

降雨侵蚀过程中红壤坡耕地地表微地貌演变特征

张利超^{1,2}, 葛佩琳¹, 李朝霞², 刘窑军¹, 喻荣岗¹

(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)

摘 要:以第四纪红黏土母质红壤和泥质页岩母质红壤等典型南方红壤为例,选取典型红壤坡耕地的野外原位试验小区,控制土表相同初始条件,分别在两种雨强下进行连续三场降雨,同时采用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,研究了在降雨侵蚀过程中红壤坡耕地地表微地貌的演变特征,探讨了地表糙度、洼地蓄积量相关规律。结果表明:(1) 连续降雨的进行,雨滴打击和径流搬运的联合作用导致地表糙度降低。第一场降雨带来糙度的迅速下降,第二、三场降雨对糙度的影响较小。在 2 mm/min 雨强下,第二、三场降雨过程中,3 种红壤糙度都有不同程度的少量提高,结皮倾向于降低糙度,细沟倾向于提高糙度,地表糙度的变化取决于两者之间的平衡。糙度下降幅度表现为坡上部>坡中部>坡下部、团聚体水稳性低的土壤>团聚体水稳性高的土壤;(2) 洼地蓄积量在连续降雨过程中总体呈下降趋势。在 1 mm/min 雨强下,红壤团聚体和结皮越稳定,洼地蓄积量下降幅度越小。在 2 mm/min 雨强下,雨强是影响洼地蓄积量变化的主导因素,不同红壤的差异不明显;(3) 洼地蓄积量与地表糙度之间呈线性关系,所有处理的 R^2 均达到了 0.9 以上。1 mm/min 雨强下洼地蓄积量对地表糙度的敏感性比 2 mm/min 雨强大。对南方红壤区坡耕地坡面水蚀过程地表微地貌研究、红壤区坡耕地水土流失防治与水土保持规划设计具有一定的借鉴意义。

关键词:水土保持; 微地貌; 激光扫描; 糙度; 红壤

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)06-0015-07

Characteristics of Soil Micro-relief of the Red Soil Sloping Farmland Under Rainfall Erosion

ZHANG Lichao^{1,2}, GE Peilin¹, LI Zhaoxia², LIU Yaojun¹, YU Ronggang¹

(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, Middle and Lower

Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The red soil sloping farmland weathered from Quaternary red clay and shale was selected for the field rainfall simulation tests. At the same soil surface condition, the continuous three rainfall simulations were conducted under two rainfall intensities. The soil surface micro-relief characteristics such as soil roughness and depression storage capacity were analyzed by the mm-level high-precision laser scanning and computer digital image processing method. The results show that: (1) the soil surface roughness decreases due to the combined effects of the rainfall detachment and runoff transportation with the rainfall processing; the soil surface roughness decreases sharply during the first rainfall event at the intensity of 1 mm/min, the effects of the following two rainfall events are much slighter; under the rainfall intensity of 2 mm/min, the soil surface roughness increases moderately during the second and third rainfall events on all the three sloping farmlands; soil sealing tends to reduce the roughness, and rills tend to increase roughness, changes in surface roughness depend on the balance between the two factors; the changes of the roughness in different

收稿日期: 2018-04-03

修回日期: 2018-04-20

资助项目: 国家自然科学基金(41571266); 国家重点研发计划项目(2017YFC0505405; 2017YFC0505406); 江西省科技计划重大项目(2015ZBBF60009); 江西省水利科技计划重大项目(KT201517); 江西省水利科技计划项目(KT201522)

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, 湖北省丹江口市人, 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

slope positions are different during continuous rainfall; for the upslope, roughness decreases most, for the midslope, roughness decreases in a certain degree, and the roughness of downslope decreased less; (2) the changes of depression storage capacity are similar to roughness that decreases during continuous rainfall events, especially for the first rainfall; the differences of the depression storage capacity of the tested three sloping farmland are demonstrated by the stability of aggregates and soil crusts; (3) linear correlation is found between depression storage capacity and soil surface roughness, and higher relationship coefficient is found under lower rainfall intensity of 1 mm/min. The results of this study may throw a light on the soil and water conservation of sloping farmlands in southern red soil region in the future.

Keywords: soil and water conservation; micro-relief; laser scanning; roughness; red soils

土壤是人类赖以生存的一种十分重要的自然资源^[1]。但是,严重的水土流失带来诸多负面问题,联合国已将水土流失列为全球三大环境问题之一^[2]。我国是世界上水土流失最为严重的国家之一,我国南方红壤丘陵区开发利用不合理、强度大,再加上较频繁的降雨,土壤侵蚀不断加剧,已经成为该区域土壤退化的重要形式之一^[3]。南方红壤的水土流失多发生在坡面侵蚀过程,其中土壤结构性状,特别是土壤团聚体的稳定性被认为是主控因素,决定着土壤抵抗分离和泥沙输移的能力^[4-5]。而地表微地貌作为影响坡面侵蚀过程的一个重要因素,其演变与水蚀过程的关系密切。在没有植被的情况下,地表微地貌是影响结皮、径流和土壤侵蚀的一个主要因素,深刻地影响着侵蚀过程中的径流、入渗、结皮、泥沙输移和汇流等^[6-9]。之前国内外研究多关注我国北方土壤,南方红壤富含铁、铝、锰氧化物和黏粒,土壤团聚性质、结构状况和物质组成与粉沙颗粒为主的黄土迥异,坡地表微地貌特点也存在着明显的差异^[3,10]。

坡耕地是水土流失的主要策源地,有关坡耕地水土流失和地表微地貌方面的研究越来越得到重视^[11-15]。本文以 3 种典型的红壤坡耕地为研究对象,采用激光扫描和计算机数字图像处理相结合的方法,研究红壤坡耕地土表微地貌演变特征。此研究有利于丰富地表微地貌演变的研究理论,揭示土壤水蚀的内在规律,对南方红壤区坡耕地坡面水蚀过程中地表微地貌的研究、降雨侵蚀过程模拟与预测模型的研究、红壤区坡耕地水土流失防治与水土保持规划设计具有一定的借鉴意义和参考价值。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区域位于我国南方红壤区中心区域,地跨东经 113°32′—114°58′,北纬 29°02′—30°19′,地形为平缓丘陵,属亚热带季风气候,年平均气温 16.8℃,降雨量 1 455.3 mm 且分布极不均匀,主要集中在春、夏

两季。成土母质以第四纪红色黏土、泥质页岩为主,土壤类型为红壤和红壤性水稻土。水蚀类型为面蚀和沟蚀,以面蚀为主。研究区自然条件及区域持续发展模式在亚热带红壤丘陵区具有广泛的代表性。

1.2 人工模拟降雨设置

人工降雨设备所用的是由加拿大引进的组合顶喷式人工降雨器,采用美国 SPRACO 锥形喷头。由一套 4.75 m 高的单独直立竖管,90 cm 长的一根延伸管,连接在延伸管末端的喷嘴以及使降雨装置稳定的几条拉线构成,通过压力调节系统和阀门来控制雨强和雨滴粒径的分布,使其接近天然降雨。模拟降雨动能约为等雨强天然降雨的 90%,均匀度约 0.9^[16]。按当地气象状况及暴雨频率,通过调节喷头的组合方式,控制雨强为 60 mm/h 和 120 mm/h,用雨量筒控制,供水压力为 0.08 MPa。人工模拟降雨试验在野外田间进行,通过建立原位临时侵蚀小区监测坡面产流、产沙过程,降雨过程中利用雨量筒监测实际雨强,同时通过激光微地貌扫描仪获取土壤表面序列 DEM。

1.3 野外试验小区处理

野外人工模拟降雨试验采用临时径流小区。根据成土母质和土地利用状况选取野外研究点 3 个,其中第四纪红黏土发育红壤 2 个、泥质页岩发育红壤 1 个,坡度均为 16%~18%。降雨前,按当地苗床整地标准,对小区内土壤进行 10 cm 左右耕翻后耙平,手工捡去较大砾石及植物根系。试验小区为 2 m×1 m,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。按当地气象状况及暴雨频率,采用 1 mm/min 和 2 mm/min 两种雨强处理,对于同一径流小区,在同样雨强下,相隔 24 h 连续进行 3 场降雨,降雨量分别为 48 mm,84 mm,84 mm,总降雨量控制为 216 mm,每个处理重复 2 次,实际有效降雨 36 场。供试土壤的类型、土地利用状况、机械组成、团聚体稳定性等基本情况见表 1 和表 2。

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
HS	低丘下坡	泥质页岩	黏壤土	常湿富铁土	中度	常年旱地	20 a
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 a
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 a

表 2 供试土壤基本性质

土壤	MWD	MWD	PAD _{0.25} /	PAD ₅ /	容重/	机械组成/%		
	(湿筛)	(干筛)	%	%	(g·cm ⁻³)	砂粒	粉粒	黏粒
HS	0.39	4.37	66.31	98.16	1.20	37.9	36.7	25.4
HQ ₁	0.40	4.41	83.70	96.34	1.21	15.5	45.4	39.1
HQ ₂	0.89	4.64	51.10	85.82	1.12	11.7	31.8	56.5

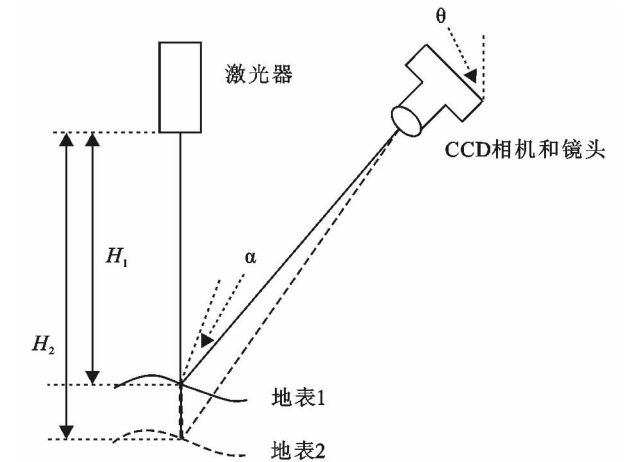
注:MWD为平均质量直径,表示团聚体稳定性;PAD_{0.25}(>0.25 mm)为>0.25 mm的团聚体破坏率;PAD₅(>5 mm)为>5 mm的团聚体破坏率。

1.4 降雨数据采集

记录径流小区坡面产流时间,并从产流开始定时采集径流样,对于 1 mm/min 和 2 mm/min 两种雨强,采样间隔分别为 6 min 和 3 min,同时记录径流体积,过滤后带回室内在 105℃ 烘干称重,烘干法测定泥沙量。

1.5 侵蚀过程中地表微地貌数据获取

1.5.1 激光微地貌扫描仪原理 地表微地貌的测定采用美国进口的瞬时剖面激光微地貌扫描仪,基于三角测量原理测量地表微地貌高程^[17-18]。其利用激光的反射与聚焦成像原理,将地表形态转换成不同物象点位置的电信号,再经计算机处理成数字高程模型^[19]。该仪器通过两个激光器产生一条狭窄的强化激光光线照射到物体表面,反射光线由倾斜摆放的 CCD 相机阵列捕捉(图 1)。校准方程将 CCD 坐标(行和列)转换成空间坐标(X 和 Z),并产生沿单条激光光线的瞬间地物高度变化。随着激光器沿轨道的自动移动,捕捉地物的连续相对高程变化^[17-18]。



注:图中 H_1 和 H_2 分别表示地表 1 和地表 2 的相对高程, θ 是 CCD 相机光电转换器角度, α 是激光反射角,A,B 是两高程表面的反射激光聚焦在 CCD 光电转换器的不同位置,高程差可以用公式 $H_2 - H_1 = (A - B) / \sin\theta \sin\alpha$ 定量计算。

图 1 激光微地貌扫描原理图

1.5.2 微地貌特征定量表达

(1) 地表糙度指标。本研究采用的地表糙度指标为格点面元糙度。格点面元指的是在栅格 DEM 的水平投影面上,以 4 个相邻格点(i, j),($i, j+1$),($i+1, j+1$)和($i+1, j$)为顶点的面积范围(i, j 分别为格点的横坐标和纵坐标)。格点面元糙度指的是格点面元所对应的 DEM 上的表面积与其水平投影面积的比,记为 C ^[20]:

$$C_z = S_{\text{表面积}} / S_{\text{投影面积}}$$

当 $C_z = 1$ 时,糙度最小,格点面元的实际表面为水平面。

其中表面积和投影面积的计算方法如下:

表面积的计算:如果是栅格 DEM,则将栅格 DEM 的每个栅格分解为三角形,计算三角形的表面积使用海伦公式:

$$S = \sqrt{P(P - D_1)(P - D_2)(P - D_3)}$$
$$p = (D_1 + D_2 + D_3) / 2$$
$$D = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2} \quad (1 \leq i \leq 3)$$

式中: D_i 表示第 i ($1 \leq i \leq 3$)对三角形两定点之间的表面距离; S 表示三角形的表面积; P 表示三角形周长的一半。整个 DEM 的表面积则是每个三角形表面积的累加。

投影面积的计算:投影面积指的是任意多边形在水平面上的面积。当然可以直接采用海伦公式进行计算,只要将式中的距离改为平面上两点的距离即可。而更简单的方法是根据梯形法则,如果一个多边形由顺序排列的 N 个点(X_i, Y_i)($i = 1, 2, \dots, N$)组成,并且第 N 个点与第 1 个点相同,则水平投影面积计算公式为:

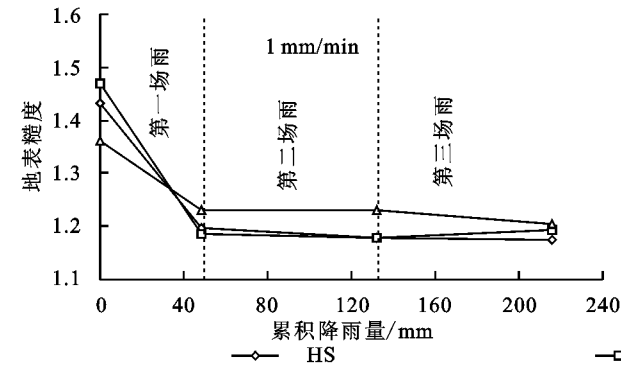
$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N-1} (X_i Y_{i+1} - X_{i+1} Y_i)$$

如果多边形顶点按顺时针方向排列,则计算的面积值为负;反之,为正。

格点面元糙度 C ,国外学者将其称为特殊表面

面积(specific surface area),影响每单位面积上的降雨能量^[8],能用来量化每单位表面面积遭受的实际降雨强度和能量^[21-24],是一个较好的地表糙度指标。

(2) 洼地蓄积量。Jenson 和 Domingue 算法^[25](以下简称为 J & D 算法)是对洼地进行处理应用最为广泛的一种方法,已被地理信息系统软件 ARC/INFO 所采用。J & D 算法的原理是填平后逐步加高,最终使流域内每个栅格水流都能流到流域出口的方法。实现方法为先填洼成平地,然后在平地(生成的和原来存在的)找潜在出口,逐步加高进行流向确定。本文中洼地蓄积量的求算采用的就是 J&D 算



法。先是用 J&D 算法对原始 DEM 进行洼地填充,然后用填充过的 DEM 减去原始 DEM,求均值,最后将该均值与试验区面积相乘,即得到洼地蓄积量。

2 结果与分析

2.1 降雨侵蚀过程中地表糙度变化

2.1.1 整个坡面糙度变化 地表糙度作为对地表形态的一个度量,体现了地表微地貌的起伏程度,可以反映出侵蚀过程中地表微形态结构的变化规律。本文所研究的地表糙度,是与土壤坡面侵蚀关系最为密切的随机糙度和毫米级糙度。

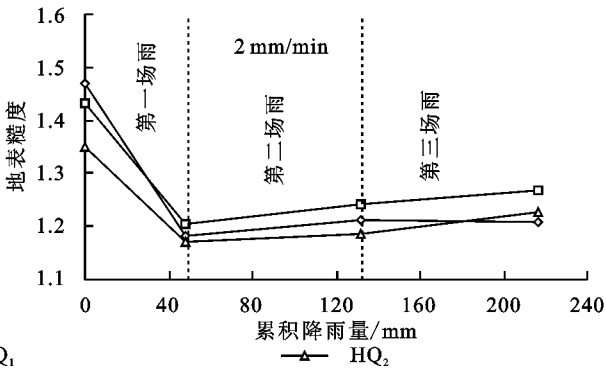


图 2 HS, HQ₁, HQ₂ 两种雨强下糙度变化过程

表 3 HS, HQ₁, HQ₂ 两种雨强下的地表糙度

土壤	雨强/ (mm · min ⁻¹)	累积降雨量/mm			
		0	48	132	216
HS	1	1.43a	1.20b	1.18b	1.17b
	2	1.47a	1.18b	1.21b	1.21b
HQ ₁	1	1.47a	1.18b	1.18b	1.20b
	2	1.43a	1.20b	1.24c	1.27c
HQ ₂	1	1.36a	1.23b	1.23b	1.20b
	2	1.35a	1.17b	1.19b	1.23c

注:同一行中小写字母不同表示达到 $p<0.05$ 显著差异。

在降雨作用过程中,雨滴打击破坏土壤表面的土块和团聚体,径流搬运和冲刷也影响了土块和团聚体的大小和位置,雨滴打击和径流搬运的联合作用结果导致土壤表面总体上高程及高程差异降低,致使土表糙度降低。从图 2 可以看出,连续三场降雨后,3 种红壤糙度有着不同幅度的下降,HS, HQ₁ 糙度下降的幅度大于 HQ₂。1 mm/min 雨强下,HS, HQ₁, HQ₂ 糙度分别下降 18.1%, 18.6% 和 11.5%; 2 mm/min 雨强下,HS, HQ₁, HQ₂ 糙度分别下降 17.8%, 11.5% 和 9.1%。这主要是由于 HQ₂ 红壤中含有较多粒径较大的土壤团聚体以及其本身的水稳性较强,在降雨过程中,HS, HQ₁ 红壤团聚体在侵蚀作用下迅速破碎,并被雨滴打击压实,形成光滑的表面结皮,而 HQ₂ 红壤中的水稳性团聚体在侵蚀过程中,随着降雨能量的累加,逐渐的破碎,破碎形成的

颗粒较大且破碎过程持续时间较长,土壤结皮也是在局部范围内形成的。

由图 2 和表 3 可知,在连续的三场降雨中,第一场降雨对土表微地貌的作用最为明显,对于所有处理均达到显著差异。在第一场降雨后,1 mm/min 雨强下,HS, HQ₁, HQ₂ 糙度分别下降 16.5%, 19.3% 和 9.6%; 2 mm/min 雨强下,HS, HQ₁, HQ₂ 糙度分别下降 19.7%, 15.9% 和 13.4%。通过对土壤表面微形态的观察可知,降雨初期大量土壤团聚体被雨滴打击分散,形成大量分散细颗粒,土表变得越来越密实,然后随着土壤结皮的形成及其面积的提高,土表变得越来越光滑,导致地表糙度快速下降。在第二、三场降雨过程中,对于两种不同的雨强作用,糙度的变化趋势有一定差异。1 mm/min 雨强下,3 种土壤的糙度变化幅度都较小,均未达到显著差异,除了 HQ₁ 的第三场雨糙度稍微有所提高外,其他土壤都稍微有所降低。分析其原因为,随着表土在雨滴打击下的压实封闭以及土壤结皮的逐渐形成,土壤表面微地貌结构趋于稳定状态,虽然 HQ₁ 和 HS 土表部分区域在降雨后半阶段形成了细沟,但因发育程度较弱,其对于糙度的提高作用不明显,此时结皮仍占据主导作用。HQ₁ 在第三场雨后糙度有所上升,通过实地测量可知,其表土抗剪切力较小,再加上其土壤结构不稳定,在降雨和径流冲刷的作用下,其形成的结皮较容易受

到破坏,导致其土表糙度提高。

2 mm/min 雨强下,3 种红壤糙度都有不同程度的提高,除了 HS 的第三场雨,这也导致 2 mm/min 雨强下最后的糙度下降幅度小于 1 mm/min 雨强。主要原因可能是由于在更高的降雨强度下,单位面积上土表结皮遭受的雨滴打击和径流冲刷能量更大,受到的破坏也较为严重。同时,通过对土表形态的动态观察可知,2 mm/min 雨强下,3 种红壤在第二、三场雨过程中不同程度地形成了明显细沟,提高了土表糙度,其作用大于结皮对于糙度的降低作用。HS 在第三场雨过程中糙度基本不变,原因可能是由于 HS 在持续降雨作用下形成面积较大且较为紧实的结皮层,由于其表面抗剪切力较大,导致结皮受破坏的程度较低,细沟对糙度的提高作用与结皮对糙度的降低作用大致相当,因此土表糙度变化不大。综上所述,结皮倾向于降低糙度,细沟倾向于提高糙度,糙度提高与否在于两者之间的平衡。

2.1.2 不同坡位糙度变化 图 3 反映了 HS, HQ₁, HQ₂ 这 3 种红壤在 1 mm/min 和 2 mm/min 雨强下不同坡位地表糙度的变化。由图可知,连续降雨导致供试土壤不同坡位糙度总体呈下降趋势,但不同坡位的变化趋势不尽相同。例如 HQ₁ 在 1 mm/min 雨强下,三场降雨后坡上部糙度比初始糙度(雨前)下降了 20.0%,坡中部下降了 18.1%,坡下部下降了 17.6%。HS 在 2 mm/min 雨强下,三场降雨后坡上部、中部、下

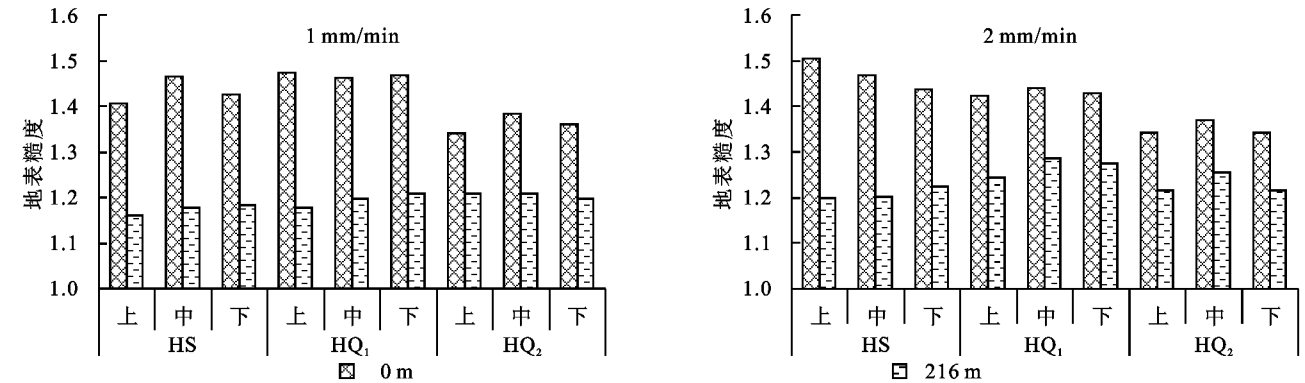


图 3 HS, HQ₁, HQ₂ 两种雨强下不同坡位糙度变化过程

2.2 洼地蓄积量变化

洼地蓄积量的产生,是由于粗糙地表存在一定的高低起伏,在低洼处能产生一定的蓄水作用,因此洼地蓄积量与地表糙度有着十分紧密的联系,导致它们在连续降雨过程中的变化趋势比较相似(表 4)。从表 4 中可以看出,在连续三场降雨过程中,3 种红壤的洼地蓄积量总体呈下降趋势,尤其是在第一场降雨的 48 mm 后,下降最为明显。对于所有处理,第一场雨前和雨后土表洼地蓄积量之间的差异均达到显著。对于随后的第二、三场雨,在 1 mm/min 雨强下,洼地蓄积

量变化不大,维持在一个较低的水平。其中 HQ₂ 的洼地蓄积量在第三场降雨中有所下降,与雨前的差异显著,这与其糙度的变化趋势一致。原因为 HQ₂ 的团聚体比较稳定,随着降雨的进行,逐渐的破碎,持续时间较长,第三场降雨过程中在局部范围内形成了新的结皮,降低了土表水蓄积能力。在 2 mm/min 雨强下,洼地蓄积量普遍提高,尤其是 HQ₁ 更为显著,这与其糙度的变化趋势相符,原因同样是土表结皮受到破坏,细沟高度发展,形成局部临时洼地,产生一定的蓄水效应。对比 3 种红壤 HS, HQ₁, HQ₂ 发现,在 1

mm/min 雨强下, HQ_2 的下降幅度和速度最小, 其次是 HS, 变化最大的是 HQ_1 。这与它们的团聚体稳定性大小、土表结皮与细沟发育程度有关。但在 2 mm/min 雨强下, 3 种红壤的变化趋势差异不明显, 可能是由于在大雨强作用下, 团聚体稳定性不再起主导作用, 雨强是影响洼地蓄积量变化的主导因素。

表 4 HS, HQ_1 , HQ_2 两种雨强下的洼地蓄积量

土壤	雨强/ (mm · min ⁻¹)	累积降雨量/mm			
		0	48	132	216
HS	1	203.2 a	53.4 b	45.0 b	43.8 b
	2	228.6 a	48.6 b	54.0 b	50.6 b
HQ_1	1	292.0 a	42.2 b	41.0 b	46.0 b
	2	239.6 a	48.4 b	63.4 c	73.4 d
HQ_2	1	210.2 a	68.2 b	71.6 b	60.2 c
	2	201.0 a	47.6 b	50.6 b	65.0 c

注: 洼地蓄积量的单位是 cm³, 同一行中字母不同表示达到 $p<0.05$ 显著差异。

2.3 地表糙度与洼地蓄积量关系

如图 4 所示, 地表糙度与洼地蓄积量之间有着很好的相关性, R^2 均达到了 0.9 以上。从图 4 中可以看出, 不论在 1 mm/min 还是在 2 mm/min 雨强下, 也不论对于哪一种红壤, 地表糙度与洼地蓄积量之间都存在着十分紧密的联系。1 mm/min 雨强下, 两者之间呈线性关系, 关系式为 $y=798.62x-902.25$, R^2 达到 0.9636; 2mm/min 雨强下两者之间的关系式为 $y=737.48x-833.74$, $R^2=0.9363$ 。地表洼地蓄积量与糙度息息相关, 粗糙地表与光滑地表相比, 表面的凹陷较多, 而凹陷处常常是雨水蓄积的地方, 临时性贮水量大, 即地表糙度越大, 洼地蓄积量越大。降雨过程中洼地蓄积量是时刻变化的, 因为地表微地貌、土块及团聚体数目、空间位置与地表径流连通性时刻都在发生变化。从图 4 中的趋势线可以看出, 对于两种雨强, 洼地蓄积量对糙度的敏感性 1 mm/min 大于 2 mm/min。造成这种现象的原因可能是, 在大雨强作用下, 单位面积上, 土块和团聚体遭受更大的雨滴打击能量和径流冲刷力, 较容易被分散和搬运, 分离出来的土粒填充了土表洼地, 降低了洼地蓄积量。

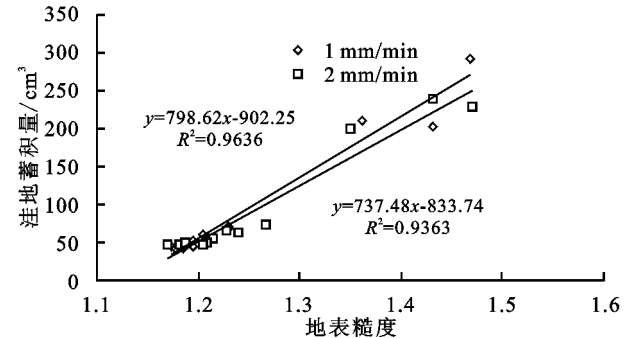


图 4 HS, HQ_1 , HQ_2 两种雨强下地表糙度与洼地蓄积量拟合图

3 结论

(1) 研究表明, 连续降雨的进行, 雨滴打击和径流搬运的联合作用导致地表整个坡面糙度降低。第一场降雨带来整个坡面糙度的迅速下降, 第二、三场降雨影响糙度较小。在 2 mm/min 雨强下, 第二、三场降雨过程中, 3 种红壤糙度都有不同程度的少量提高; 结皮倾向于降低糙度, 细沟倾向于提高糙度。整个坡面糙度下降幅度表现为团聚体水稳性低的土壤>团聚体水稳性高的土壤; 不同坡位糙度下降幅度表现为坡上部>坡中部>坡下部。

(2) 洼地蓄积量在连续降雨过程中总体呈下降趋势。在 1 mm/min 雨强下, 红壤团聚体和结皮越稳定, 洼地蓄积量下降幅度越小。在 2 mm/min 雨强下, 雨强是影响洼地蓄积量变化的主导因素, 不同红壤之间的差异不明显。

(3) 洼地蓄积量与地表糙度之间呈线性关系, 所有处理的 R^2 均达到了 0.9 以上。1 mm/min 雨强下洼地蓄积量对地表糙度的敏感性比 2 mm/min 雨强大。

参考文献:

[1] 中国大百科全书(水利卷)[M]. 北京:中国大百科全书出版社,1983.

[2] 李运学,邓吉华,黄建胜. 水土流失是我国的头号环境问题[J]. 水土保持学报,2002,16(5):105-107.

[3] 赵其国. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控[M]. 北京:科学出版社,2002.

[4] Morgan R P C. Soil Erosion and Conservation[M]. Addison-Wesley Longman, Edinburgh, 1995.

[5] Morgan R P, Quinton C 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 Surf Processes Landforms, 1998,23:527-544.

[6] Cogo N P, Moldenhaver W C, Foster G R. Effect of crop residue, tillage-induced roughness and runoff velocity on size distribution of eroded soil aggregates[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1983,47:1005-1008.

[7] Cogo N P, Moldenhauer W C, Foster G R. Soil loss reductions from conservation tillage practices[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984,48:368-373.

[8] Linden D R, Van Doren D M, Allmaras R R. A model of the effects of tillage-induced soil surface roughness on erosion[C]// ISTRO, 11th Int Conf: Tillage and Traffic in Crop Production, Haren, The Netherlands; International Soil Tillage Research Organization, 1988.

[9] Fox D M, Le Bissonnais Y, Bruand A. The effect of

- ponding depth on infiltration in a crusted surface depression[J]. *Catena*, 1998,32:87-100.
- [10] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [11] 罗键,郑子成,李廷轩,等. 横垄坡面地表微地形多重分形特征及其对侵蚀产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2015,29(4):66-72.
- [12] 王鹏飞,郑子成,张锡洲. 玉米苗期横垄坡面地表糙度的变化及其对细沟侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2015,29(2):30-34.
- [13] 秦凤,郑子成,李廷轩,等. 玉米季坡耕地地表糙度的变化特征及其对土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2013,27(3):18-22.
- [14] 贾莲莲,李占斌,李鹏,等. 降雨过程对地表糙度的影响[J]. *水土保持学报*, 2009,23(5):30-33.
- [15] 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.
- [16] Luk S H, Abrahams A D, Parsons A J. A simple rainfall simulator and trickle system for hydro-geomorphic experiments[J]. *Phys. Geogr.*, 1986,7(4):344-356.
- [17] Darboux F, Davy, Gascuel-Oudoux C, et al. Evolution of soil surface roughness and flowpath connectivity in overland flow experiments[J]. *Caneta*, 2001,46(3):125-139.
- [18] Darboux F, Huang C. Does soil surface roughness increase or decrease water and particle transfers[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005,69:748-756.
- [19] 赵军,雷廷武,张晴雯,等. 激光微地貌扫描仪的开发研制及在坡面侵蚀研究应用初步[J]. *山东农业大学学报*, 2001,32(2):201-206.
- [20] 李志林,朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003.
- [21] Helming K, Roth C H, Wolf R, et al. Characterization of rainfall-microrelief interactions with runoff using parameters derived from digital elevation models (DEMs)[J]. *Soil Technology*, 1993,6:273-286.
- [22] Helming K, Römken 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.
- [23] Römken M J M, Helming K, Prasad S N. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes[J]. *Catena*, 2001,46:103-123.
- [24] Rudolph A, Helming K, Diestel H. Effect of antecedent soil water content and rainfall regime on microrelief changes[J]. *Soil Technology*, 1997,10:69-81.
- [25] Jenson S K, Domingue J O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988,54(11):1593-1600.

~~~~~

(上接第14页)

- [39] 韩鲁艳,郝乾坤,焦菊英. 黄土丘陵沟壑区人工林地的土壤抗蚀性评价[J]. *水土保持通报*, 2009,29(3):159-164.
- [40] Cerd A. Soil erosion after land abandonment in a semi-arid environment of southeastern Spain[J]. *Arid Soil Research & Rehabilitation*, 2009,11(2):163-176.
- [41] Kou M, Jiao J Y, Yin Q L, et al. Successional trajectory over 10-years of vegetation restoration of abandoned slope croplands in the Hill-Gully Region of the Loess Plateau [J]. *Land Degradation & Development*, 2016,27(4):919-932.
- [42] 赵护兵,刘国彬,曹清玉. 黄土丘陵区不同植被类型对水土流失的影响[J]. *水土保持研究*, 2004,11(2):153-155.
- [43] 寇萌,焦菊英,王巧利,等. 黄土丘陵沟壑区不同植被带植物群落的细根分布特征[J]. *农业机械学报*, 2016,47(2):161-171.
- [44] 刘定辉,李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. *水土保持学报*, 2003,17(3):34-37.
- [45] 李勉,姚文艺,李占斌. 黄土高原草本植被水土保持作用研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005,20(1):74-80.
- [46] Gyssels G, Poesen J. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003,28(4):371-384.
- [47] 王秋生. 植被控制土壤侵蚀的数学模型及其应用[J]. *水土保持学报*, 1991,5(4):68-72.
- [48] 罗伟祥,白立强,宋西德,等. 不同覆盖度林地和草地的径流量与冲刷量[J]. *水土保持学报*, 1990,4(1):30-35.
- [49] 余新晓,毕华兴,朱金兆,等. 黄土地区森林植被水土保持作用研究[J]. *植物生态学报*, 1997,21(5):433-440.
- [50] 张光辉,梁一民. 黄土丘陵区人工草地盖度季动态及其水保效益[J]. *水土保持通报*, 1995,15(2):38-43.
- [51] 张岩,袁建平,刘宝元. 土壤侵蚀预报模型中的植被覆盖与管理因子研究进展[J]. *应用生态学报*, 2002,13(8):1033-1036.