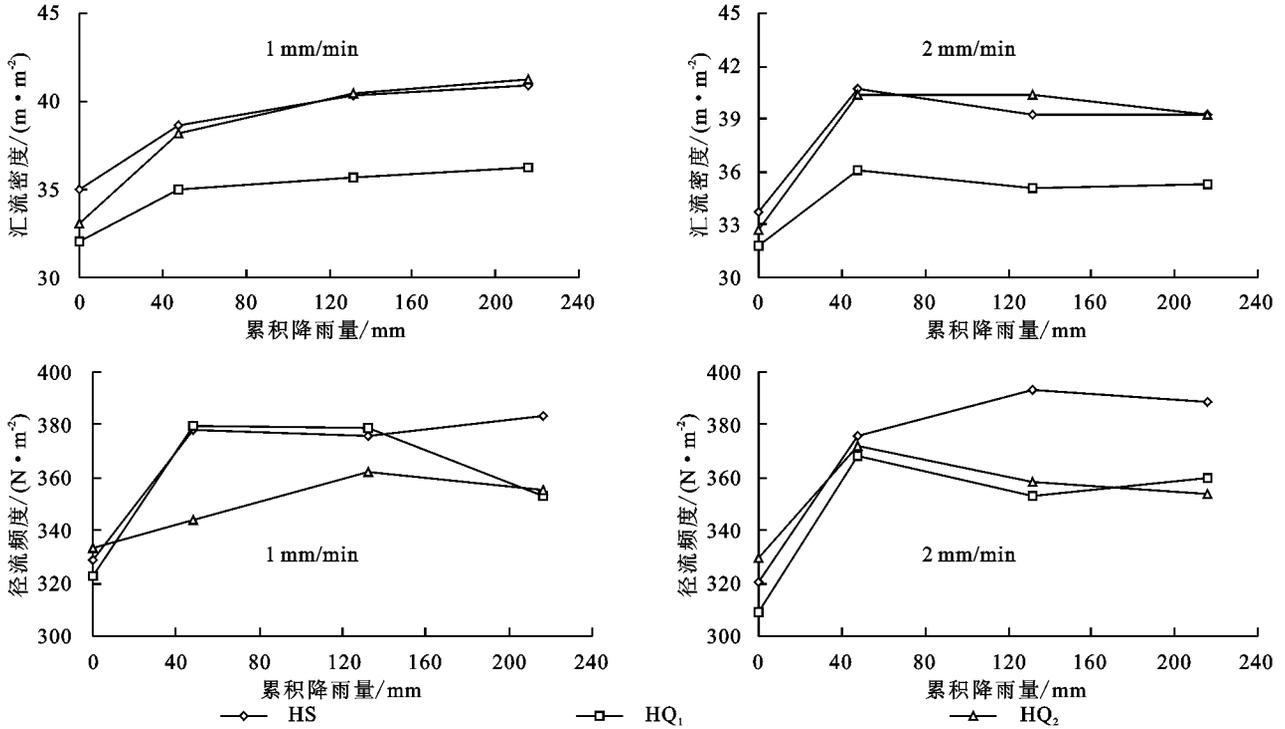
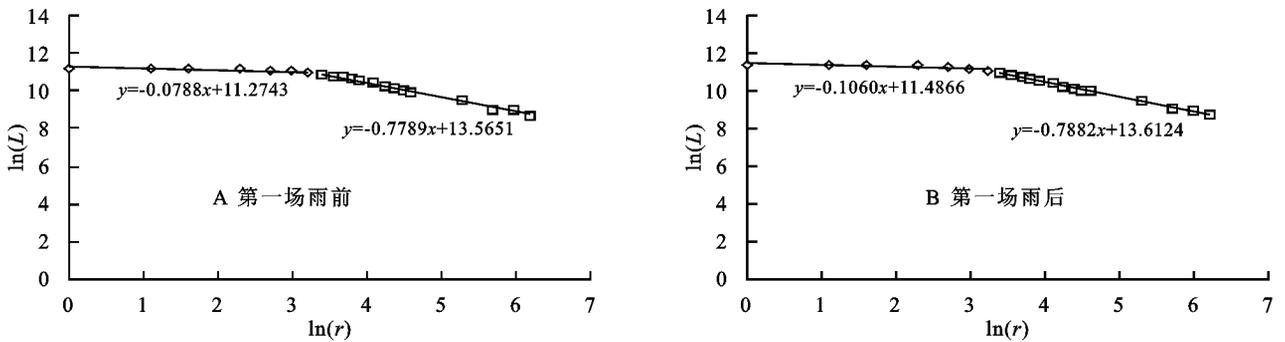


图 4 HS, HQ_1 , HQ_2 随着降雨量累积汇流密度和径流频度的变化



注: L 表示径流路径总长度, r 表示网络尺度。

图 5 应用 Richardson 方法计算 HQ_2 在 1 mm/min 雨强下的分形维数 D_{R1} 和 D_{R2}

表 2 HS, HQ_1 , HQ_2 每一场降雨前后汇流网络分形特征 D_{R1}

土壤	雨强/ ($mm \cdot min^{-1}$)	累积降雨量/mm			
		0	48	132	216
HS	1	1.087a	1.105a	1.110b	1.109b
	2	1.082a	1.114b	1.113b	1.108b
HQ_1	1	1.077a	1.088a	1.096b	1.098b
	2	1.074a	1.095b	1.092b	1.093b
HQ_2	1	1.079a	1.096ab	1.103b	1.106b
	2	1.078a	1.100b	1.106b	1.106b

注: 同一行中字母不同表示达到 $p < 0.05$ 显著差异。

基于霍顿定律的分叉比和流长比,用公式计算分形维数 D_s 。用这个指标可以区别连续降雨后获得的

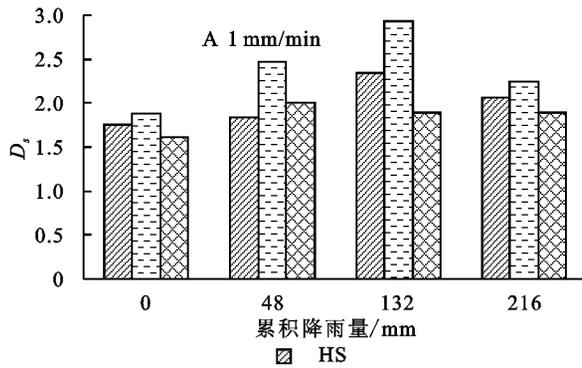
表 3 HS, HQ_1 , HQ_2 每一场降雨前后汇流网络分形特征 D_{R2}

土壤	雨强/ ($mm \cdot min^{-1}$)	累积降雨量/mm			
		0	48	132	216
HS	1	1.760a	1.760a	1.762a	1.769a
	2	1.766a	1.763a	1.760a	1.755a
HQ_1	1	1.768a	1.766a	1.761a	1.761a
	2	1.774a	1.772a	1.767a	1.770a
HQ_2	1	1.779a	1.786a	1.788a	1.788a
	2	1.773a	1.777a	1.779a	1.774a

注: 同一行中字母不同表示达到 $p < 0.05$ 显著差异。

整体网络特征(图 6)。依据网络自组织理论,较高的分形维数表示一个网络的组织度较高^[21]。由图 6 可

知,在 1 mm/min 雨强下, D_s 呈现先增加后降低趋势,在累积降雨量达到 132 mm 或者 48 mm 时达到最大值,随后降低。 D_s 达到最大值时间与径流路径



数目和特征大幅度变化完成时间相对应,而 D_s 随后的降低与低等级径流路径方向性发生较大变化,即调整向高等级径流相对应。

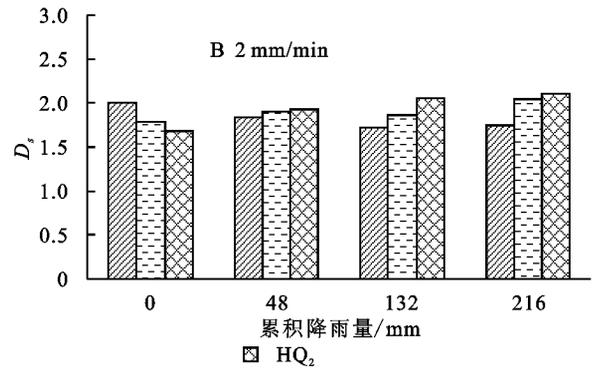


图 6 HS, HQ_1 , HQ_2 每一场降雨前后分形维数 D_s

在 2 mm/min 雨强下,分形维数 D_s 的变化趋势出现较大的变异性,趋势和规律性不太明显,原因可能是由于在大雨强作用下,汇流网络和径流路径特征的变异性加大,难以体现一致的发展规律。对于这种情况有待于以后的深入研究。

3 讨论

对于汇流网络的整体特征,采用汇流密度、径流频度和分形维数进行描述。汇流密度和径流频度从不同角度表征了汇流网络的径流排水有效性。在降雨过程中,汇流密度和径流频度整体呈增加趋势,尤其是在第一场降雨过程中最为明显。在第二、三场雨过程中的变化趋势因土壤性质和雨强的不同而出现差异。通过分析可知,地表糙度与汇流密度、径流频度呈现出较好的相关性。大体趋势上,汇流密度和径流频度随着糙度的增加而降低。分形维数表征了汇流网络的组织度。在坡面侵蚀研究中,分形维数 D_s 可以较好的区别降雨前后整体网络特征的变化。在 1 mm/min 雨强下, D_s 呈现先增加后降低趋势,试验结束时接近于 2,说明汇流网络此时具有较高的组织度。

4 结论

(1) 汇流网络发展可分为两个阶段。第一阶段,发生在第一场的 48 mm 降雨过程中,在降雨的作用下,土块和团聚体被打击破碎,表面越来越光滑,导致径流路径汇流密度和径流频度的增加。第 1,2 级径流路径大多数在这一阶段快速发展。第二阶段发生在随后的降雨过程中,由于结皮和细沟的发展程度不同,各个处理之间产生一定的差异。从整体来看,3 种红壤的初始汇流网络特征比较相似,在连续降雨的

作用下,试验结束时表现出一定的差异性。

(2) 本研究采用了 3 个分形维数 D_s , D_{R1} 和 D_{R2} 来描述汇流网络特征。分形维数 D_s 可以较好的区别连续降雨前后整体网络的特征,在 1 mm/min 雨强下, D_s 呈现先增加后降低趋势。 D_s 达到最大值时间与径流路径数目和特征大幅度变化完成时间相对应,而 D_s 随后的降低与低等级径流路径方向性发生较大变化,即调整向高等级径流相对应。分数维 D_{R1} , 对应单个径流路径的弯曲性,分数维 D_{R2} 对应网络的整体分支特征。其中 D_{R1} 的变化特征与径流路径蜿蜒度相似, D_{R2} 则一直处于较高水平,且变化不明显,对于汇流网络特征变化的描述不太适合。

参考文献:

- [1] Flanagan D C, Nearing M A. USDA-water erosion prediction project; Hillslope profile and Watershed model documentation [M]. Indiana: West Lafayette, National Soil Erosion Research Laboratory, Usda Ars, 1995:298.
- [2] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The european soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 1998, 23(6):527-544.
- [3] Gómez J A, Darboux F, Nearing M A. Development and evolution of rill networks under simulated rainfall [J]. Water Resources Research, 2003, 39(6):93-94.
- [4] Foster G R, Meyer L D, Onstad C A. An erosion equation derived from basic erosion principles[J]. Transactions of the Asae, 1977, 20(4):678-682.
- [5] Rose C W, Williams J R, Sander G C, et al. A mathematical model of soil erosion and deposition processes; I. theory for a plane land element 1 [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1983, 47(5):991-995.

- [6] Nearing M A. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology[J]. *Trans Asae*, 1989,32(5):1587-1593.
- [7] Zhang W, Cundy T W. Modeling of two - dimensional overland flow[J]. *Water Resources Research*, 2010,25(9):2019-2035.
- [8] Wilson B N. Small-scale link characteristics and applications to erosion modeling[J]. *Trans. Asae.*, 1993,36(6):1671-1770.
- [9] Wilson B N, Storm D E. Fractal analysis of surface drainage networks for small upland areas[J]. *Trans. Asae.*, 1993,36(5):1319-1326.
- [10] 朱良君,张光辉. 地表微地形测量及量化方法研究综述[J]. *中国水土保持科学*, 2013,11(5):114-122.
- [11] 张利超,杨伟,李朝霞,等. 激光微地貌扫描仪测定侵蚀过程中地表糙度[J]. *农业工程学报*, 2014,30(22):155-162.
- [12] Luk S H, Abrahams A D, Parsons A J. A simple rainfall simulator and trickle system for hydro-geomorphic experiment [J]. *Physical Geography*, 1986,7(4):344-356.
- [13] 马仁明,蔡崇法,李朝霞,等. 前期土壤含水率对红壤团聚体稳定性及溅蚀的影响[J]. *农业工程学报*, 2014,30(3):95-103.
- [14] Darboux F, Huang C. An instantaneous-profile laser scanner to measure soil surface microtopography[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003,67(1):92-99.
- [15] 高树静,赵龙山,梁心蓝,等. 人工降雨条件下坡耕地地表糙度的时空变异分布研究[J]. *水土保持研究*, 2010,17(3):12-16,249.
- [16] 李志林,朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003.
- [17] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析试验教程[M]. 北京:科学出版社,2006:429-437.
- [18] Strahler A N. Hypsometric(area-altitude) analysis of erosional topography[J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1952,63(11):1117-1141.
- [19] Tarboton D G, Bras R L, Rodriguez-Iturbe I. The fractal nature of river networks[J]. *Water Resources Research*, 1988,24(8):1317-1322.
- [20] Helming K, Römkens M J M, Prasad S N, et al. Erosional development of small scale drainage networks [J]. *Process Modelling and Landform Evolution*, 1999,78:123-145.
- [21] Rinaldo A, Rodriguez-Iturbe I, Rigon R, et al. minimum energy and fractal structures of drainage networks[J]. *Water Resources Research*, 1992,28(9):2183-2195.

(上接第52页)

- [21] 李卓. 土壤机械组成及容重对水分特征参数影响模拟试验研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [22] 范严伟,赵文举,冀宏. 垂直一维入渗土壤水分分布与入渗特性数值模拟[J]. *兰州理工大学学报*, 2012,38(2):51-55.
- [23] 李红星,樊贵盛. 非饱和土壤有压入渗经验模型研究[J]. *太原理工大学学报*, 2009,40(4):383-387.
- [24] 刘营营,余冬立,刘冬冬,等. 土地利用与土壤容重双因子对土壤水分入渗过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2013,27(5):84-88.
- [25] 韩冰,吴钦孝,李秧秧,等. 黄土丘陵区人工油松林地土壤入渗特征的研究[J]. *防护林科技*, 2004(5):1-3.
- [26] 刘霞,张光灿,李雪蕾,等. 小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与贮水特征[J]. *水土保持学报*, 2004,18(6):1-5.
- [27] 刘洁,李贤伟,纪中华,等. 元谋干热河谷3种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性[J]. *生态学报*, 2011,31(8):2331-2340.
- [28] 刘翔,周宏飞,刘昊,等. 不同类型生物土壤结皮覆盖下风沙土的入渗特征及模拟[J]. *生态学报*, 2016,36(18):5820-5826.