

模拟降雨对亚热带阔叶林土壤坡面产沙产流及养分流失的影响

苏付安^{1,3}, 松同清², 王文丽², 王晶³, 唐婷³

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 长沙 410114; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410004; 3. 湖南国地水利水电设计咨询有限公司, 长沙 410007)

摘要: 采用人工降雨方法, 研究了不同降雨强度和坡度对亚热带阔叶林土壤坡面产沙产流及养分流失的影响。结果表明: (1) 在不同降雨强度下, 初始产流时间随坡度的增加趋于提前, 随降雨强度的增大产流时间提前, 降雨强度对初始产流时间的影响大于坡度变化的影响。 (2) 在同一坡度条件下, 产流强度和平均入渗强度随降雨强度的增加而增加; 曲线拟合的结果表明产流强度随时间遵循幂函数变化规律, 而坡面入渗强度随时间呈对数函数变化。 (3) 不同降雨强度下, 径流量随降雨历时的变化趋势基本一致, 径流量均随降雨历时呈“增加—稳定”趋势, 在整个降雨过程中, 径流量随坡度的增加而增加, 相同坡度下, 径流量随着降雨量的增加而增加; 降雨初始时刻, 坡度对径流量的影响较小, 而在降雨后期, 降雨强度和坡度对径流量的影响较大; 产流率与径流量的变化趋势相反, 随降雨历时呈“降低—稳定”趋势, 在整个降雨过程中, 土壤产流率随坡度的增加而降低, 在相同坡度下, 产流率随着降雨量的增加而增加。 (4) 侵蚀泥沙量的变化特征表现为坡度越大, 坡面侵蚀泥沙的流失量越大; 泥沙侵蚀量随降雨历时的增加而增加, 在降雨 10 min 左右达到峰值; 在相同坡度和降雨历时下, 泥沙侵蚀量随降雨强度的增加而增加; 不同坡度下的侵蚀泥沙量在峰值前后与产流历时均呈幂函数变化, 不同坡度下侵蚀泥沙养分含量与产流历时间的关系均可用幂函数表达。 (5) 不同坡度条件下, 泥沙量与侵蚀泥沙中养分的含量均存在不同程度的正相关关系, 其中坡度为 15°, 20° 和 25° 时, 侵蚀泥沙养分含量与泥沙流失量间的相关性明显优于坡度为 5° 和 10° 时, 说明侵蚀泥沙量的增加会引起泥沙中各类养分含量的增加效应, 而不同坡度下的全磷与侵蚀量没有显著的相关关系 ($P > 0.05$)。

关键词: 模拟降雨; 亚热带阔叶林; 产沙产流; 养分流失

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)04-0025-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.04.005

Research on Runoff, Sediment and Nutrients Loss Characteristics on Soil Slope of Subtropical Evergreen Broad-leaved Forest Under Artificial Simulated Rainfall

SU Cunan^{1,3}, SONG Tongqing², WANG Wenli², WANG Jing³, TANG Ting³

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410004; 3. Huan Guodi Water Conservancy and Hydropower Design Consulting Company, Changsha 410007)

Abstract: Simulated rainfall experiments were conducted to investigate the research on soil and sediment yield and nutrients loss characteristics on soil slope of subtropical evergreen broad-leaved forest. The results showed that: (1) The runoff occurring time shortened with the increasing rainfall intensity and slope gradient, and the influence of rainfall intensity on runoff occurring time was greater than that of slope gradient. (2) For the same slope gradient, the runoff intensity and the average infiltration rate increased with the increasing rainfall intensity, and the temporal change of runoff intensity followed a power function and that of the average infiltration rate followed a logarithmic function. (3) The runoff amount first increased and then tended to be stable with the increasing rainfall duration, and increased with the increasing slope gradient. For the same slope gradient, the runoff amount increased with the increasing rainfall amount. Soil slope gradient had less influence on the runoff at rainfall initial moment, and rainfall intensity and slope gradient had the greater

收稿日期: 2016-01-30

资助项目: 湖南省水利厅创新课题项目 (ASX-2014011); 湖南省科技厅课题项目 (2014-0306)

第一作者: 苏付安 (1965—), 男, 湖南平江人, 本科, 副教授, 主要从事水利工程技术和水土保持与防治研究。E-mail: Cunan-su@163.com

influence on the runoff. The runoff-yielding rate showed an opposite temporal variation with the runoff amount, which first decreased and then tended to be stable with the increasing rainfall duration. The runoff-yielding rate decreased with the increasing slope gradient. For the same slope gradient, the runoff amount increased with the increasing rainfall amount. (4) Slope sediment yield increased with the increasing slope gradient, and also increased with the increasing rainfall duration, which reached the maximum in the first 10 min of the rainfall. For the same slope gradient and rainfall duration, sediment yield increased with the increasing rainfall intensity. The slope sediment yield and nutrient loss followed a power function. (5) For different slope gradients, positive correlations existed between slope sediment yield and nutrient loss, and the correlation coefficients on the slopes of 15° , 20° and 25° were much better than on the slopes of 5° and 10° , while the total phosphorus had no correlation with slope sediment yield ($P > 0.05$), which implied that the slope sediment yield could cause the increase of various kinds of nutrients in sediment.

Key words: artificial simulated rainfall; subtropical evergreen broad-leaved forest; runoff and sediment yield; nutrients loss

水土流失是地表物质在径流、降雨、冻融等外力驱动下发生位移和再分配的一种自然过程,主要包括侵蚀、搬运、剥离、沉积等过程^[1-2]。土壤坡面水土流失是土壤表层与降雨和径流相互分散、剥离和搬运的一系列复杂的物理—化学过程,也是大量营养元素流失的过程,受到降雨特性、产流排水率、径流泥沙等因素的影响^[3]。早在 20 世纪初期,国内外对于土壤侵蚀的研究大多局限在降雨过程中产流产沙及其机理等,而忽略了此过程带来的养分流失等一系列问题^[4]。在模拟降雨过程中,坡面水分以入渗和径流的形式运移,水分入渗量超过最大蓄水量时产生径流;与此同时,土壤表层容易受降雨冲刷和侵蚀的影响,进而引发养分流失、生态环境恶化等^[1];另一方面导致土地生产力和土地资源的下降,加之人为活动频繁的干扰,水土流失进一步加剧,引发了各种各样的生态资源与环境问题^[1,3]。因此,防治坡地水土流失、减少土壤养分损失、保护生态环境成为当前中外学者共同关注的问题。

亚热带常绿阔叶林在世界主要植被类型中占据重要位置,我国亚热带常绿阔叶林面积达到 250 万 km^2 ,其物种多样性丰富、林分结构复杂、植被类型多样^[5]。其中亚热带是常绿阔叶林的主要分布区($24^\circ\text{—}32^\circ\text{N}$, $99^\circ\text{—}123^\circ\text{E}$),由于人类的长期干扰,再加上自然因素,森林和植被退化较为严重,生态系统结构和功能遭到了严重破坏^[6]。目前我国常绿阔叶林实际面积不到亚热带区域总面积的 5%,随着土地资源和生态环境的不合理开发与利用,导致该区域水土流失极为严重,土壤侵蚀和养分流失成为该区域土壤退化的最主要表现形式,除了人类干扰之外,降雨成为该区土壤侵蚀和养分流失的主要环境影响因子,频繁的降雨事件导致该区域水土流失较为严重。因

此,本文通过对常绿阔叶林坡面径流、侵蚀泥沙及所携带养分流失规律进行研究,揭示常绿阔叶林土壤养分随地表径流迁移机制,能够发展有效的区域水土养分流失控制方法,为常绿阔叶林生态环境建设、水土保持、土壤侵蚀与防治提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

2014 年 7 月在全面勘查的基础上,在江西九连山国家级自然保护区选择典型常绿阔叶林建立 5 hm^2 ($200\text{ m}\times 200\text{ m}$)永久监测研究基地,样地地理位置为 $24^\circ29'18''\text{—}24^\circ38'55''\text{N}$, $114^\circ22'50''\text{—}114^\circ31'32''\text{E}$,海拔 $648\sim 746\text{ m}$,总面积 $13\,500\text{ hm}^2$ 。保护区属于中低山地貌,地势南高北低,最高海拔约为 $1\,430\text{ m}$,最低海拔约为 280 m ,全区地形坡度为 $5^\circ\sim 40^\circ$ 。受大陆和海洋气候的双重影响,该区域气候温和湿润,干湿季交替明显,年均降水量为 $2\,155.6\text{ mm}$,年均气温约为 $17.4\text{ }^\circ\text{C}$,最冷月为 1 月,平均气温 $6.8\text{ }^\circ\text{C}$,最热月为 7 月,平均气温 $24.4\text{ }^\circ\text{C}$,成土母质复杂多样,境内峰林密集,风力、温湿度变幅小,土壤肥沃湿润,土壤类型为轻砂质中厚层黄壤,土层深厚,坡积母质发育,腐殖质层厚,土壤肥力较高,呈弱酸性。将整个样地划分为 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 的小样方,样地中物种数共有 221 个,主要树种有红钩栲 (*Castanopsis tibetana* Hance.)、米槠 (*Castanopsis carlesii* Hayata.)、罗浮栎 (*Diospyros morrisiana* Hance.)、细枝柃 (*Eurya loquaiana* Dunn.)、罗浮栲 (*Castanopsis fabri* Spach.)、丝栗栲 (*Castanopsis fargesii* Fagaceae.)、木荷 (*Schima superba* Champ.)等,样地内物种胸径总断面积为 $38\text{ m}^2/\text{hm}^2$,平均胸径为 6.5 cm ,稀有种比例较高,占物种数的 40%左右^[5-6]。

1.2 试验装置及设计

2015年5—9月,在试验小区内采用野外人工降雨装置(侧喷式),装置包括供水系统和降雨系统。降雨系统是由几个单一的降雨小支架构成,降雨支架包括喷头支架、侧式喷头和压力控制等,降雨喷头安装并固定在降雨支架上,该系统由4组单喷头组成(保证各个方向均能喷到),喷头高为4 m,最高喷出水的高度为5.5 m,其降雨均匀度和降雨速度近似天然降雨。由压力表控制水压,孔径板调节降雨强度(孔径3~13 mm),可控制雨强为30~165 mm/h,经测试降雨均匀度在80%以上。大量的研究指明短历时、高强度降雨更容易导致土壤流失,并且降雨时间多在1 h左右,本研究在参考前人的基础上设计降雨强度为50,75,100 mm/h,历时1 h,设计5°,10°,15°,20°,25°试验坡度。前期模拟降雨强度为50 mm/h的降雨,直到坡面即将产流,用塑料布覆盖,让水分自由下渗接近土壤自然含水率,这样可保证降雨前期土壤含水率的一致性。每场降雨试验前进行2次测定,误差不超过5%,以确保模拟降雨的强度和均匀度达到试验要求。各场次降雨历时设定为60 min。模拟降雨开始后,记录产流时间,同时观察和记录坡面土壤侵蚀过程。当土壤坡面产流后,每隔5 min取浑水径流样,取样时间为1 min。降雨试验结束后,烘干法测定泥沙重,计算坡面由降雨转化为径流的水量^[7]。

径流量:称量每个桶的径流泥沙总量,放置澄清后倒掉上部清液,待水分蒸发完全测定泥沙量,径流泥沙总量减去泥沙重即为径流量。

泥沙量的测定:降雨开始后计时,同时记录初始产流时间,然后用塑料桶收集径流;降雨结束记录降雨历时。

初始产流时间:从模拟降雨开始到径流出现所经历的时间。

径流和泥沙样品采集:桶内径流澄清后,采集泥沙风干样。径流样上清液过滤后,放入冰箱中低温保存(2~3℃)。

根据水量平衡学原理,将坡面降水量转化为入渗、蒸发和径流3个过程,径流量和入渗量之和近似等于坡面降雨量,其中坡面平均入渗强度计算公式为^[7-8]:

$$I = (P_i \cos \alpha - 10 R/S)/t$$

式中: P_i 为降雨强度(mm/min); I 为坡面平均入渗强度(mm/min); α 为地表坡度(°); S 为坡面实际承雨面积(cm^2); R 为降雨时间 t 内产生的径流量(ml); T 为降雨时间(min)。

1.3 样品测定

每个小区收集的泥沙运回实验室,风干后除去肉眼可见的碎石、植物残体等杂质,自然风干(20 d),去

除碎片和部分根后过2 mm筛,测定土壤养分。有机质含量采用重铬酸钾氧化外加热法测定;全氮含量采用凯氏定氮法测定;全磷含量采用NaOH熔融—钼锑抗比色法测定;全钾含量采用火焰分光光度法^[7]测定。

Excel 2003 进行数据处理与分析,SPSS 18.0 分析软件进行回归分析和统计检验。

2 结果与分析

2.1 降雨强度和坡度对初始产流时间的影响

降雨过程中产生径流与起始产流时间密切相关,在降雨前期土壤含水率、降雨强度等环境要素一致的情况下,坡度对初始产流时间具有较大的影响作用^[7]。由图1可以看出,在各降雨强度下,初始产流时间随坡度的增加而趋于提前,50 mm/h雨强下初始产流时间变化范围3.15~5.36 min;75 mm/h雨强下初始产流时间变化范围1.58~3.21 min;100 mm/h雨强下初始产流时间变化范围0.23~1.56 min;在相同坡度下,随降雨强度的增大,产流时间趋于提前,说明了产流时间随坡度的增加而缩短。降雨时间极差值在0.93~2.58 min之间,相比较而言,相同坡度下,100 mm/h降雨强度坡面产流时间最短,但各坡度间的产流时刻值相差较大,100 mm/h降雨强度下坡面产流所需时间极差值为1.33 min;75,50 mm/h雨强下极差值分别为2.21,1.63 min。模拟降雨条件下初始产流时间随坡度的增大而趋于提前,这是由于在保证土壤前期含水量和土壤母质等相同的情况下,坡度越大,水分下渗机会越小,降水径流沿坡面的运动速度加快,导致水分在土壤坡面迅速聚集,初始产流时间整体提前,这与王辉等^[9]的研究结果相似。

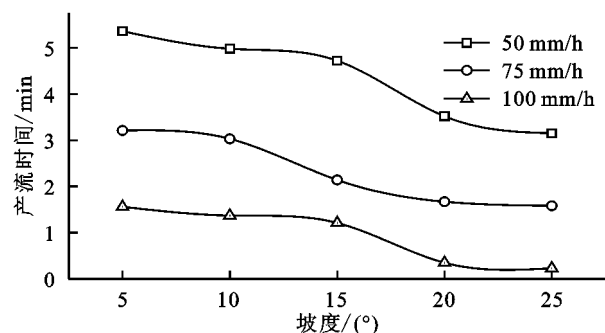
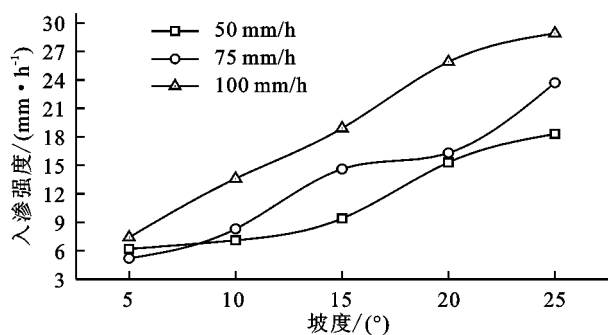


图1 降雨强度和坡度对初始产流时间的影响

2.2 模拟降雨对土壤坡面产流的影响

2.2.1 产流强度和坡面入渗强度对坡度的响应 研究发现,在土壤坡面产流一段时间后其产流量和入渗均趋于稳定,由此对该时刻起至降雨过程结束的入渗强度和产流强度求平均值。从图2可知,在降雨初始,土壤坡面具有较大的入渗强度,随着降雨的持续进行,土壤坡面入渗强度逐渐减小并趋于稳定,坡面产流强度随雨强增大以近于等距的趋势增加,不同坡度条件下产流强度增加趋势基本一致。在不同降雨

条件下,产流强度随坡度的增加逐渐减小,50 mm/h 降雨强度下产流强度变化范围 23.7~45.3 mm/h; 75 mm/h 降雨强度下产流强度变化范围 31.7~65.4 mm/h;100 mm/h 降雨强度下产流强度变化范围 33.4~95.2 mm/h。以上过程产生的原因可能与降雨过程中土壤结皮的形成有关:在降雨初期,土壤坡面不易受到侵蚀作用,而水分的入渗能力较强,随着降雨的持续发生和进行,土壤颗粒经过一系列的分散和压实后容易形成物理性结皮;之后土壤颗粒与径流之间具有充分的作用时间,细小的土壤颗粒更容易入渗到土壤下层,进一步形成沉积性结皮,这两个过程促进了土壤结皮的形成和发育,从而降低了土壤入渗强度^[6,9]。此外,坡面径流在降雨强度、地表覆盖、土壤前期含水



率等环境要素基本一致的条件下,地表坡度决定了承雨量大小,同时在降雨过程中也受到坡面水流入渗、雨滴能量和坡面侵蚀状况等因素的影响^[6,9]。

坡度对坡面平均入渗强度的影响表现为随坡度的增加而增加。坡度为 25°时,坡面平均入渗强度最大,为 18.3~28.9 mm/h,坡度为 20°,15°,10°和 5°时的平均入渗强度变化区间分别为 15.3~25.9,9.4~18.9,7.1~13.6,6.2~7.4 mm/h,坡度越小,其平均入渗强度差值越小,这主要是由于坡度的增大导致径流在重力方向的分力增大,缩短了降雨与坡面的作用时间,使得降雨入渗机会减小,而 15°与 25°坡面平均入渗强度曲线接近,可能是因为在 15°和 25°间存在临界坡度的关系。

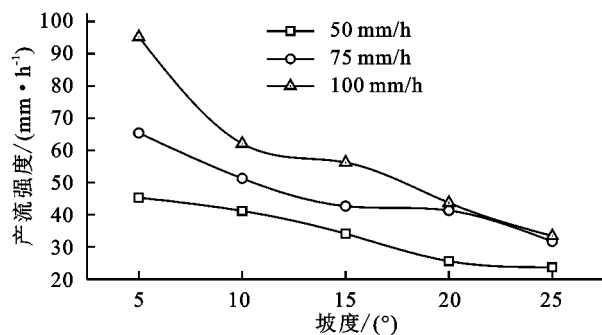


图 2 产流强度和坡面入渗强度对坡度的响应

2.2.2 模拟降雨对产流过程的影响 从图 3 可以看出,不同坡度下径流量均随降雨历时呈“增加—稳定”的趋势,在整个降雨过程中,径流量随坡度的增加呈逐渐增加趋势;在相同坡度下,径流量随降雨量的增加逐渐增加趋势;在不同降雨强度下的径流量变化趋势基本保持一致,在 0~10 min 内,径流量随降雨历时的增加陡然上升趋势,并且在 0~10 min 内的径流量差异并不大,也即在降雨初始时刻,径流量受坡度的影响较小,而在降雨后期,径流量受降雨强度和坡度的影响较大;10 min 后,径流量随降雨历时的增加呈基本平稳趋势。土壤产流率与径流量的变化趋势相反,随降雨历时呈“降低—稳定”趋势,并且在整个降雨过程中,土壤产流率随坡度的增大呈逐渐减小趋势,在相同坡度下,径流量随着降雨量的增加而增加;不同降雨强度土壤产流率的变化趋势基本一致,在 0~10 min 内,径流量随降雨历时的增加陡然下降,并且在 0~10 min 内的土壤产流率差异并不大,也即降雨初始时刻,坡度对土壤产流率的影响比较小,而在降雨后期,降雨强度和坡度对土壤产流率的影响较大;10 min 后土壤产流率随降雨历时的呈现出基本平稳的变化趋势。

2.2.3 模拟降雨产流强度和入渗强度与降雨历时的关系 通过 SPSS 曲线拟合,对土壤坡面产流强度和坡面入渗强度随时间的变化关系作函数拟合(表 1),筛选出 R^2 最大(最佳拟合度及调整 R^2)和 P 值最小

的曲线组合,并在此基础上检验其 F 值和差异显著性($P<0.01$),结果发现产流强度遵循幂函数变化规律,而坡面入渗强度随降雨历时呈对数函数变化。

2.3 模拟降雨对土壤侵蚀量的影响

土壤颗粒随径流的迁移和损失等过程是坡面侵蚀的主要表现方式,侵蚀泥沙量受到降雨特性、土壤坡面、地形因子等综合影响,由于土壤坡面所承载的降雨侵蚀具有较大的可塑性,因此,本研究中侵蚀泥沙量随降雨历时呈现出非线性的变化趋势^[10]。从图 4 可以看出,对于 50 mm/h 降雨强下,坡度越大,侵蚀量越大;泥沙侵蚀量随降雨历时的增加而增加,当坡度为 10°,15°,20°和 25°时,泥沙侵蚀量随降雨历时呈先增加后降低的单峰曲线变化趋势,在降雨 10 min 前后达到最大值,降雨 10 min 后,泥沙侵蚀量随降雨历时趋于平稳;在相同坡度下,泥沙侵蚀量随降雨强度的增加而增加。综合分析可知,在降雨强度、土壤前期含水率、地表覆盖等环境要素基本一致的条件下,随着坡度的增大,水分入渗能力降低,径流对土壤颗粒的侵蚀力、冲刷力和土壤颗粒的携带力增强,因此当坡度增大时,径流中泥沙含量峰值表现为增大的趋势,产生峰值时间较早(峰值均在 10 min 左右产生)^[11]。不同坡度下侵蚀泥沙量的差异性说明了坡度对坡面泥沙流失具有重要影响。在相同雨强条件下,坡度越大,雨水在坡面的停留时间越短,从而缩短

了径流的入渗时间,同时坡面径流流速加大,径流对土壤颗粒的分散作用及冲刷搬运能力增强^[11];另外,

坡度越大,土壤的稳定性越低,土壤可蚀性增强,导致其坡面泥沙流失加剧。

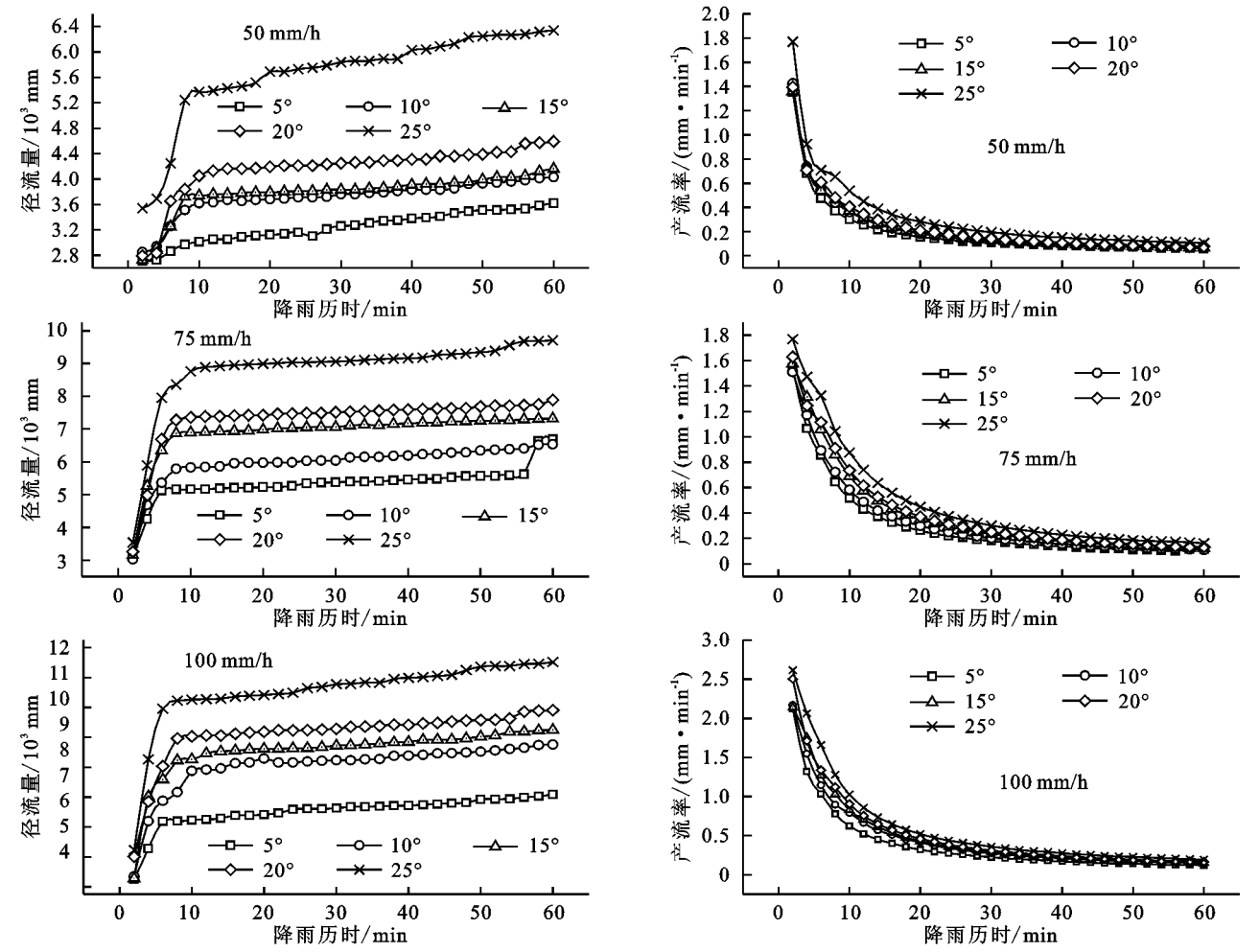


图 3 模拟降雨对产流过程的影响

表 1 产流强度和入渗强度与降雨历时的关系

坡度/(°)	拟合方程	R^2	调整 R^2	P 值	F 值
5	$y_1=1.236x^{0.689}$	0.826	0.805	$<0.01^{**}$	123.56
10	$y_1=3.521x^{0.028}$	0.735	0.712	$<0.01^{**}$	153.69
15	$y_1=1.024x^{3.967}$	0.821	0.794	$<0.01^{**}$	164.28
20	$y_1=4.578x^{0.163}$	0.803	0.756	$<0.01^{**}$	134.77
25	$y_1=0.514x^{4.102}$	0.769	0.713	$<0.01^{**}$	152.06
5	$y_2=-0.583\ln(x)+4.297$	0.756	0.716	$<0.01^{**}$	163.02
10	$y_2=-1.689\ln(x)+0.523$	0.638	0.617	$<0.05^*$	154.21
15	$y_2=-0.7437\ln(x)+18.412$	0.723	0.705	$<0.01^{**}$	124.87
20	$y_2=-2.057\ln(x)+3.568$	0.698	0.658	$<0.01^{**}$	136.59
25	$y_2=-0.742\ln(x)+5.612$	0.716	0.654	$<0.01^{**}$	133.54

注: y_1 为产流强度; y_2 为入渗强度; x 为降雨历时; $**$ 表示 $P<0.01$; $*$ 表示 $P<0.05$ 。下同。

以侵蚀泥沙量的最大峰值为分界点,分 2 个过程探讨侵蚀泥沙量与产流历时的关系,并拟合不同坡度下侵蚀泥沙量峰值前后变化特征与产流历时的回归方程。从表 2 可以看出,不同坡度下的侵蚀泥沙量在峰值前后均与产流历时呈幂函数的变化规律。

2.4 模拟降雨对土壤养分流失的影响

2.4.1 模拟降雨对泥沙养分变化过程分析 侵蚀泥沙养分浓度的变化特征反映了土壤养分流失的基本

规律。根据侵蚀泥沙各养分在产流历时中的变化特征,对侵蚀泥沙养分含量与相应产流历时之间的关系进行分析,并建立回归模型。由表 3 可知,在不同坡度下,侵蚀泥沙有机质、全氮、全磷和全钾含量随产流历时的增加呈现出先增大至峰值后逐渐减小的趋势,最后趋于平稳。同时,侵蚀泥沙有机质、全氮、全磷和全钾含量对坡度增大所表现的变化特征具有一定的差异性。从回归模型可知,各坡度下侵蚀泥沙养分含量均与产流历时呈幂函数关系。

表 2 不同坡度条件下峰值前后侵油泥沙量与产流历时回归模型

坡度/ (°)	峰值前					峰值后				
	拟合方程	R ²	调整 R ²	P 值	F 值	拟合方程	R ²	调整 R ²	P 值	F 值
5	$y=3.256x^{0.473}$	0.896	0.825	<0.01**	89.56	$y=2.368x^{0.128}$	0.823	0.792	<0.01**	91.42
10	$y=2.984x^{0.856}$	0.657	0.604	<0.05*	72.14	$y=1.423x^{0.567}$	0.714	0.671	<0.01**	56.79
15	$y=1.268x^{0.941}$	0.714	0.687	<0.01**	93.05	$y=0.587x^{2.697}$	0.822	0.723	<0.01**	63.25
20	$y=3.659x^{0.105}$	0.687	0.623	<0.05*	78.69	$y=3.021x^{0.085}$	0.789	0.705	<0.01**	71.38
25	$y=0.568x^{2.036}$	0.713	0.671	<0.01**	80.23	$y=0.523x^{1.569}$	0.687	0.622	<0.01**	62.84

注:y 为泥沙侵蚀量;x 为降雨历时。

表 3 侵蚀泥沙各养分含量与产流历时回归模型

坡度/ (°)	峰值前					峰值后				
	拟合方程	R ²	调整 R ²	P 值	F 值	拟合方程	R ²	调整 R ²	P 值	F 值
5	$y_1=6.397x^{0.132}$	0.623	0.604	<0.01**	98.63	$y_1=1.036x^{0.562}$	0.785	0.741	<0.01**	113.25
10	$y_1=5.269x^{0.389}$	0.512	0.487	<0.05*	82.14	$y_1=0.984x^{2.314}$	0.513	0.468	<0.05*	105.47
15	$y_1=1.036x^{2.387}$	0.698	0.536	<0.01**	102.73	$y_1=3.874x^{0.698}$	0.586	0.523	<0.01**	86.95
20	$y_1=0.569x^{1.056}$	0.741	0.614	<0.01**	91.25	$y_1=6.025x^{0.058}$	0.687	0.610	<0.01**	91.44
25	$y_1=2.341x^{1.527}$	0.832	0.756	<0.01**	87.05	$y_1=2.514x^{0.269}$	0.469	0.432	>0.05	95.67
5	$y_2=1.214x^{0.363}$	0.536	0.501	<0.05*	75.98	$y_2=3.066x^{0.694}$	0.443	0.401	>0.05	85.23
10	$y_2=0.097x^{2.569}$	0.423	0.389	>0.05	92.54	$y_2=2.358x^{0.068}$	0.657	0.627	<0.01**	91.74
15	$y_2=1.035x^{0.247}$	0.658	0.568	<0.01**	86.41	$y_2=1.238x^{0.269}$	0.584	0.503	<0.05*	73.26
20	$y_2=2.367x^{1.256}$	0.587	0.834	<0.05*	78.05	$y_2=5.024x^{1.037}$	0.712	0.687	<0.01**	82.04
25	$y_2=0.544x^{1.259}$	0.699	0.644	<0.01**	62.89	$y_2=3.259x^{0.699}$	0.698	0.624	<0.01**	88.41
5	$y_3=3.258x^{0.147}$	0.715	0.689	<0.01**	69.3	$y_3=2.147x^{0.698}$	0.436	0.405	>0.05	92.35
10	$y_3=0.569x^{3.120}$	0.786	0.750	<0.01**	74.13	$y_3=1.698x^{1.036}$	0.587	0.526	<0.05*	91.47
15	$y_3=2.458x^{0.036}$	0.639	0.611	<0.01**	52.44	$y_3=0.674x^{3.568}$	0.563	0.487	<0.05*	68.35
20	$y_3=1.159x^{2.417}$	0.487	0.423	>0.05	63.81	$y_3=3.269x^{0.017}$	0.662	0.615	<0.01**	72.08
25	$y_3=1.325x^{0.369}$	0.512	0.483	<0.05*	69.05	$y_3=1.260x^{0.364}$	0.762	0.723	<0.01**	56.73
5	$y_4=5.014x^{0.069}$	0.623	0.581	<0.01**	65.17	$y_4=3.652x^{0.567}$	0.469	0.402	>0.05	69.87
10	$y_4=0.369x^{0.874}$	0.741	0.705	<0.01**	89.13	$y_4=2.363x^{0.038}$	0.699	0.643	<0.01**	62.05
15	$y_4=2.368x^{1.085}$	0.563	0.512	<0.05*	92.05	$y_4=1.854x^{0.231}$	0.587	0.501	<0.05*	73.11
20	$y_4=4.107x^{0.569}$	0.519	0.475	<0.05*	68.77	$y_4=0.147x^{2.305}$	0.664	0.612	<0.01**	89.74
25	$y_4=0.364x^{1.235}$	0.486	0.414	>0.05	70.23	$y_4=2.037x^{0.334}$	0.702	0.665	<0.01**	91.23

注:y₁ 为有机质;y₂ 为全氮;y₃ 为全磷;y₄ 为全钾;x 为降雨历时。

2.4.2 侵蚀泥沙总体特征与侵蚀泥沙养分变化分析 由表4 可以看出,在任一坡度下,泥沙量与其养分含量均存在正相关关系,当坡度为 15°,20°和 25°时,泥沙流失量与其养分含量之间的相关性明显高于坡度为 5°和 10°时的相关系数,说明了侵蚀泥沙量的增加可能会引起泥沙中养分含量的增加,主要是因为降雨过程中,侵蚀泥沙携带了大量的颗粒态养分,随着降雨的发生和进行,吸附在泥沙颗粒中养分

不断增加,而不同养分在相同坡度条件下的相关系数不尽一致,主要是由于各养分在侵蚀泥沙中吸附能力有所不同。

随着坡度的增大,侵蚀泥沙量与养分含量并非具有更进一步的相关性,如全钾含量,当坡度由 5°提高为 25°时,侵蚀泥沙量与其的相关关系(相关系数)反而不明显,而不同坡度下的全磷含量与侵蚀量没有表现出显著的相关关系(P>0.05)。

表 4 不同坡度条件下侵蚀泥沙量与泥沙各养分流失量相关分析

坡度/ (°)	有机碳		全氮		全磷		全钾	
	偏相关系数	显著性	偏相关系数	显著性	偏相关系数	显著性	偏相关系数	显著性
5	0.026	0.234	0.234	0.158	0.056	0.187	0.569	0.038*
10	0.536	0.031*	0.598	0.019*	0.158	0.123	0.635	0.009**
15	0.689	0.009**	0.632	0.008*	0.236	0.105	0.231	0.164
20	0.712	0.008**	0.698	0.007**	0.107	0.231	0.356	0.187
25	0.756	0.007**	0.657	0.006**	0.513	0.046*	0.158	0.105

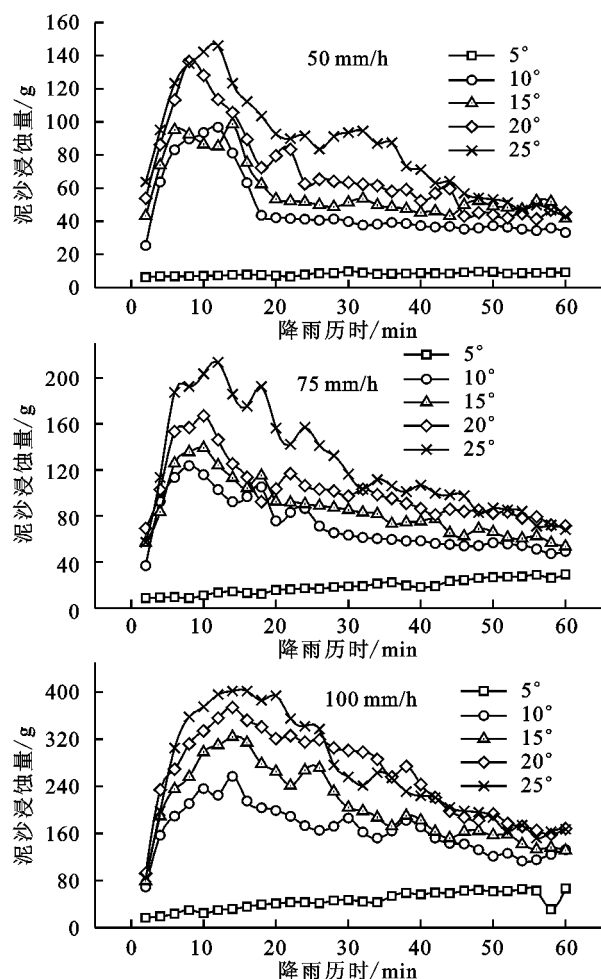


图4 不同坡度下径流泥沙量随产流历时的变化

3 讨论与结论

土壤颗粒在坡面以团聚体和土壤机械组成的形式迁移变化,随降雨径流迁移出坡面为侵蚀泥沙(土壤侵蚀量),土壤颗粒侵蚀变化的衡量指标主要包括产流强度、侵蚀泥沙量、径流系数等^[12]。本研究中,不同降雨强度下,土壤坡面初始产流时间随坡度的增大而趋于提前,相同坡度条件下,坡面产流随降雨强度的增大而趋于提前,相对比可知,100 mm/h 降雨强度下坡面产流所需时间极差值为 1.33 min;75 mm,50 mm/h 雨强下极差值分别为 1.63,2.21 min。由此可知,降雨强度对初始产沙时间的影响大于坡度对初始产沙时间的影响,主要是因为当降雨强度增大时,单位时间和单位面积土壤坡面的承雨量增大,而降雨强度在很大程度上掩盖了坡度所起的作用,因此各个坡度条件下的产流时间整体趋于提前,降雨强度对初始产沙时间的影响大于坡度对初始产沙时间的影响。

本研究中,在同一坡度下,产流强度和入渗强度均随着降雨强度的增加以近于等距的趋势增加。坡面径流在降雨强度、地表覆盖、土壤前期含水率等环境要素基本一致的条件下,产流强度主要受地表坡度

决定的承雨量所控制,也受到雨滴能量、坡面水流入渗和坡面侵蚀状况等因素的影响^[13];再加上土壤透水性较差、径流系数较大,产流强度的变化几乎与降雨强度是同步变化^[13]。在相同坡度下,平均入渗强度随降雨强度的增大呈先增大后减小趋势,这说明降雨强度对水分的入渗起到了一定的促进作用;首先,土壤中非毛管孔隙和毛管孔隙是水分入渗的主要通道,当降雨强度增大时,雨滴动能逐渐增大导致雨滴打击所产生的挤压力增大,这种挤压力加快了入渗水流的速度^[9,14];其次,结皮在此过程中产生了重要作用,当坡度较小时,产生了结构性结皮,此后细小的土壤颗粒渗入下层土壤,形成沉积结皮;以上两个过程使得坡度小的坡面产生结皮,结皮对于水分的截取直接导致了入渗强度降低。随着坡度的增大,雨滴对土壤表层的打击力相应减小,加上水流速度加快,在一定程度上削弱了结皮的形成,土壤入渗强度随坡度的增加而降低,而当坡度增大到一定程度时,细沟的出现致使坡面径流大量流入沟内,细沟内渗压力减小,水分入渗过程相对减弱^[9,14],而对于此过程,我们还需通过更多野外和室内试验作进一步研究和验证。

在降雨的 0~10 min 内,径流量随降雨历时的增加陡然上升,径流量差异不大,即降雨初始时刻,径流量受坡度的影响较小,而在降雨后期,径流量受降雨强度和坡度的影响较大。主要有两个原因:首先,在产流初期,土壤坡面土层较为松散,抗蚀性较差,易受径流冲刷和雨滴击溅,一旦降雨发生,土壤颗粒随径流迅速流失,表现为产流初期径流量迅速增加^[15];另一方面,随着降雨的发生,在土壤表层形成了不易流失的结皮,结皮能够抑制坡面产沙,弱化了土壤侵蚀;而在降雨后期,坡面产流和入渗均趋于稳定,因此,径流也逐步减弱最后趋于稳定^[9,14]。

大量的研究资料表明^[6,9,14],坡度作为坡面土壤侵蚀的主要影响因子,与土壤侵蚀量呈显著的正相关关系;也有研究表明坡面侵蚀量并不随着坡度的增加而持续增加,而存在一个临界坡度^[16],由于试验方法、土壤性质和阈值的选取等差异,大量研究所得出的临界坡度差异较大。本研究中侵蚀产沙量随坡度增大而增大,当坡度由 5°增大到 30°时,产沙量急剧增加,对于侵蚀产沙量,并没有出现临界的坡度值,也可能其临界坡度值在 30°以上。坡面产流产沙是一个比较复杂的过程,可能存在一个入渗强度变化的临界坡度,而产流强度主要取决于坡面承接雨量的变化^[16]。本研究中降雨产生的径流量随坡度增大而增加,坡面产流强度和入渗强度随时间的变化关系分别服从幂函数和对数函数规律,而不同降雨强度下的产沙侵蚀量(峰值前后)也服从幂函数关系。

有研究指出,模拟降雨通过降低土壤侵蚀和改变理化性质对土壤养分产生了影响,而模拟降雨对土壤养分的富集效应主要是其固定效应和保蓄效应综合作用的结果^[17]。结合本试验的研究结果来看,在整个产流过程中,侵蚀泥沙养分含量对产流历时的增加具有先增大后逐渐减小并趋于稳定的趋势。从回归模型可知,各坡度条件下侵蚀泥沙养分含量与产流历时均可用幂函数表达。Pearson 相关性分析可知,不同坡度条件下,侵蚀泥沙量与其养分含量均存在不同的正相关关系,当坡面坡度为 15°,20°和 25°时,侵蚀泥沙量与其养分含量间的相关性(主要是相关系数)明显高于坡度为 5°和 10°,说明侵蚀泥沙量的增加可能会引起泥沙中养分含量的增加,而不同坡度下的全磷与侵蚀量没有显著的相关关系($P>0.05$)。这主要是由于磷素是沉积性的惰性元素,其迁移受母质类型和成土条件决定,在土壤中比较稳定、不易流失,因此短期的模拟降雨很难造成磷素的迁移变化^[17]。然而,本研究中模拟降雨与土壤营养元素的迁移关系只是初步结果,模拟降雨对坡面侵蚀的影响较为复杂,其元素在此过程中的释放机理影响及其动力学机制还有待深入研究。

参考文献:

[1] 王青杵,王改玲,石生新,等. 晋北黄土丘陵区不同人工植被对水土流失和土壤水分含量的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(2):71-74.

[2] 林妇,徐涵秋,何慧. 南方红壤水土流失区土地利用动态变化:以长汀河田盆地区为例[J]. 生态学报,2013,33(10):2983-2991.

[3] 王兵,张光辉,刘国彬,等. 黄土高原丘陵区水土流失综合治理生态环境效应评价[J]. 农业工程学报,2012,28(20):150-161.

[4] 郑粉莉,王占礼,杨勤科. 我国土壤侵蚀科学研究回顾和

展望[J]. 自然杂志,2008,30(1):12-16.

[5] 范跃新,杨玉盛,郭剑芬,等. 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤呼吸及其温度敏感性的变化[J]. 植物生态学报,2014,38(11):1155-1165.

[6] 范跃新,杨玉盛,杨智杰,等. 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤活性有机碳含量及季节动态[J]. 生态学报,2013,33(18):5751-5759.

[7] 刘正堂,倪九派,杨智. 喀斯特地区裸坡面土壤侵蚀的人工模拟降雨试验研究[J]. 水土保持学报,2013,27(5):12-16.

[8] 栾莉莉,张光辉,刘如心,等. 人工模拟降雨水质对土壤入渗性能的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(2):21-26.

[9] 王辉,王全九,邵明安. 人工降雨条件下黄土坡面养分随径流迁移试验[J]. 农业工程学报,2006,22(6):39-44.

[10] 孙飞达,王立,龙瑞军,等. 黄土丘陵区不同降雨强度对农地土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持研究,2007,14(2):16-18.

[11] 王晓燕,高焕文,杜兵,等. 用人工模拟降雨研究保护性耕作下的地表径流与水分入渗[J]. 水土保持通报,2000,20(3):23-25.

[12] 汪军,王德建,张刚,等. 连续全量秸秆还田与氮肥用量对农田土壤养分的影响[J]. 水土保持学报,2010,24(5):40-44.

[13] 康玲玲,魏义长. 不同雨强条件下黄土性土壤养分流失规律研究[J]. 土壤学报,1999,36(4):536-543.

[14] 王辉,王全九,邵明安. 表层土壤容重对黄土坡面养分随径流迁移的影响[J]. 水土保持学报,2007,21(3):12-16.

[15] 郭铁瑞,赵哈林,赵学勇,等. 科尔沁沙地结皮发育对土壤理化性质影响的研究[J]. 水土保持学报,2007,21(1):135-139.

[16] 张亚丽,张兴昌,邵明安,等. 降雨强度对黄土坡面矿质氮素流失的影响[J]. 农业工程学报,2004,20(3):55-58.

[17] 黄满湘,章申,唐以剑,等. 模拟降雨条件下农田径流中氮的流失过程[J]. 土壤与环境,2001,10(1):6-10.

(上接第 24 页)

[21] Zhang L T, Gao Z L, Li Z B, et al. Downslope runoff and erosion response of typical engineered landform to variable inflow rate patterns from upslope[J]. Natural Hazards, 2016, 80(2):775-796.

[22] 齐洪亮,田伟平,舒延俊. 基于坡面径流强度的中国公路水文区划研究[J]. 公路交通科技,2010(3):12-16.

[23] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[J]. 水土保持通报,1981,1(4):13-18.

[24] 李小昱,雷廷武,王为. 电容式传感器测量水流泥沙含

量的研究[J]. 土壤学报,2002,39(3):429-435.

[25] 柳玉梅,张光辉,李丽娟,等. 坡面流水动力学参数对土壤分离能力的定量影响[J]. 农业工程学报,2009,25(6):96-99.

[26] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等. 降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J]. 农业机械学报. 2015,46(7):162-170.

[27] 蔡强国,吴淑安,马绍嘉,等. 花岗岩发育红壤坡地侵蚀产沙规律试验研究[J]. 泥沙研究,1996(1):89-96.