

不同母质红壤坡面产流产沙特征比较

徐铭泽^{1,2}, 杨洁², 刘窑军², 杨广勇³

(1. 江西农业大学林学院, 南昌 330045; 2. 江西省水土保持科学研究院, 南昌 330029;

3. 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 南昌 330029)

摘要: 采用人工模拟降雨的方法, 研究花岗岩、第四纪红黏土、红砂岩 3 种母质发育的红壤坡面产流产沙特征差异。结果表明: (1) 地表产流方面, 3 种母质红壤地表产流时间为花岗岩红壤 < 红砂岩红壤 < 第四纪红壤, 总径流量和场均产流速率均为花岗岩红壤 > 红砂岩红壤 > 第四纪红壤, 其中 45 mm/h 条件下花岗岩红壤的地表径流量为红砂岩和第四纪红壤的 1.79~2.47 倍, 场均产流速率为后者的 1.58~2.32 倍。(2) 地表产沙方面, 在 45 mm/h 条件下, 场均泥沙浓度为第四纪红壤 > 花岗岩红壤 > 红砂岩红壤; 135 mm/h 条件下, 场均泥沙浓度为花岗岩红壤 > 红砂岩红壤 > 第四纪红壤。雨强对红壤坡面产沙的影响较大, 135 mm/h 条件下的泥沙浓度为 45 mm/h 条件下的 8.31~11.32 倍。(3) 径流组成方面, 3 种母质红壤中壤中流所占径流比最高为第四纪红黏土发育的红壤, 在 2 种雨强条件下为 8%~44%。雨强越大, 地表汇流越明显; 135 mm/h 条件下, 红壤坡面地表径流量可达到总径流的 79%~90%。(4) 壤中流产流方面, 壤中流产流时间顺序与地表产流一致, 均为花岗岩红壤 < 红砂岩红壤 < 第四纪红壤, 花岗岩红壤的壤中流量最小, 仅为第四纪红壤的 53%~67%, 峰值为后者的 42%~52%; 对于红壤而言, 停雨后的壤中流消退过程可以用指数函数方程进行预测, 在所有试验条件下, 其决定系数均在 0.82 以上, 表明具有较好的预测性。

关键词: 成土母质; 红壤; 壤中流; 产流特征

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0034-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.02.005

The Characteristics of Runoff and Sediment Yield of Red Soil Slope with Different Parent Materials

XU Mingze^{1,2}, YANG Jie², LIU Yaojun², YANG Guangyong³

(1. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045; 2. Jiangxi Provincial Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029; 3. Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention, Nanchang 330029)

Abstract: In this paper, the artificial simulated rainfall combined with the indoor backfill soil trough was used to study the difference among the characteristics of the runoff and sediment yield in the red soil slopes with different parent materials: granite, quaternary and red sandstone. Results showed that the order of surface runoff time of the three parent materials was granite < red sandstone < quaternary, averaging runoff rates and the total amount of runoff were granite > red sandstone > quaternary, where the runoff amount of granite red soil under 45 mm/h rainfall was 1.79~2.47 times of those of red sandstone and quaternary, and the averaging runoff rate was 1.58~2.32 times of those of the latter two. Under the rainfall conditions of 45 mm/h, the sediment concentration of the field was the quaternary > granite > red sandstone, while, it was granite > red sandstone > quaternary under 135 mm/h. The rain intensity had a greater influence on the sediment yield of red soil slope, and the sediment concentration under 135 mm/h was 8.31~11.32 times of 45 mm/h. As for the runoff composition, the proportion of interflow in runoff was highest in quaternary red soil among the materials, which was about 8%~44% in the two rain intensities. The larger rain intensity, the more obvious effect of the surface confluence, which could reach up to 79%~90% of the total runoff under 135 mm/h. The runoff time of interflow was same as that of the surface runoff; granite < red sandstone < quaternary, the interflow of granite red soil was smallest, accounting for only 53%~67% of the quaternary, and even 42%~52% at the peak runoff. After the rainfall, the regression of interflow could be predicted by an exponential function, all the decision coefficients were above 0.82 for all conditions, showing a good predictability.

收稿日期: 2017-09-18

资助项目: 国家自然科学基金项目(41361060, 41501287)

第一作者: 徐铭泽(1992—), 男, 湖南常德人, 硕士研究生, 主要从事红壤坡面侵蚀过程研究。E-mail: xzm217@163.com

通信作者: 杨洁(1958—), 女, 教授级高工, 主要从事红壤坡面侵蚀研究。E-mail: zljy@126.com

Keywords: parent material; red soil; interflow; runoff characteristics

红壤是中国南部的地带性土壤,分布面积广泛,是中国重要的土壤资源^[1]。由于红壤性质上的酸、瘦、黏等特点,红壤分布区域降水时空分布的不均匀性以及不合理开发利用造成的水土流失、土壤退化等,导致红壤地区的生态环境恶化,红壤资源潜在的生产能力得不到应有的发挥,使整个地区农业及经济持续发展受到严重影响^[2]。据了解,仅长江上游 35.2 万 km² 水土流失区的土壤流失量就达 15.6 亿 t,年均侵蚀模数达 4 432 t/(km²·a)^[3],说明红壤区的水土流失十分严峻。

多年来,就红壤区的水文过程研究已取得许多成果^[4-7],但大多数研究成果都集中在第四纪红黏土发育的红壤上,其他母质发育的红壤研究涉及较少。在不同

母质红壤的研究中,对土壤性质差异方面的研究报道较为常见^[8-10],成土母质对红壤坡面产流产沙过程的影响研究还需进一步深化。为此,本文拟采用人工降雨模拟试验,比较分析不同母质红壤坡面产流产沙特征差异,为加深红壤区水文过程的认识提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

3种不同母质发育的红壤分别采自江西省德安县第四纪红黏土发育的红壤(编号D)、江西省赣州市红砂岩发育的红壤(编号S)和江西省赣州市花岗岩发育的红壤(编号H)。试验土风干后过5mm筛待用。供试土壤的理化性质见表1。

表1 供试土壤基本理化性质

成土母质	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	机械组成/%		
				2.0~0.05 mm	0.05~0.002 mm	<0.002 mm
D	0.49	0.17	6.29	24.68	56.13	19.19
S	0.09	0.08	7.52	76.27	23.11	0.62
H	0.41	0.10	7.38	72.55	12.38	15.06

1.2 试验土槽与填土

土槽规格为1.5 m×0.5 m×0.5 m(长×宽×深),总计为10个土槽。土槽设置为3个出水口(地表径流、壤中流和底层下渗),底部用软管连接(图1)。土槽底部铺有一层2~5 cm的鹅卵石,以便土体下层水分充分排出。在鹅卵石上铺一层细纱布,防止试验土在水的作用下进入石块间隙,影响排水以及堵住出水口。为保证试验过程中壤中流收集槽内均为侧向移动的壤中流,在紧贴壤中流收集槽上方固定一张规格为0.5 m×0.2 m×0.02 m(长×宽×厚)的铁板,铁板与土槽内壁之间的空隙用玻璃胶填补。土槽内每5 cm填一层试验土,共8层。每一层按照容重1.2 g/cm³的要求压实、平整。填下层前抓毛上层土面,防止土壤分层。整个土槽装土高度为40 cm。

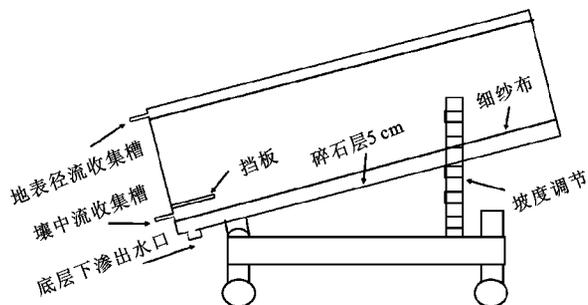


图1 试验土槽的结构示意

1.3 模拟降雨

人工降雨前对土壤进行预湿润,保证土壤的前期含水量一致。先在土槽表面盖上一层细纱布,减少湿润过程对表土面的结构破坏,然后用口径0.5 mm的喷水壶均匀湿润试验土表面,待试验土表面水分入渗

后再次湿润,直到土槽底部两个出水口持续有水滴出为止。预湿润结束后静置24 h排除重力水。模拟降雨之前取表层铝盒样烘干,称重测定土壤前期含水量为(18.4±2.3)%。

试验于2017年4月20日至6月1日在江西省水土保持生态科技园内的降雨大厅进行。每次降雨试验为单次试验,试验完成后把土槽清空,重新填土再降雨。根据研究区近10年的降雨资料,降雨强度设置为45 mm/h和135 mm/h,模拟小、大2种降雨条件,坡度设置为10°。每个条件下重复3次,试验数据取3次平均值。

降雨设备为西安清远测控技术有限公司生产的QYJY—503T降雨器,喷头为垂直下喷式喷头,有效高度18 m,雨强连续变化范围为10~200 mm/h,降雨均匀度>0.8,雨强变化调节时间<30 s。

1.4 取样与分析

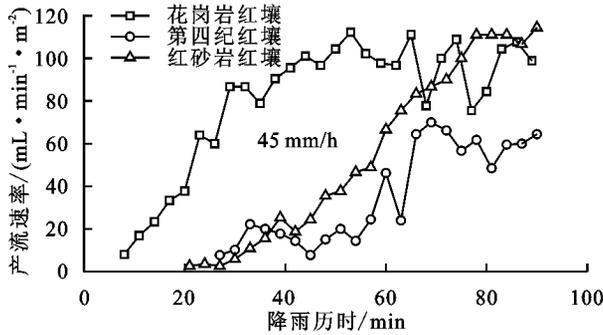
记录地表径流、壤中流、底层渗透初始产流时间,观察坡面的侵蚀产沙过程以及壤中流、底层下渗的出流特征,每3 min采集径流、泥沙样。试验总降雨时长为90 min。降雨结束后,将铝盒中的水沙样静置24 h后,倒掉上层清液,用烘干法测定泥沙量。壤中流水样需要继续收集,时长为停雨后2 h。2 h后换大桶收集剩余的壤中流和底层渗透量,24 h后测量径流尾量。

2 结果与分析

2.1 不同母质发育红壤产流产沙过程

2.1.1 地表产流产沙过程 从图2可以看出,不同母质红壤坡面的地表产流过程在2种雨强条件下表现出明显的区别。45 mm/h条件下,花岗岩红壤产流最

快(约8 min),产流后 50 min 内坡面地表径流增长较快,该阶段的平均产流速率达 $68.5 \text{ mL}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$,50 min 后坡面产流速率稳定在 $98 \text{ mL}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$;红砂岩红壤产流较晚,21~78 min 内地表径流逐渐增加,平均产流速率为 $58.6 \text{ mL}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$,降雨后期坡面产流速率逐渐稳定($110.8 \text{ mL}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$);第四纪红壤产流增长十分缓慢,径流稳定前的平均产流速率为 $20.91 \text{ mL}/$



($\text{min} \cdot \text{m}^2$),仅为花岗岩红壤的 31% 和红砂岩红壤的 36%,稳定后的产流速率在 $60.2 \text{ mL}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$,远低于其他 2 种母质红壤。135 mm/h 条件下,3 种母质红壤的地表产流趋势基本一致,均为快速上升到趋近稳定。花岗岩红壤初始产流速率约为其他 2 种红壤的 1.57~1.63 倍,场均产流速率为花岗岩红壤 > 红砂岩红壤 > 第四纪红壤。

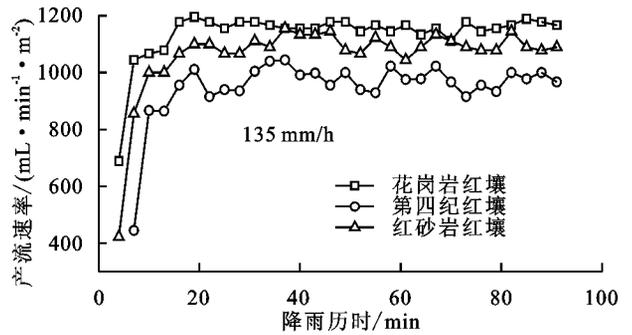
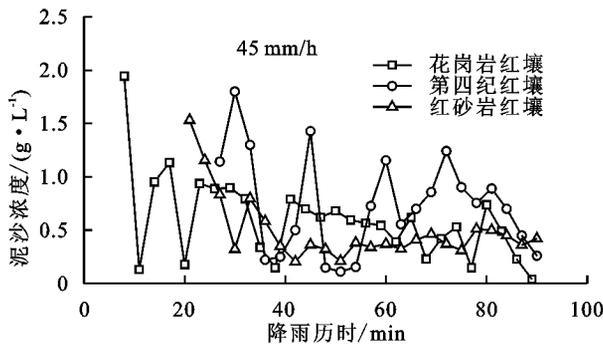


图 2 地表产流过程线

从图 3 可以看出,45 mm/h 条件下的红壤坡面场均泥沙浓度较小,仅为 $0.37 \sim 0.76 \text{ g}/\text{L}$,说明该条件下的坡面侵蚀程度较弱。从产沙过程线来看,泥沙浓度呈先上下波动后逐渐稳定的趋势,这是由于产流初期红壤坡面的径流量和产流速率相对较小,坡面的径流通过蓄积、汇流形成水流通路,集中对泥沙进行运输。3 种母质红壤中,场均泥沙浓度为第四纪红壤 > 花岗岩红壤 > 红砂岩红壤,其中第四纪红壤坡面的泥沙浓度极不稳定,波动最大。



相比 45 mm/h 降雨强度,135 mm/h 降雨下的红壤坡面场均泥沙浓度增大 8.3~11.3 倍,约为 $4.57 \sim 7.07 \text{ g}/\text{L}$,说明雨强与坡面产沙呈正相关。从图 3 产沙过程线可知,3 种母质红壤的泥沙浓度最大值均出现在降雨初期,随着降雨历时延长,坡面泥沙浓度逐渐降低,60 min 后基本达到稳定。3 种母质红壤场均泥沙浓度为花岗岩红壤 > 红砂岩红壤 > 第四纪红壤,花岗岩红壤场均泥沙浓度为第四纪红壤场均泥沙浓度的 1.76 倍。

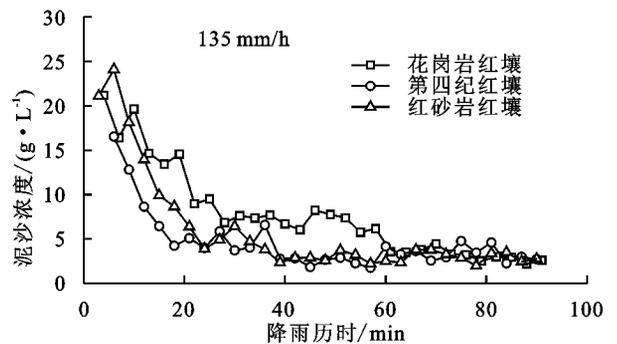


图 3 地表产沙过程线

2.1.2 壤中流产流过程 2 种雨强下的红壤壤中流产流过程均为单峰型(图 4),趋势基本一致。在 45 mm/h 降雨条件下,第四纪和红砂岩红壤壤中流产流速率在降雨初期(45 min 内)增长非常快,其平均值为花岗岩的红壤的 2.33~2.17 倍。45 min 后壤中流出流逐渐稳定,壤中流峰值表现为第四纪红壤 > 红砂岩红壤 > 花岗岩红壤,其中花岗岩红壤峰值仅为第四纪和红砂岩的 42%~47%。

雨强为 135 mm/h 时,不同成土母质红壤壤中流量和产流速率均有不同程度的降低。其中花岗岩红壤壤中流产流速率受雨强的影响最小,2 种雨强条件下的壤中流量差值为 8%。红砂岩红壤的壤中流过程线变化最大,场均产流速率下降了 52%,壤中流峰

值仅为 45 mm/h 条件下峰值的 36%。

2.1.3 底层下渗过程 在 45 mm/h 降雨条件下,3 种母质红壤底层下渗在初始产流时间和初始产流量方面比较接近,第四纪红壤前期产流速率(60 min 前)明显高于花岗岩和红砂岩红壤。底层渗透量峰值表现为第四纪红壤 > 红砂岩红壤 > 花岗岩红壤,第四纪红壤峰值为后者的 1.35,1.46 倍(图 5)。

从图 5 还可以看出,135 mm/h 降雨条件下,不同母质红壤底层下渗过程线分异更加明显,第四纪红壤底层下渗量要远高于其他 2 种红壤,是红砂岩红壤和花岗岩红壤的 4.98 倍和 5.63 倍,峰值为红砂岩红壤和花岗岩红壤的 3.32 倍和 2.62 倍。

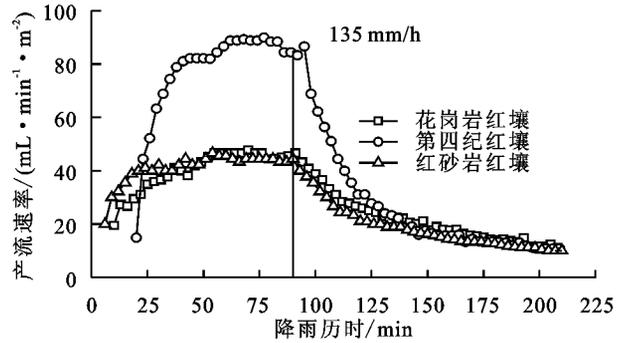
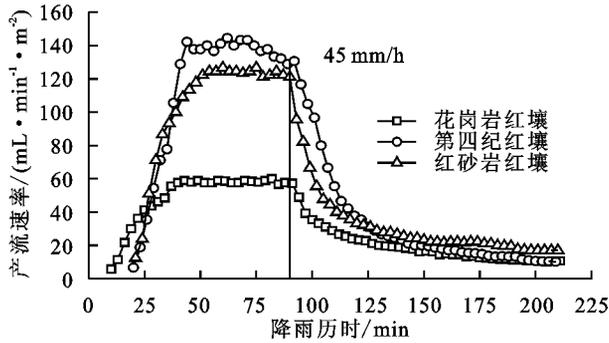


图 4 壤中流产流过程线

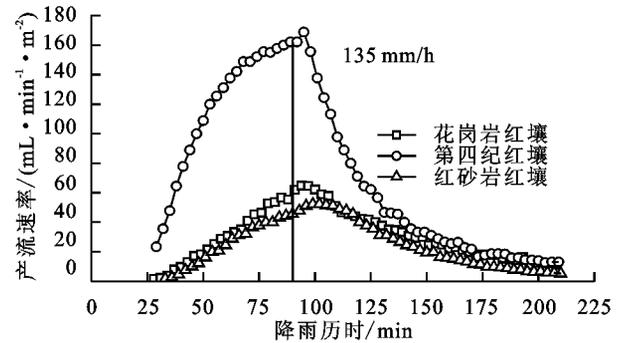
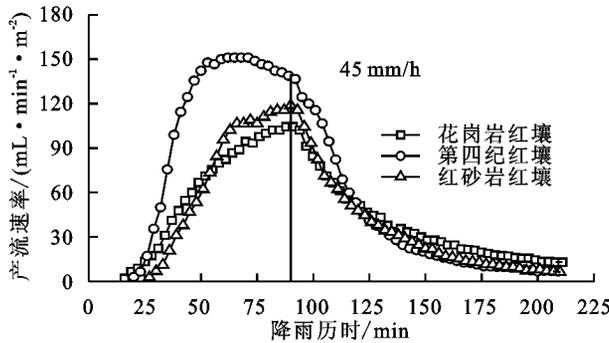
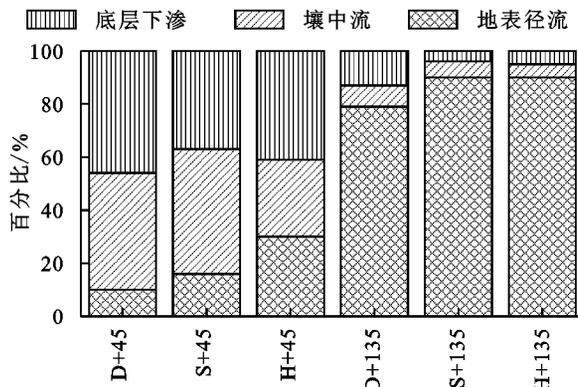


图 5 底层下渗过程线

2.2 不同母质发育红壤产流特征比较

2.2.1 坡面径流组成比较 径流组成是反映不同母质红壤水文过程的重要参数,不同母质红壤由于其土壤性质的差异,对降雨过程的响应不一。从图 6 可以看出,花岗岩由于其砂粒含量高,透水性强,地表径流量所占比例最高,为 30%~90%;第四纪红黏土发育红壤质地黏重,有利于壤中流的发育,其壤中流所占比例在 3 种母质红壤中最高,为 8%~44%。



注: D+45、S+45、H+45 分别表示在降雨强度 45 mm/h 的第四纪红壤、红砂岩红壤、花岗岩红壤, D+135、S+135、H+135 分别表示在降雨强度 135 mm/h 的第四纪红壤、红砂岩红壤和花岗岩红壤。

图 6 不同成土母质红壤径流组成

就红壤而言,雨强对坡面径流组成的影响十分明显。45 mm/h 降雨条件下红壤坡面壤中流和底层下渗量所占比例较高,地表径流量仅为 10%~30%; 135 mm/h 降雨条件,红壤坡面地表径流可达总径流量的 79%~90%。说明小雨强条件有利于红壤坡面的水分入渗,促进壤中流流出。

2.2.2 壤中流消退过程及预测 降雨后的退水过程是水文过程的重要组成部分,而壤中流不同于地表径流,消退过程历时较长。由图 4 可知,红壤壤中流消退过程总体上呈从大到小的变化趋势,停雨后 30 min 内红壤的壤中流消退速率较大,30 min 后壤中流消退速率逐渐减小,消退过程较为缓慢。不同母质间红壤壤中流消退过程在降雨后 30 min 内区别较大,以第四纪红壤的壤中流消退速率最大,30 min 后消退速率较为接近,无明显区别。

通过对停雨后的壤中流出流量进行回归分析,表明消退过程可采用指数函数关系表示,随着时间延长,壤中流量呈指数函数关系递减,关系式为:

$$V_{SSF} = ae^{(bt)}$$

式中: V_{SSF} 为壤中流量 (mL); t 为停雨后的产流时间 (min), 雨停时间重置为 0 min, 再开始计时; a 和 b 为拟合参数。表 2 为不同雨强和红壤类型下预测方程参数及决定系数,所有试验条件下,决定系数均在 0.82 以上,显示了较好的预测性能。对于不同母质发育的红壤来看,方程对花岗岩发育的红壤壤中流消退过程预测精度最高,决定系数达 0.92 以上。

表 2 预测方程参数及决定系数

红壤类型	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	方程变量		决定系数
		a	b	
花岗岩红壤	45	166.89	-0.01	0.93
	135	175.85	-0.01	0.96
第四纪红壤	45	360.28	-0.02	0.90
	135	260.79	-0.02	0.89
红砂岩红壤	45	244.19	-0.01	0.83
	135	151.45	-0.01	0.95

从图 7 可以看出,整体而言,在雨停 30 min 内,壤中流预测值与实测值差异较大,呈“S”形变化,初期几分钟

内偏高然后转而偏低;雨停 30 min 后,预测值与实测值吻合度高,可以较好地预测壤中流的消退过程线。

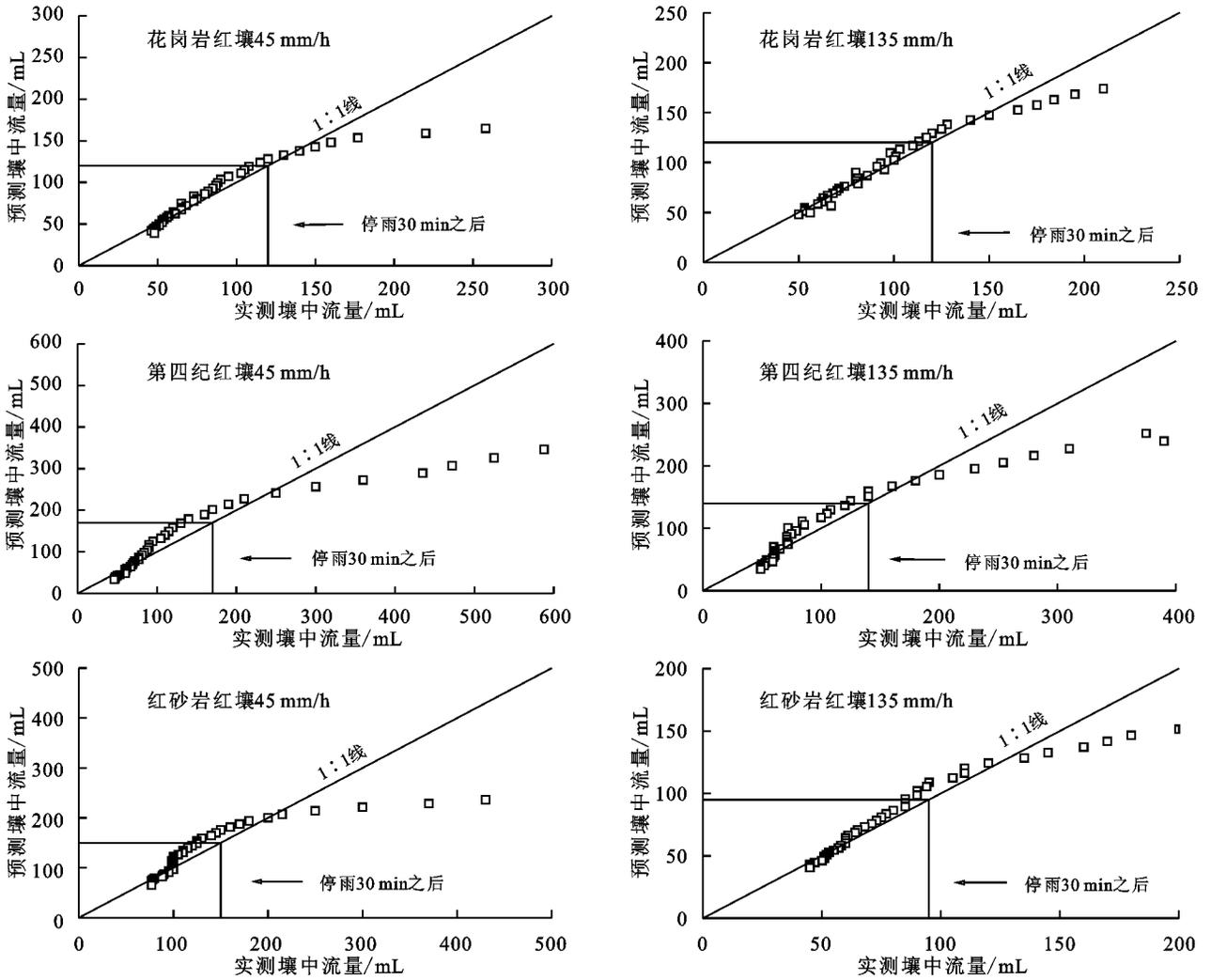


图 7 不同母质类型红壤壤中流消退过程预测

3 讨论

3.1 成土母质对地表产流产沙的影响

由表 3 可知,黏粒、粉粒含量越高,土壤质地越黏重的红壤类型地表产流越慢,这是由于花岗岩和红砂岩红壤砂粒含量高(表 1),初始入渗率大于第四纪红壤,产流前的入渗过程相对更短^[11],导致坡面产流时

间更快;对比地表径流量发现,花岗岩红壤高于其他 2 种母质红壤,原因可能为:一是表土发生结皮促进了产流;二是雨滴打击导致表土大颗粒破碎,阻塞了部分大孔隙,影响入渗;三是降雨对表土的压实作用。在试验过程中,3 种母质红壤均存在不同程度的结皮,且结皮特点不一^[12-14],说明表土结构变化对坡面产流有一定的影响。

表 3 不同母质红壤产流特征

成土母质	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	地表产流			壤中流			底层渗透		
		产流 时间/s	总流量/ L	峰值/ mL	产流 时间/s	总流量/ L	峰值/ mL	产流 时间/s	总流量/ L	峰值/ mL
D	45	1627	4.12	315	1200	18.18	640	1200	18.91	680
S	45	1263	7.69	515	1260	16.75	570	1620	13.23	535
H	45	480	10.18	505	622	9.65	270	960	13.98	470
D	135	360	123.97	4700	1210	13.10	405	1740	20.23	760
S	135	180	143.20	5200	360	8.66	210	1980	6.64	235
H	135	240	153.58	5380	608	8.83	210	1680	8.40	292

图 3 中小雨强条件下第四纪红壤泥沙浓度最高,而大雨强条件下第四纪红壤泥沙浓度最低,主要与土

壤性质和径流量有关。小雨强条件下,地表径流对土壤的剥蚀能力弱,只能裹挟较为细小的颗粒,所以侵

蚀泥沙颗粒以黏粒为主^[15]。由于第四纪红壤黏粒、粉粒含量较高,坡面可搬运的物质多,所以该条件下的泥沙浓度较高;当雨强增大时,径流在极短时间内把原有的细小颗粒带离坡面,后续产沙依靠雨滴打击破碎和径流分离不断形成新的可搬运物质,所以在产沙过程线中表现为从高到低的趋势。3种母质红壤中,第四纪红壤团聚体稳定性最高,土壤颗粒不容易被雨滴和径流分散,产生的物质较少,所以泥沙浓度最低;而花岗岩和红砂岩红壤,由于其本身结构较差,在大雨强条件下容易发生土壤分离,泥沙浓度较高。

3.2 成土母质对壤中流产流的影响

土壤饱和导水率越小,水分下渗速度越慢,多余的水分越容易在土层间滞留,进一步形成侧向壤中流。一般来说,排除容重等因素的影响,黏粒含量越高、质地越细的土壤饱和导水率越小^[16]。由表3可知,第四纪红壤壤中流无论是总量还是峰值都大于其他2种母质红壤,说明土壤的饱和导水率与壤中流量存在负相关;对同一厚度的土壤,饱和导水率大的土壤更快达到水分饱和,壤中流产流时间更快。

有研究表明,第四纪红黏土发育的红壤土壤颗粒由 Fe^{+} 、 Al^{+} 胶结而成,物理性质更接近于砂粒,其透水性较强,与花岗岩红壤类似^[17-18]。从试验结果来看,第四纪红壤壤中流量和底层下渗量远高于其他母质红壤,说明其透水性更强。李成亮等^[17]认为红砂岩红壤的持水性较差,对水的吸附能力较弱。但从试验结果来看,45 mm/h条件下的红砂岩红壤壤中流量和峰值相对较高,与第四纪红黏土发育的红壤接近。当雨强增加到135 mm/h时,红砂岩红壤壤中流量显著降低,与花岗岩红壤接近,这可能是由于红砂岩红壤由于其黏粒含量极低(表1)且土壤结构差,在大雨强条件下表土结构被破坏,导致入渗量降低。

4 结论

3种母质红壤中花岗岩红壤初始产流时间最早,产流速率、径流量最大,其产流强度高于其他2种母质红壤。产沙方面,2种雨强下产沙规律不显著,表土结构变化对红壤坡面产沙过程影响很大。第四纪红黏土发育的红壤壤中流发育特征明显,其壤中流量、峰值显著高于其他2种母质红壤。雨强与壤中流出流量存在负相关,随着雨强的增大,3种母质发育的红壤壤中流量均有不同程度的下降。对红壤而言,停雨后的壤中流消退过程可以用指数函数方程进行预测,在所有试验条件下,其决定系数在0.82以上,表明具有较好的预测性。不同成土母质发育的红壤在径流组成上分异明显,花岗岩发育的红壤地表径流比例高,易加剧红壤坡面的水土流失;第四纪红黏土

发育的红壤壤中流和底层下渗量比例高,应重视壤中流出流对红壤坡面水文过程的影响。

参考文献:

- [1] 谢小立,王凯荣.红壤坡地雨水产流及其土壤流失的垫面反应[J].水土保持学报,2002,16(4):37-40.
- [2] 赵其国,黄国勤,马艳芹.中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J].生态学报,2013,33(24):7615-7622.
- [3] 梁音,张斌,潘贤章,等.南方红壤丘陵区水土流失现状与综合治理对策[J].中国水土保持科学,2008(1):22-27.
- [4] 彭娜,谢小立,王开峰,等.红壤坡地降雨入渗、产流及土壤水分分配规律研究[J].水土保持学报,2006,20(3):18-20.
- [5] 尹忠东,左长清,高国雄,等.江西红壤缓坡地壤中流影响因素分析[J].西北林学院学报,2006,21(5):1-6.
- [6] 谢颂华,莫明浩,涂安国,等.自然降雨条件下红壤坡面径流垂向分层输出特征[J].农业工程学报,2014,30(19):132-138.
- [7] 王峰,沈阿林,陈洪松,等.红壤丘陵区坡地降雨壤中流产流过程试验研究[J].水土保持学报,2007,21(5):15-18.
- [8] 孙佳佳,王培,王志刚,等.不同成土母质及土地利用对红壤机械组成的影响[J].长江科学院院报,2015,32(3):54-58.
- [9] 王艳玲,王燕,李凌宇,等.成土母质与利用方式双重影响下红壤团聚体的组成特征与稳定性研究[J].土壤通报,2013,44(4):776-785.
- [10] 于寒青,孙楠,吕家珑,等.红壤地区3种母质土壤熟化过程中有机质的变化特征[J].植物营养与肥料学报,2010,16(1):92-98.
- [11] 余长洪,李就好,陈凯,等.强降雨条件下砖红壤坡面产流产沙过程研究[J].水土保持学报,2015,29(2):7-10.
- [12] Zhang X C, Friedrich J M, Nearing M A, et al. Potential use of rare-earth oxides as tracers for soil erosion and aggregation studies[J]. Soil Science Society of America Journal,2001,65:1508-1515.
- [13] 李朝霞,王天巍,史志华,等.降雨过程中红壤表土结构变化与侵蚀产沙关系[J].水土保持学报,2005,19(1):1-4.
- [14] 蔡崇法,丁树文,张光远.花岗岩红壤表土特征及对坡面侵蚀影响的研究[J].水土保持研究,1996,3(4):111-115.
- [15] 杨伟,张琪,李朝霞,等.几种典型红壤模拟降雨条件下的泥沙特征研究[J].长江流域资源与环境,2016,25(3):439-444.
- [16] 方莹,陈效民,张佳宝,等.红壤地区典型农田土壤饱和导水率及其影响因素研究[J].灌溉排水学报,2008,27(4):67-69.
- [17] 李成亮,何园球,熊又升,等.4种不同母质发育的红壤水分状况研究[J].土壤,2004,36(3):310-317.
- [18] 陆景冈,娄国强,何振立,等.红壤结构的稳定性及其在土壤分类上的意义[J].土壤学报,1986(3):212-219.