

南方风化花岗岩坡地产流过程与侵蚀率模拟研究

邓龙洲¹, 张丽萍¹, 孙天宇¹, 费凯¹, 范晓娟¹, 邬燕虹¹, 倪亮², 孙睿²

(1.浙江大学环境与资源学院, 浙江省农业资源与环境重点实验室, 杭州 310058; 2.浙江大学农业试验站, 杭州 310058)

摘要: 采用室内人工降雨模拟方法研究了不同坡度(5°, 8°, 15°, 25°)和降雨强度(1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mm/min)对南方风化花岗岩坡地土壤侵蚀特征的影响。结果表明, 径流量和径流率均随降雨强度的增大而增大, 但随坡度的增大而减小。径流入渗率与坡度呈极显著正相关($r=0.660, p<0.01$), 而随着降雨时间的延长呈现出3个不同阶段的变化: 初始全渗阶段、快速下降阶段和相对稳定阶段。降雨强度对径流量的影响比坡度更明显。平均产沙浓度与坡度呈极显著正相关($r=0.694, p<0.01$), 而其与降雨强度之间的关系取决于坡度条件。土壤侵蚀率随降雨延长呈先增后减趋势, 整体上与坡度和降雨强度呈正相关($r>0.580, p<0.05$)。土壤侵蚀率和径流率在陡坡上呈线性关系($R^2>0.861$), 在缓坡上呈幂函数关系($R^2>0.966$)。最后采用修正的典型土壤流失方程模型来预测土壤侵蚀率, 发现模拟值的变化趋势与实际测量值接近, 表明该修正模型在研究区具有一定的适用性。研究结果可以为风化花岗岩地区的土壤侵蚀率研究提供数据支撑, 对进一步理解土壤侵蚀过程有着重要的意义。

关键词: 侵蚀率; 径流率; 坡度; 雨强; 风化花岗岩坡地

中图分类号: S151

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0035-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.03.006

Simulation Study on Runoff Processes and Erosion Rate on the Weathered Granite Slope in Southern China

DENG Longzhou¹, ZHANG Liping¹, SUN Tianyu¹, FEI Kai¹,

FAN Xiaojuan¹, WU Yanhong¹, NI Liang², SUN Rui²

(1. Zhejiang Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058; 2. Agricultural Experiment Station, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

Abstract: The method of artificial rainfall simulation was applied to study the effects of different slope gradients (5°, 8°, 15° and 25°) and rainfall intensities (1.0, 1.5, 2.0 and 2.5 mm/min) on the characteristics of soil erosion on the weathered granite slope land of South China. The results showed that both the runoff volume and runoff rate increased with the increasing rainfall intensity, but decreased with the increasing slope gradient. The runoff infiltration rate was significantly positively related to slope gradient ($r=0.660, p<0.01$) and exhibited three different stages with rainfall duration, including the initial all-infiltrated stage, rapid decreasing stage and the relatively stable stage. However, the effect of rainfall intensity on runoff yield was more obvious than that of slope gradient. There was a significantly positive correlation between the average sediment concentration and slope gradient ($r=0.694, p<0.01$). The relationship between rainfall intensity and average sediment concentration depended on the conditions of slope gradient. The soil erosion rate, which overall was positively related to slope gradient and rainfall intensity ($r>0.580, p<0.05$), showed a trend of increasing first and then decreasing with the prolongation of rainfall duration. The soil erosion rate and runoff rate showed a positive linear correlation ($R^2>0.861$) on the steep slopes and a power function relationship ($R^2>0.966$) on the gentle slopes. A revised typical soil loss equation model was used to predict the erosion rate, and it was found that the change trend of the simulated values was close to the actual measured values, which indicated that the revised model had certain applicability in the study area. These results could provide data support for the study of soil erosion rate in the weathered granite area, and had important signif-

收稿日期: 2019-10-17

资助项目: 国家自然科学基金项目(41877065)

第一作者: 邓龙洲(1993—), 男, 湖北咸宁人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 11614056@zju.edu.cn

通信作者: 张丽萍(1959—), 女, 教授, 博导, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: lpzhang@zju.edu.cn

icances for further understanding of soil erosion process.

Keywords: erosion rate; runoff rate; slope gradient; rainfall intensity; weathered granite slope

土壤侵蚀是世界范围内的重要环境问题,是造成生态系统退化的主要驱动力之一^[1]。近年来,人们进行了大量试验来研究土壤侵蚀机理和浅层水流动力学。据估计^[2],2012 年全球年平均土壤侵蚀量约为 3.59×10^{10} t。世界上最高的土壤侵蚀率常发生于坡地上,尤其是在农业坡耕地上更为明显^[3]。农业坡地上的土壤侵蚀对土壤利用和农业发展有很大影响,不仅导致土壤肥力和生产力下降,而且导致农业面源污染。目前,学者们^[4-6]通过室内试验、野外监测、数值模拟和解析等方法对土壤侵蚀进行了广泛的研究。雨滴击溅引起的土壤侵蚀是土壤颗粒分散、转移和随后沉降的复杂现象,可以造成坡地土壤颗粒物与养分、污染物的迁移,因此是水土保持研究的重点内容。

为了研究水土流失的机理,可将土壤侵蚀过程分为面蚀和沟蚀,其中面蚀的过程主要包括雨滴击溅和表层流对土壤的剥蚀和迁移^[7]。由于坡地长度短并且径流剪切力小,坡面几乎不会形成明显的侵蚀沟,微小细沟可以忽略不计^[8]。不少学者通过模拟不同坡度和雨强条件下的土壤侵蚀过程,研究了土壤侵蚀特征及影响侵蚀率变化的因素。例如,Koiter 等^[9]评估了土壤表面特性对土壤侵蚀的粒径和碳的选择性作用,发现侵蚀泥沙相对原始土壤更富含细小颗粒和碳;Ding 等^[10]研究了坡面粗糙度对土壤侵蚀过程和侵蚀泥沙粒径分布的影响认为,在评估和模拟土壤侵蚀过程时应分别考虑每个颗粒的粒径,而不能仅考虑总产沙量;Zhang 等^[11]运用 5 种稀土元素示踪剂模拟了降雨条件下的泥沙动力学发现,土壤侵蚀量受径流运输过程控制。这些研究结果都表明泥沙的分离、运输和沉降以及再分离过程同时发生,并一直处于动态变化,泥沙主要以滚动或悬浮的形式在面蚀区域内运输。雨强和坡度是控制水文过程的 2 个主要因素。大多数研究表明,侵蚀率随着坡度的增大而增加。在早期的 USLE 方程及其修订公式^[12]中,土壤侵蚀与坡度呈幂函数关系或线性函数关系;Fox 等^[13]研究了土壤侵蚀率随坡度变化的趋势,并监测了砂壤土径流速度的变化发现,土壤流失与径流速度有关,土壤侵蚀率受到径流迁移能力的限制;Mahmoodabadi 等^[14]研究了雨强、坡度和粒径分布对击溅与冲刷的贡献度的影响,揭示了缓坡上降雨侵蚀的运输能力限制和陡坡上的分离能力限制现象。泥沙运输能力的阈值取决于几个相互作用的因素,例如径流深、径流速度、泥沙浓度、泥沙颗粒的尺寸和沉降速度。传统研究中的径流和泥沙研究结果还不能确定运输能力

的阈值,而定量估算不同流域规模的径流和产沙量是非常重要的。

由风化花岗岩母质发育而来的土壤广泛分布在我国中部和东南部地区,这些高山地形的多山地区很容易遭受降雨侵蚀。目前,关于东南地区风化花岗岩坡地土壤侵蚀的研究不多,关于研究风化花岗岩坡地土壤侵蚀的方法和技术仍处于探索阶段。因此有必要研究土壤面蚀特征,以预测土壤侵蚀过程和促进当地的水土保持。野外自然降雨试验可以详细反映坡地、径流槽甚至小流域范围内的土壤侵蚀规律,但是完成系列测试需要时间较长并耗费大量人力、物力和财力。相比之下,人工模拟降雨可以很好地模拟降雨—侵蚀—养分流失过程,具有易于控制、效率高的优点,已逐渐成为探索水土流失机理的重要方法^[15]。通过人工模拟降雨试验研究风化花岗岩坡地上的土壤侵蚀过程,不仅可以为预测风化花岗岩地区的土壤侵蚀提供科学依据,也能为水土保持措施的安排提供理论支持。

1 材料与方法

试验土壤取自浙江省西北部的安吉县($30^{\circ}34'N$, $119^{\circ}23'E$),主要由风化花岗岩的母质发育而成,地带分布上属于中国南方典型的红壤丘陵区土壤。这种土壤层位沿着垂直剖面由上至下依次为耕作层、红土层、砂土层和碎屑层^[16-17](图 1a)。由于严重的水蚀,表层土壤被冲刷移走使得土壤厚度减小,暴露出不同深度的土壤(如红土层和砂土层)。在本研究中,裸露红土层中的土壤被选为室内降雨模拟的研究对象。试验土壤呈现弱酸性,平均容重 1.61 g/cm^3 ,总磷含量 1.36 g/kg ,有效磷含量 93.36 mg/kg 。总氮含量 0.60 g/kg ,有机质含量 4.09 g/kg 。土壤黏粒($<0.002 \text{ mm}$)含量为 11.26% ,粉粒($0.002 \sim 0.02 \text{ mm}$)含量为 14.63% ,而砂粒($0.02 \sim 2 \text{ mm}$)含量为 74.11% ,属于典型的砂壤土。

采用原状土搬迁的方法将试验土壤移入径流槽内,对 12 层(厚度为 60 cm)土壤每间隔 5 cm 深度从表面到更深的土壤层进行采集装袋,并用环刀法测试容重。然后在径流槽中用相应的土层进行填充,以确保土壤容重的一致性。在正式开始降雨试验之前将径流槽放置一段时间,使土壤自然下沉并恢复其自然特性。收集土壤样品并确定土壤水分含量,以确保在每次降雨试验之前试验土壤的初始含水量相同。

土壤侵蚀试验于 2017 年 11 月至 2018 年 6 月在浙江大学农业科学实验站(中国长兴)进行。雨强由

QYJY-502 便携式自动降雨模拟器(图 1b)调节,范围为 15~200 mm/h。模拟降雨器的喷嘴设置在径流槽上方 6 m 处,覆盖范围为 4 m×4 m,足以使大多数雨滴达到自然降雨的终极速度。径流槽为一种可在 0~30°范围内灵活调节的变坡三维模拟土槽(图

1c),尺寸为 200 cm 长×100 cm 宽× 60 cm 高。由于径流槽的坡长短,试验中的水土流失现象都属于面蚀,几乎没有侵蚀细沟形成。2 个径流槽平行放置并同时覆盖相同雨强以进行重复计算。通过径流槽顶部设置的三角形出口收集坡面径流和泥沙。

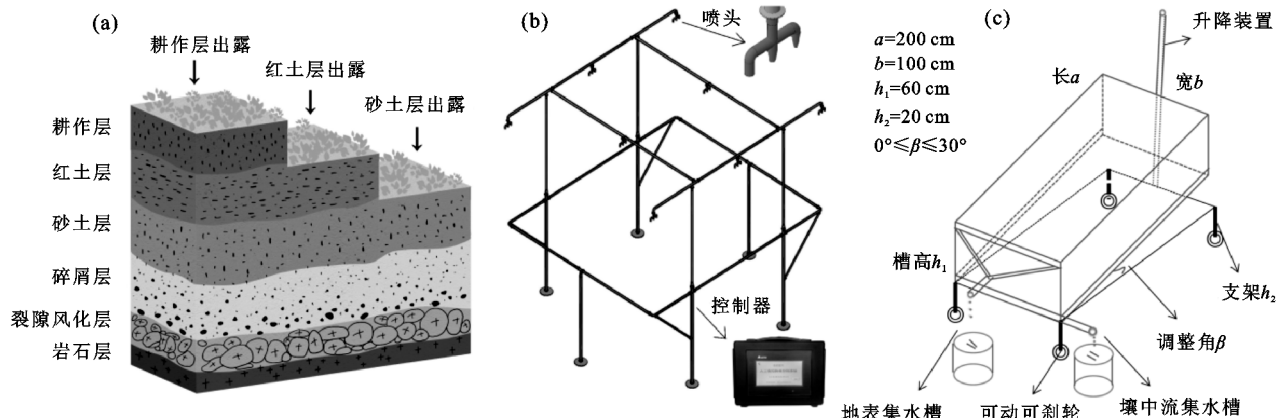


图 1 风化花岗岩坡地典型土壤的不同出露层、模拟降雨器装置和径流槽示意

处理组的设置为:设计 4 个雨强 1.0,1.5,2.0,2.5 mm/min,并配以 5°,8°,15°和 25° 4 个坡度。在每次降雨试验之前,用防水布覆盖土壤径流槽,然后校准雨强。达到目标雨强和均匀度(>85%)之后,移开防水布并开始计时,用秒表记录坡面径流和泥沙产生的时间。坡面径流和泥沙样品总的收集时间为 90 min,每隔 3 min 收集 1 次样品并测量径流体积。收集的径流泥沙样品沉降至少 24 h,然后从容器中倒出上清液,将剩余的湿泥沙在 65 °C 烘箱内干燥后称重。

2 结果与分析

2.1 径流流失特征

侵蚀性降雨产生的径流可分为 2 部分,包括坡面径流和壤中流。入渗过程极大地影响了径流的分布、水分的补充和泥沙的迁移,充分了解径流的入渗对认识坡面径流和壤中流的过程起着重要作用。在土壤初始含水量较低的情况下,径流入渗率(I_r)的变化表现为 3 个阶段的变化,包括初始全渗阶段、快速下降阶段和相对稳定阶段。不同坡度和雨强下 I_r 随降雨时间的动态变化见图 2。初始全渗阶段的持续时间长短受坡度和雨强的影响,即雨强和坡度越大,其持续时间越短。在雨强为 1.0 mm/min 的 5°坡地上,该阶段的持续时间最长。快速下降阶段的持续时间与雨强之间的关系很明显,即雨强越大 I_r 下降越快,达到相对稳定阶段所需的时间也越短。当 I_r 变得相对稳定时,在相同雨强下稳态 I_r 与坡度呈正相关($r=0.660, p<0.01$)。较大的 I_r 表明陡坡上形成一个不同的、更具渗透性的径流—泥沙混合层。土壤的剧烈侵蚀和雨滴打击分量的增大会导致浅薄混合层的渗透性增加;另外,随着坡度的增大,原本更容易进入土

壤深层并填充孔隙的细小颗粒通过坡面径流被运输,从而降低混合层以下土层孔隙被堵塞的可能性^[18],最终导致混合层的厚度变薄而增加了土壤的渗透性。Ribolzi 等^[20]也发现,陡斜坡上的土壤表现出更大的径流渗透性。

坡面径流的径流率(R_r)随着降雨时间的延长而增大,最终达到相对稳定的动态变化范围(图 3)。雨强越大, R_r 达到稳定范围所需的时间越短。初始 R_r 很低,原因为降雨开始时没有形成土壤密封层,此时处于初始全渗阶段的 I_r 较高,土壤侵蚀形式主要为雨滴溅蚀,与其他阶段相比, I_r 较高而 R_r 较低。随着土壤表层封闭和坡面径流的形成,面蚀逐渐发展成为土壤侵蚀的主要形式。随后 I_r 快速下降而 R_r 相应增长。坡面径流量随着降雨强度的增大而增加,但随着坡度的增加而减小。可能原因是在相同的坡度处理下,径流槽的受雨面积是一样的。在雨强相同的情况下,径流槽的承雨面积随着坡度的增加而减小,导致 R_r 降低。从表 1 可以看出,平均 R_r 随雨强的增加而增大,而且雨强对 R_r 的影响作用大于坡度。雨强相同时,不同坡度下的 R_r 差异显著,但雨强为 2.5 mm/min 时不同坡度之间的 R_r 差异相对较小。坡面径流的产生包括超渗产流和饱和产流 2 种机制^[20]。有学者^[13]指出,坡度通过影响坡面径流深和流速来影响 I_r 和 R_r 。坡度不仅会影响坡地土壤颗粒的运输迁移,而且还会通过影响地表封闭层、地表水储量、有效雨强和坡面径流深度等因素间接对 I_r 产生作用。坡度也可以通过影响土壤侵蚀度和入渗率间接影响土壤侵蚀过程。而强降雨常常可以提供更多的能量来破坏土壤颗粒,从而导致土壤孔隙堵塞和地表结皮^[18]。大雨强条件下的坡

面径流比小雨强时具有更高的径流产量或径流系数。但是,强降雨条件下的雨滴或坡面径流可能会破坏地

表土壤的薄层结皮,然后渗透到下层土壤,从而造成坡面径流量的减少和波动^[19]。

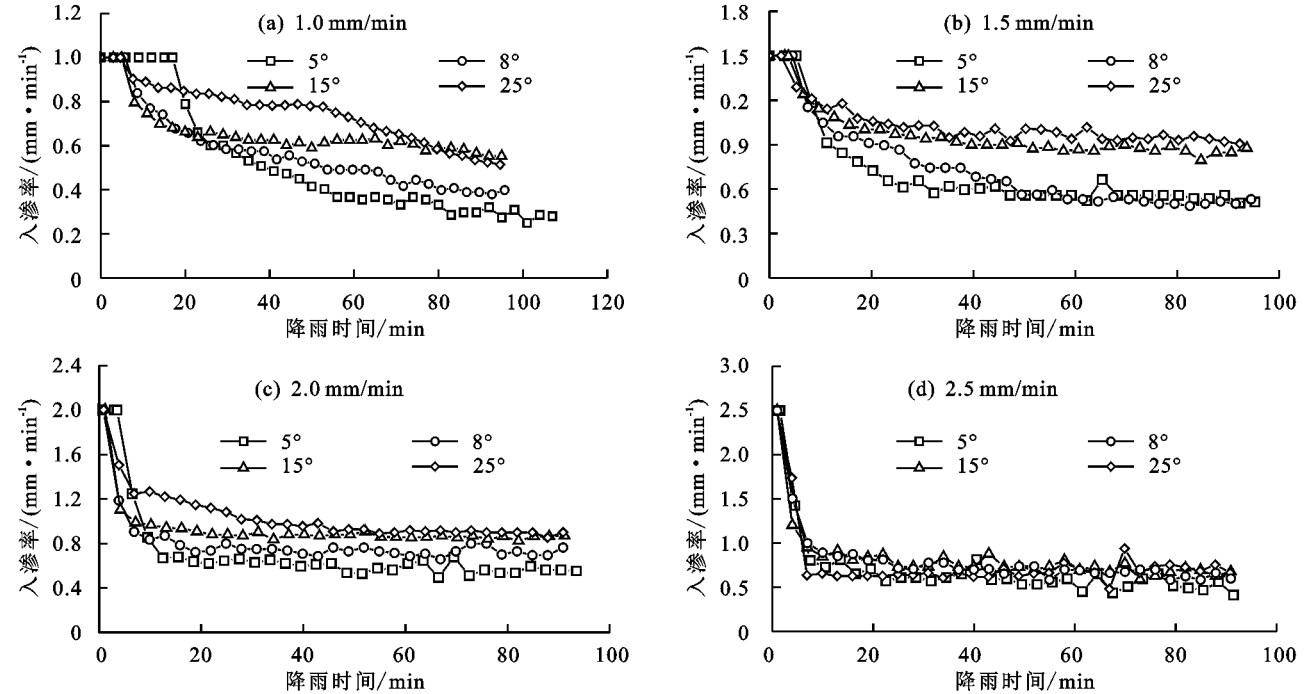


图 2 不同坡度和雨强下入渗率随降雨时间的动态变化

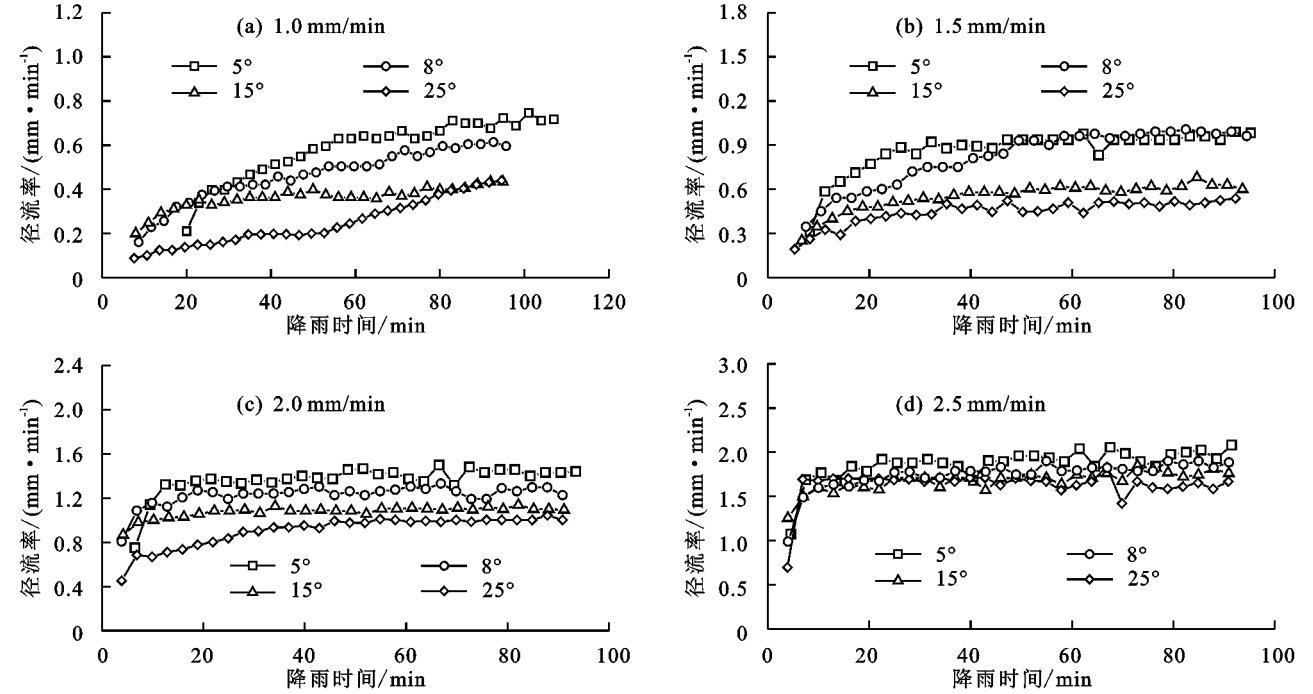


图 3 不同坡度和雨强下坡面径流率随降雨时间的动态变化

表 1 不同坡度和雨强下的平均径流率

单位:L/min

坡度/(°)	1.0 mm/min	1.5 mm/min	2.0 mm/min	2.5 mm/min
5	1.18±0.26aD	1.74±0.28aC	2.74±0.27aB	3.74±0.37aA
8	0.93±0.24bD	1.64±0.38aC	2.45±0.19bB	3.47±0.34bA
15	0.72±0.10cD	1.10±0.18bC	2.15±0.11cB	3.35±0.23bA
25	0.49±0.21dD	0.89±0.17cC	1.81±0.28dB	3.26±0.38bA

注:表中数据为平均值±标准差。下同。

2.2 泥沙流失特征

不同处理方式下的累积产沙量(图 4)表明,总产沙量与坡度和雨强之间存在正相关关系($r>0.580$, $p<0.05$)。在大雨强的陡坡上,总产沙量的增加速率非常大。水力侵蚀是坡地侵蚀产沙的主要驱动力^[12],两者之间呈正相关。总径流量与雨强之间呈正相关关系($r=0.947$, $p<0.01$),但总径流量在雨强相同时随坡度增大而减少,表明坡度是一个重要的影

响因素。泥沙运输能力是水力侵蚀的重要指标,通过计算单位径流量的侵蚀泥沙浓度(S_e),可以分析径流量与土壤侵蚀之间的内在联系(表2)。在相同雨强下,平均 S_e 和坡度之间存在显著的正相关关系($r=0.694, p<0.01$)。Kinnell^[21]发现,径流中的 S_e 随着坡度的增大而增加,特别是在坡度超过 10° 的条件下尤为明显。平均 S_e 在缓坡上随雨强的增大而增加,在 2.5 mm/min 的雨强下出现极大值。但是平均 S_e 在陡坡上的极大值出现在 2.0 mm/min 的雨强下,这意味着极大值出现在最高雨强之前,表明较高的输沙能力并不总是伴随着较高的径流和产沙量。随着坡度的进一步增加,径流槽的受雨面积减小, I_r 增大而 R_r 减小,限制坡面径流对土壤颗粒作用的为分离能力而不是运输能力^[1]。而在本研究的缓坡上,较高的土壤侵蚀率伴随着较高的泥沙运输能力,表明雨强与平均 S_e 之间的关系取决于坡度的变化。

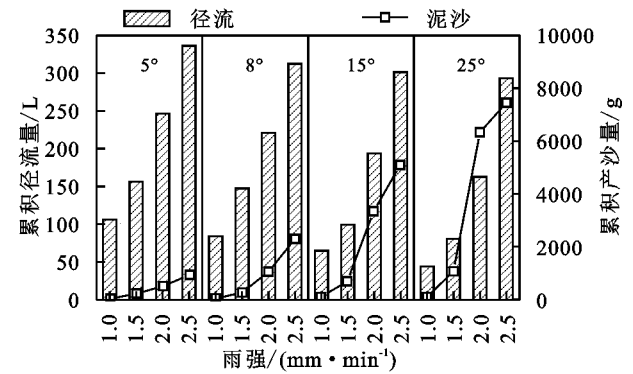


图4 不同处理条件下的累积径流量和累积产沙量

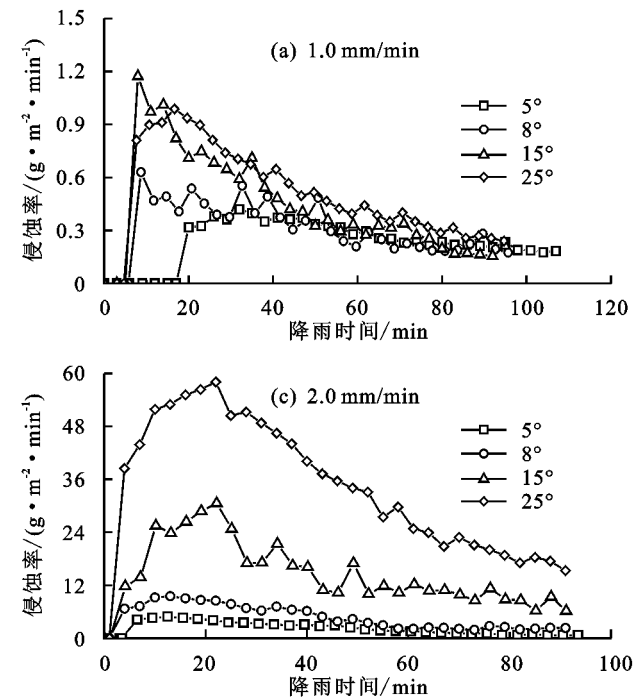


表2 不同处理条件下的平均产沙浓度				
单位:g/L				
坡度/(°)	1.0 mm/min	1.5 mm/min	2.0 mm/min	2.5 mm/min
5	0.48±0.08dD	1.30±0.16dC	1.74±0.46dB	2.30±0.32dA
8	0.72±0.16cD	1.63±0.13cC	3.96±0.92cB	5.98±1.63cA
15	1.30±0.26bC	5.65±1.79bB	13.85±1.23bA	13.54±2.61bA
25	2.22±0.12aD	13.36±1.12aC	38.93±4.57aA	25.42±2.31aB

从图5可以看出,随着降雨时间的延长,侵蚀率(D_r)总体上呈现出先升高后降低的趋势。在径流入渗的初始阶段坡面径流较少,但径流槽内存在土壤侵蚀。由于试验中的泥沙数据是在收集了径流—泥沙混合样品之后测量得到的,中间存在1个泥沙从坡地上部迁移到底部的运输时期,当径流和泥沙从径流槽中流出时,早期的 D_r 会较高。随着降雨试验的进行,径流入渗达到饱和阶段, R_r 恒定不变,雨滴和坡面径流对坡地土壤的侵蚀强度也达到相对稳定状态。当剥蚀能力达到极限时,坡地表的土壤细小颗粒全部被运输,导致随后的坡面径流中泥沙含量随着降雨时间的延长而减少, D_r 也随之减少。产沙量的显著下降也可归因为径流的冲刷作用降低了土壤表面粗糙度,以及压实和密封作用增加了土壤结构的稳定性,从而产生了表层保护作用^[22]。在雨强为 1.5 mm/min 的 8° 坡地上,由于试验期间在坡地上出现大块状塌陷现象,土壤侵蚀率出现明显的突增。在其他试验条件下也发生了一些小规模块体塌陷现象,从而引起 D_r 的波动。

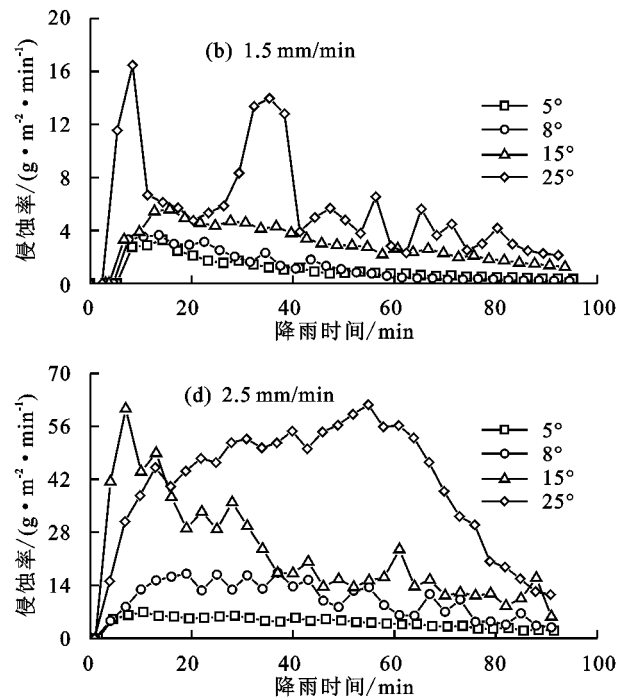


图5 不同坡度和雨强下侵蚀率随降雨时间的动态变化

坡度和雨强在产流产沙过程中起着重要作用。随着坡度和雨强的增加,侵蚀产沙的条件变得更加敏

感,关键侵蚀因子在坡度和雨强之间交替变化。雨强通过影响径流量和雨滴动能来影响产沙量。降雨造

成的侵蚀主要受到雨滴击溅和径流冲刷的影响。雨强的增加使雨滴获得更大的动能,从而增加击溅强度,导致坡地上的疏松土壤颗粒增加。通过增加径流冲刷能力可以更轻松地输送这些松散的土壤颗粒,因此雨强越大 D_i 越高。Cao 等^[8]发现,坡度是除了雨强外控制 D_i 的关键因素。缓坡下的土壤颗粒不易被激活,而陡坡上的土壤颗粒则容易被激活和运移。疏松土壤颗粒之间的空隙较大,土壤颗粒之间的内聚力小,因此在降雨过程中土壤颗粒很容易被径流带走。在入渗作用下,缓坡上的细小颗粒会堵塞土壤间孔隙,促使地表形成结皮,从而增加表面抗侵蚀强度,降低 D_r 。由于在陡坡上较高的径流流速和功率,土壤颗粒更容易被径流运输。随着坡面径流的增加,更多的土壤颗粒可以在陡坡上运输迁移。Vaezi 等^[23]发现,土壤侵蚀受到径流运输能力的限制,并且由于陡坡上的径流产量和径流率的增加,径流运输能力的限制将减少。但并不是所有的原始土壤颗粒都能被坡面径流带走,只有那些因降雨分离的颗粒才可以被运输。

2.3 径流率与侵蚀率的关系

试验结果(图 6)发现, D_r 和 R 在陡坡上为线性关系 ($R^2>0.861$),在缓坡上呈幂函数关系 ($R^2>0.966$)。该结果类似于 Cao 等^[8]的研究,但函数关系从陡坡到缓坡是相反的。一方面,小雨强下的慢径流将形成浅水径流—泥沙混合层,可以在一定程度上有效减轻雨滴的击溅作用;另一方面,在强降雨条件下快速的坡面径流不仅可以运输侵蚀泥沙,而且可以使表层土壤颗粒分离,从而促进水力侵蚀过程。但是,总体而言,随着坡度和雨强的增加, R_r 和径流速度增加,最终导致土壤侵蚀增加。除击溅作用导致的土壤颗粒跳跃外,泥沙在土壤侵蚀过程中还可以通过滚动和悬浮方式运输。

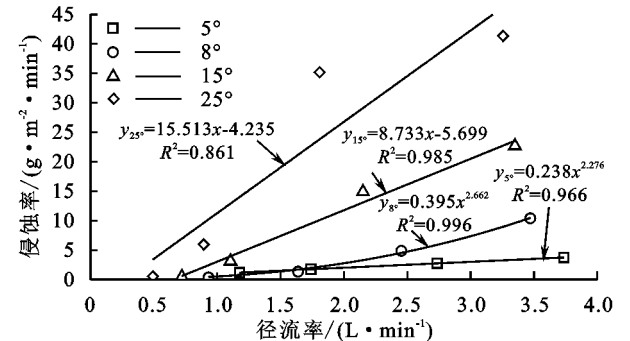


图 6 不同坡度下径流率和侵蚀率之间的拟合关系

有许多土壤侵蚀模型可用于探索土壤侵蚀性并预测坡地上的土壤流失,其中最常用的模型之一是 Zhang 等^[12]提出的基于 RUSLE 模型的修正方程(G 模拟),其表达式为:

$$D_i = K_i R^{1/2} I S^{2/3} L \tag{1}$$

式中: D_i 为土壤侵蚀度 ($g/(m^2 \cdot min)$); K_i 为土壤侵蚀度; R 为径流率 (L/min); I 为雨强 (mm/min); S

为坡度 (m/m); L 为坡长 (m)。

在该方程中,雨强 I 代表降雨引起的土壤剥离能力和径流运输能力, $R^{1/2} S^{2/3}$ 项代表浅层坡面径流的泥沙运输能力。在本研究中,根据土壤侵蚀理论,使用预测公式计算了每个坡度和雨强的 D_i 值。土壤的 K_i 值是计算预计侵蚀率的重要前提。吕喜玺等^[24]利用修正后的 EPIC 公式计算了中国南方主要易蚀土壤的 K 值,得出花岗岩红壤的平均 K 值为 0.23; Wang 等^[25]综述认为,太湖流域侵蚀性红壤的 K 值为 0.226。两者的研究对象与本研究非常接近,因此采用 0.23 作为 K 值来计算预测的侵蚀率。公式(1)可以根据测量值进行转换(T 模拟):

$$D_i = K_i R^{0.979} I^{2.457} S^{1.463} L^{-3.760} \tag{2}$$

结果在图 7 中以 1 : 1 斜线图表示,用于分析和比较预测值和测量值。从图 7 可以看出,G 模拟和 T 模拟随坡度和雨强的总体变化趋势与实测值相似。G 模拟的土壤侵蚀率在缓坡和小雨强条件下偏高,而在陡坡上的大雨强条件下偏低。T 模拟很好地拟合了缓坡上的侵蚀率,但在陡坡上波动很大,其原因可能是土壤类型不同,导致水力侵蚀的结果存在一些差异^[6]。这表明该预测模型虽然可以用于风化花岗岩地区土壤侵蚀率的预测,但是还需要进一步的完善和改进。 K_i 的值随着试验条件的不同而变化,因此今后应该收集更多有效的试验数据来进一步提高预测模型的精度。

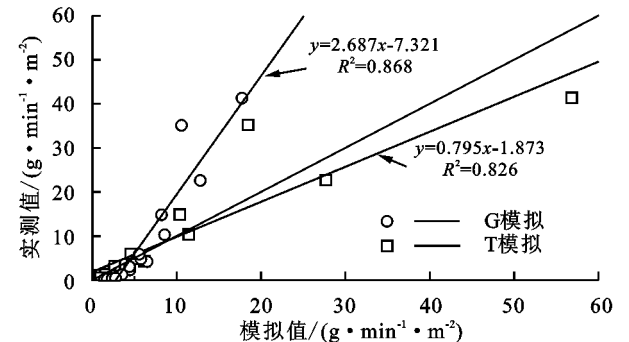


图 7 侵蚀率实测值与模拟值之间的比较

3 结论

本研究通过 16 场有效的人工降雨试验探讨了我国东南地区风化花岗岩坡地上土壤面蚀在不同雨强和坡度下的特征。结果表明,雨强和坡度对入渗率、径流率、平均泥沙浓度和土壤侵蚀率都有较大影响。径流量和径流率与雨强呈正相关 ($r=0.947, p<0.01$),而与坡度呈负相关关系。入渗率与坡度呈正相关 ($r=0.660, p<0.01$),而与雨强相关性不显著。总产沙量与坡度和雨强之间呈正相关 ($r>0.580, p<0.05$)。径流中的泥沙浓度随着坡度的增大而增加,尤其是在缓坡上表现更为明显。随着降雨时间的延

长,水土流失总体呈先上升后下降的趋势。陡坡上的径流率与侵蚀率之间存在线性关系,而缓坡上表现为幂函数关系。尽管修正后的 RUSLE 模型可以预测土壤侵蚀率,但是在不同的试验条件下侵蚀率被高估或低估了,还需要进行更深入的研究以提供更有用的信息来进行更加精准的模拟预测。总体来说,本研究可为风化花岗岩地区土壤侵蚀和水土流失的控制研究提供有价值的技术支持。

参考文献:

- [1] Liu D, She D, Yu S, et al. Rainfall intensity and slope gradient effects on sediment losses and splash from a saline-sodic soil under coastal reclamation [J]. *Catena*, 2015,128:54-62.
- [2] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. *Nature Communications*, 2013,8(1):1-13.
- [3] Gimenez-Morera A, Ruiz Sinoga J D, Cerda A. The impact of cotton geotextiles on soil and water losses from mediterranean rainfed agricultural land[J]. *Land Degradation & Development*, 2010,21:210-217.
- [4] Golay F, Lachouette D, Bonelli S, et al. Numerical modelling of interfacial soil erosion with viscous incompressible flows [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2011,200:383-391.
- [5] El Kateb H, Zhang H, Zhang P, et al. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: A field experiment in Southern Shaanxi Province, China[J]. *Catena*, 2013,105:1-10.
- [6] Torres A R, de Los Santos V S, Velasco H, et al. Exploring innovative techniques for identifying geochemical elements as fingerprints of sediment sources in an agricultural catchment of Argentina affected by soil erosion [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018,25:20868-20879.
- [7] Assouline S, Ben-Hur A. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing[J]. *Catena*, 2006,66:211-220.
- [8] Cao L, Zhang K L, Dai H, et al. Modeling interrill erosion on unpaved roads in the Loess Plateau of China[J]. *Land Degradation and Development*, 2015,26(8):825-832.
- [9] Koiter A J, Owens P N, Petticrew E L, et al. The role of soil surface properties on the particle size and carbon selectivity of interrill erosion in agricultural landscapes [J]. *Catena*, 2017,153:194-206.
- [10] Ding W F, Huang C H. Effects of soil surface roughness on interrill erosion processes and sediment particle size distribution[J]. *Geomorphology*, 2017,295:801-810.
- [11] Zhang X, Nearing M A, Garbrecht J D. Gaining insights into interrill erosion processes using rare earth element tracers[J]. *Geoderma*, 2017,299:63-72.
- [12] Zhang X, Nearing M A, Miller W P, et al. Modelling interrill sediment delivery[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998,62:438-444.
- [13] Fox D M, Bryan R B. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient[J]. *Catena*, 2000,38:211-222.
- [14] Mahmoodabadi M, Sajjadi S A. Effects of rain intensity, slope gradient and particle size distribution on the relative contributions of splash and wash loads to rain-induced erosion[J]. *Geomorphology*, 2016,253:159-167.
- [15] Wu L, Qiao S S, Peng L L, et al. Coupling loss characteristics of runoff-sediment-adsorbed and dissolved nitrogen and phosphorus on bare loess slope[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018,25:14018-14031.
- [16] 王学强,蔡强国,和继军,等.花岗岩风化壳的层次特性对土壤侵蚀及其防治措施的影响[J]. *亚热带水土保持*, 2008,20(2):20-24.
- [17] 刘希林.全球视野下崩岗侵蚀地貌及其研究进展[J]. *地理科学进展*, 2018,37(3):342-351.
- [18] Lu J, Zheng F, Li G, et al. The effects of raindrop impact and runoff detachment on hill slope soil erosion and soil aggregate loss in the Mollisol region of Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016,161:79-85.
- [19] Fang N, Shi Z, Chen F, et al. Partial least squares regression for determining the control factors for runoff and suspended sediment yield during rainfall events[J]. *Water*, 2015,7:3925-3942.
- [20] Ribolzi O, Patin J, Bresson L M, et al. Impact of slope gradient on soil surface features and infiltration on steep slopes in northern Laos[J]. *Geomorphology*, 2011,127:53-63.
- [21] Kinnell P. The effect of slope length on sediment concentrations associated with side-slope erosion[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000,64:1004-1008.
- [22] Asadi H, Moussavi A, Ghadiri H, et al. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment[J]. *Journal of Hydrology*, 2011,406:73-81.
- [23] Vaezi A R, Ahmadi M, Cerda A. Contribution of raindrop impact to the change of soil physical properties and water erosion under semi-arid rainfalls[J]. *Science of the Total Environment*, 2017,583:382-392.
- [24] 吕喜玺,沈荣明.土壤可蚀性因子 K 值的初步研究[J]. *水土保持学报*, 1992,6(1):63-70.
- [25] Wang B, Zheng F, Roemkens M J M, et al. Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences[J]. *Geomorphology*, 2013,187:1-10.