

# 雨强对华北土石山区坡面侵蚀及其颗粒富集过程的影响

薛孟君, 马 岚, 张 栋, 梅雪梅, 孙一惠, 陈佩岩

(北京林业大学水土保持学院, 北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 为研究雨强对华北土石山区坡面侵蚀过程和泥沙颗粒分布规律的影响, 采用室内人工模拟降雨试验, 以华北土石山区 2 种典型土壤为研究对象, 在 4 种雨强 (30, 60, 90, 120 mm/h) 条件下, 分析了径流的变化过程和侵蚀泥沙的颗粒组成及其颗粒富集率的变化规律。结果表明: (1) 随着雨强从 30 mm/h 增大至 120 mm/h, 黄土性褐土和石灰性褐土的产流时间均逐渐减小, 分别缩短了 79% 和 85%; (2) 在 60, 90, 120 mm/h 雨强条件下, 黄土性褐土的径流强度和泥沙浓度均随降雨时间先减小后增大, 而后趋于稳定状态, 石灰性褐土仅在 120 mm/h 雨强条件下出现相似规律; (3) 当雨强从 30 mm/h 增大至 120 mm/h, 黄土性褐土泥沙流失朝粗颗粒化发展, 侵蚀泥沙的砂粒和粗粉粒含量分别增加了 86% 和 21%, 而石灰性褐土的变化不明显; (4) 在降雨初始阶段, 粒径较小的黏粒和细粉粒明显富集, 而粒径较大的粗粉粒和砂粒不易流失, 但随着降雨历时的延长, 不同粒径泥沙颗粒的富集率趋于 1, 这种现象在大雨强下表现得尤为明显。

**关键词:** 人工模拟降雨; 华北土石山区; 雨强; 侵蚀泥沙; 富集率

**中图分类号:** S157.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2017)04-0011-07

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.04.003

## Effects of Rainfall Intensity on Slope Erosion and Sediment Particles Enrichment Process in the Rocky Mountain Area of North China

XUE Mengjun, MA Lan, ZHANG Dong, MEI Xuemei, SUN Yihui, CHEN Peiyan

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

**Abstract:** In order to research the impact of rainfall intensity on slope erosion process and distribution of sediment particles in the rocky mountain area of North China, two typical soils from this area were selected, and the variation of runoff, the composition of particles and the enrichment rate of particles in erosion sediment were analyzed under 4 different rainfall intensities (30, 60, 90, and 120 mm/h) through rainfall simulation experiments in laboratory. The results were as follows: (1) With the rainfall intensity increased from 30 mm/h to 120 mm/h, the time producing runoff decreased by 79% and 85% for the loess cinnamon soil and calcic cinnamon soil, respectively; (2) Under the 60, 90, and 120 mm/h rainfall intensity, runoff intensity and sediment concentration of the loess cinnamon soil decreased first and then increased with rainfall time extending, and then tended to be stable, while runoff intensity and sediment concentration of calcic cinnamon soil appeared similar trend only under 120 mm/h rainfall intensity; (3) When the rainfall intensity increased from 30 mm/h to 120 mm/h, the content of coarse particle increased in the lost sediment for the loess cinnamon soil, and the contents of sand and coarse silt increased by 86% and 21%, respectively. However, there was no obviously change for the calcic cinnamon soil; (4) In the initial stage of rainfall, the clay and fine silt enriched obviously, and the coarse silt and sand were not easy to be lost, while with the extending of rainfall the enrichment rate of different sediment particles gradually approached to 1, especially under heavy rain.

**Keywords:** simulated rainfall; the rocky mountain area of North China; rainfall intensity; erosion sediment; enrichment rate

我国华北土石山区, 土壤层较薄且石砾含量较多, 土壤表层多为淋溶褐土, 下层多为渗透性较差的基岩, 土壤侵蚀后生态环境急剧恶化且不易恢复<sup>[1]</sup>,

加之近年来该区受季风气候的影响, 降雨季节发生高强度暴雨的几率增加, 导致该区易产生侵蚀性的降雨径流, 使地表土粒产生位移和搬运<sup>[2]</sup>。因此, 华北土

石山区坡面侵蚀研究备受关注。土壤流失的颗粒特征不仅是坡面侵蚀模型中水流挟沙力计算的重要参数,也是土壤养分流失的重要载体,开展该方面的研究对于坡面侵蚀和面源污染模型构建均具有重要意义。目前,有研究者在北京市延庆县上辛庄通过恒流放水冲刷试验研究植被密度对坡面流泥沙颗粒的分选特性<sup>[3]</sup>,但实际上,坡面侵蚀大多发生在降雨期间,因此降雨影响下的侵蚀泥沙粒径分选性更值得关注;还有学者研究雨滴击溅对北京褐土坡面侵蚀泥沙的分离贡献,研究得出坡面产流前雨滴击溅对土壤的分离贡献比占总分离程度的 28.09%<sup>[4]</sup>。以上研究多以北京山区石灰性褐土为研究对象,在研究其侵蚀规律和颗粒迁移方面取得了突出成绩,但华北土石山区由于成土因素复杂,形成了多种多样的土壤类型<sup>[5]</sup>,有关侵蚀泥沙颗粒组成的研究发现,土壤质地是影响泥沙颗粒组成的主要内在因素<sup>[6]</sup>。因此,为了进一步深入研究该区域在不同雨强下坡面径流和雨滴扰动对坡面侵蚀泥沙粒径分选性的影响,需要对不同质地土壤进行对比研究,故本文在现有研究成果的基础上,选取华北土石山区两种典型母质发育形成的褐土为研究对象,通过人工模拟降雨试验,分析不同降雨强度下两种土壤的产流产沙情况及侵蚀泥沙的颗粒分布特征,以此来揭示侵蚀泥沙的颗粒富集、分选规律,以期为该区域土壤侵蚀模型的建立奠定基础,为水土流失的治理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验土壤

选取华北土石山区 2 种典型母质发育形成的褐土:石灰岩母质发育的褐土和次生黄土母质发育的褐土进行模拟降雨试验,土壤的基本性质见表 1。其粒径采用 MS 2000 型激光粒度分析仪测定。

表 1 土壤基本性质

试验土壤	容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	机械组成/%			
		0~2 $\mu\text{m}$	2~20 $\mu\text{m}$	20~50 $\mu\text{m}$	>50 $\mu\text{m}$
黄土性褐土	1.33	14.22	58.00	20.57	7.21
石灰性褐土	1.29	9.51	57.16	24.82	8.51

### 1.2 试验装置

模拟降雨试验于 2016 年 7—9 月在北京市鹫峰试验林场首都圈森林生态系统国家定位观测研究站人工模拟降雨大厅进行,试验装置由人工降雨系统、坡地试验系统、试验控制系统、供水系统四个部分组成。有效降雨高度 12 m,可以使模拟降雨的雨滴终点速度接近自然降雨,采用旋转下喷式喷头模拟自然降雨,降雨均匀度大于 0.85,可以模拟小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨和特大暴雨(雨强 10~300 mm/h)。试验土槽为大型变坡钢槽,长 10 m,宽 3 m,深 0.6

m,采用金属隔板将土槽按 1.5 m 宽分成两个槽,分别装入一种土壤。

### 1.3 试验设计

近年来以短历时、高强度为主的大暴雨在华北局部地区多次出现,如 2011 年 6 月 23 日和 2012 年 7 月 21 日的暴雨事件,北京地区最大降雨强度分别达到 128 mm/h 和 100 mm/h<sup>[7]</sup>,因此,本文试验设计的 4 种人工模拟降雨强度分别为 30,60,90,120 mm/h。华北土石山区以山地丘陵地貌为主,在该地区 <15° 的坡地适宜进行耕作活动<sup>[8]</sup>,坡耕地约占总耕地面积的 25%<sup>[9]</sup>,因此坡耕地是该地区水土流失的主要源地,本次试验过程中根据实际条件的限制,坡度设置为 9°。前人的研究发现<sup>[10-12]</sup>,在 90 mm/h 雨强条件下降雨历时 60 min,坡面的细沟状态已基本稳定,本试验考虑在 4 种雨强降雨量一致的条件下,讨论雨强对坡面侵蚀的影响,因此设计降雨量均为 90 mm,故 30,60,90,120 mm/h 雨强下的降雨历时分别为 180,90,60,45 min。

试验前将从野外实地取的土壤自然风干,为了使土样颗粒组成相互之间有可比性,将两种土壤过 10 mm 筛,填土之前先在土槽底部填入 10 cm 厚的细沙,并在细沙上铺透水的细纱布,以达到试验土层的透水状况接近自然坡面。然后将试验用土采用分层填土的方法,每次填 10 cm,总共装土厚度为 40 cm,黄土性褐土坡面在沙层之上分两层,一层模拟犁底层,深度为 20 cm,土壤容重为 1.41 g/cm<sup>3</sup>;在此层以上模拟耕层,深度为 20 cm,土壤容重为 1.33 g/cm<sup>3</sup>,而石灰性褐土坡面犁底层土壤容重为 1.35 g/cm<sup>3</sup>,耕层土壤容重为 1.29 g/cm<sup>3</sup>,使其和自然耕地表层土的土壤容重相当。装土时尽量保证土面平整,且每层装完要在表面制造一定的粗糙度,防止土层之间发生滑坡。每次正式降雨之前,采用 25 mm/h 雨强进行前期降雨至坡面产流为止,前期降雨后用塑料布覆盖并静止 24 h,使水分自由下渗以接近自然状态下土壤水分分布状态,同时保证了同一种土壤坡面在正式降雨前土壤水分状况基本一致。

降雨过程中,开始产流后前 20 min,由于径流变化幅度较大,每隔 1 min 在土槽出口处用塑料桶接一组径流样,20 min 后径流变化相对不大,每隔 4 min 接一组径流样。同时用染色剂法测定坡面流速,并用数码照相机在坡面开始出现跌坎以后,每隔 5 min 拍照一次,记录坡面细沟的演变过程。针对每组径流样,测量其体积,用烘干法测定泥沙量,烘干的侵蚀泥沙样品先过 2 mm 筛,再通过 MS 2000 型激光粒度分析仪(0.01~2 000  $\mu\text{m}$ )测定其颗粒特征。颗粒按美国制分 6 个粒级<sup>[13]</sup>,分别为:石砾(>2 mm)、粗砂粒(2~0.25 mm)、细砂粒(0.25~

0.05 mm)、粗粉粒(0.05~0.02 mm)、细粉粒(0.02~0.002 mm)、黏粒(<0.002 mm)。

降雨结束后,取出坡面表层 20 cm 厚的湿土进行晾晒,由于土槽无法移动,土槽内剩余的 20 cm 厚的湿土需要晾晒 7 天左右才能再次填装上面 20 cm 厚的干土进行下一场降雨试验,故一场降雨试验的周期一般为 8 天左右。考虑到次降雨试验工作量太大,所以没有设计重复试验,导致在 4 种不同雨强下完成两种土壤的对比研究,共需要进行 8 场人工模拟降雨试验。

1.4 数据处理与分析

为了深入研究坡面侵蚀过程以及泥沙颗粒的分布特征,本研究通过侵蚀泥沙颗粒的富集率( $ER_i$ )来表征在侵蚀过程中不同粒级颗粒被迁移的难易程度<sup>[14]</sup>。某一粒级的富集率( $ER_i$ )用(1)式进行计算。

$$ER_i = S_i^* / S_i \tag{1}$$

式中: $ER_i$  为第  $i$  个粒级的富集率; $S_i^*$  和  $S_i$  分别为侵蚀泥沙和试验土壤中第  $i$  个粒级所占的重量百分比。当  $ER_i > 1$  时,侵蚀过程中某一粒级的泥沙颗粒比原试验土壤中的比例高,说明在侵蚀过程中此粒级的泥沙颗粒在侵蚀泥沙中富集; $ER_i < 1$ ,说明此粒级的泥沙颗粒在侵蚀泥沙中含量减少。

试验数据采用 Excel 2013 进行统计分析,采用 Origin 8.0 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同雨强下土壤侵蚀变量的响应

两种土壤在不同降雨强度下的模拟降雨试验结果见表 2。从表 2 可以看出,两种土壤从开始降雨到产流所经历的时间(产流时间)均随着雨强的增大逐

渐变小,黄土性褐土在 120 mm/h 雨强下的产流时间比在 30 mm/h 雨强下缩短了 79%,而石灰性褐土在相同条件下其产流时间缩短了 85%。在同一降雨强度下,黄土性褐土坡面产流时间比石灰性褐土短(除 120 mm/h 雨强下),但黄土性褐土坡面径流强度(除 30 mm/h 雨强下)、径流系数(除 30 mm/h 雨强下)、泥沙浓度、侵蚀速率均高于石灰性褐土。两种土壤在试验条件下所表现出来的差异,可能与土壤自身结构及降雨强度有很大的关系。坡面产流时间主要是由土壤含水率、土壤结皮、降雨强度和坡面地貌形态等因素共同决定。坡面黏粒含量对土壤结皮有促进作用,黏粒含量越多,在降雨过程中土壤结皮就越早,降低了坡面水分的入渗<sup>[15]</sup>。从表 1 可知,黄土性褐土的黏粒含量为 14.22%,而石灰性褐土的黏粒含量为 9.51%,前者是后者的 1.5 倍,导致在相同降雨强度下黄土性褐土坡面产流时间比石灰性褐土短。王剑<sup>[16]</sup>在研究长武黑垆土和绥德黄绵土(前者的黏粒含量是后者的 1.8 倍)的侵蚀产沙过程时也发现,两种土壤在相同降雨条件下前者的产流时间同样也比后者短。随着雨强增大,雨滴动能对坡面土壤击溅能力增强,产生更多细小颗粒容易阻塞土壤孔隙使坡面结皮更容易出现,同时坡面单位面积时间接受的降雨量增大,因此坡面产流所需时间必然缩短。两种土壤受坡面入渗条件的影响,在大雨强条件下,黄土性褐土坡面径流量增大,坡面容易产生细沟,使坡面面状水流逐步汇聚成线状水流,细沟径流对坡面土壤的侵蚀、搬运能力迅速增大,致使该坡面的径流强度、泥沙浓度等均高于石灰性褐土坡面。

表 2 模拟降雨条件下两种土壤的侵蚀变量响应

土壤类型	降雨强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	产流时间/ min	径流强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	径流 系数/%	泥沙浓度/ (g·L <sup>-1</sup> )	侵蚀速率/ (g·min <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> )
黄土性褐土	30	12.87	21.48	68.55	37.59	12.86
	60	7.03	47.91	73.90	32.74	25.82
	90	3.10	77.85	82.76	110.61	140.48
	120	2.68	105.74	83.62	93.03	158.35
石灰性褐土	30	17.63	22.22	69.40	24.30	8.18
	60	7.27	46.17	71.77	17.01	11.65
	90	3.52	70.98	74.66	25.60	26.68
	120	2.62	104.73	82.51	78.50	131.00

2.2 不同雨强下土壤侵蚀的动态变化过程

径流强度和泥沙浓度随时间的变化过程,可以从一个方面反映土壤侵蚀的动态变化过程。两种土壤的径流强度和泥沙浓度随时间的动态变化过程见图 1 和图 2。总体上,两种土壤的径流强度在不同的降雨强度下表现出一致的规律:随着降雨的进行,径流强度先增加,而后达到稳定状态。不同的是,在 30, 60 mm/h 雨强下,对于黄土性褐土,在产流后的 5~10 min,径流强度就已达到稳定状态(图 1),而石灰

性褐土的径流强度随时间缓慢增加,而后达到稳定状态(图 2)。黄土性褐土的径流强度随降雨时间迅速增加,可能是由于土壤的黏粒含量高,一方面有助于土壤表面结皮的形成,使得在降雨开始以后,坡面的径流强度迅速增加;另一方面有助于土体稳定,使得径流过程也较为稳定。而石灰性褐土的黏粒含量相对较少,入渗性能较好,使得坡面的径流强度增加缓慢,同时黏粒含量少导致土体稳定性差,发生偶然事件的机率增加,随之引起径流过程出现较大变化。随

着雨强的增大,降雨过程中出现细沟侵蚀,对土壤表面形成的结皮造成很大破坏,导致径流强度随时间波动性较大。

在不同的降雨强度下,两种土壤的泥沙浓度均表现出不同的变化趋势。黄土性褐土坡面在 30 mm/h 雨强下,泥沙浓度在产流刚开始达到最大值,随后逐渐降低,最终达到稳定状态;在 60, 90, 120 mm/h 雨强下,随着降雨的进行,泥沙浓度的变化趋势和径流强度相同,均随时间先减小后增大,而后趋于稳定状态;而石灰性褐土坡面仅在 120 mm/h 雨强下才会出现泥沙浓度和径流强度随时间变化趋势相同的现象。两种土壤在不同雨强下所表现出来的差异可能与坡面出现的细沟侵蚀有很大关系。在整个降雨过程中,通过仔细观察坡面在降雨初期产生的跌坎,当这些跌坎后壁有明显溯源侵蚀发展时,说明坡面细沟在这个时间段产生<sup>[17]</sup>。正如表 1 所示,黄土性褐土的黏粒含量是石灰性褐土的 1.5 倍,坡面黏粒含量越高,坡面水分的入渗能力就越低,导致坡面的径流量就越大,这两种土壤在相同的降雨条件下,黄土性褐土坡面径流剥蚀土壤和携带泥沙能力强,对于出现跌坎的坡面,跌坎发生溯源侵蚀的可能性增大。另外,随着雨强的增大,一方面由于雨滴击溅和径流冲刷作用坡面出现的跌坎数增多;另一方面由于坡面径流汇集能力增强,径流动能增大,因此结合已拍摄的照片发现,黄土性褐土坡面在 60 mm/h 雨强条件下降雨 35 min 左右就出现了明显细沟,在 90, 120 mm/h 两种雨强

条件下分别在降雨 15 min 和 10 min 均出现了明显细沟,而石灰性褐土坡面在 30, 60, 90 mm/h 雨强条件下在整个降雨过程中仅在坡面中下部出现了零星跌坎,只有在 120 mm/h 雨强条件下降雨 18 min 左右坡面才出现明显细沟。坡面侵蚀从面蚀发展到细沟侵蚀对泥沙浓度的影响至关重要<sup>[18]</sup>,细沟的产生导致坡面水流速度增加,进而增加土壤的分离能力。在本研究所进行的模拟降雨试验中,细沟产生以后,泥沙浓度均表现出随降雨时间逐渐增加的趋势,这个结论与 Shi 等<sup>[19]</sup>的结论相一致。

然而本研究结果与 Martinez-Mena 等<sup>[20]</sup>的结论相矛盾,其指出在大降雨强度下,产流开始几分钟内泥沙浓度最高,随后会逐渐降低,最终处于稳定状态;而在小降雨强度下,泥沙浓度和径流强度变化趋势大致相同,均随着降雨时间逐渐增大,最后趋于稳定状态。这种差异的产生可能与试验过程中坡面的侵蚀形态有关, Martinez-Mena 等在试验中使用的是规格为长 2 m, 宽 1 m 的土槽,一方面在这种规格的土槽里做降雨试验,限制其产流产沙过程的主要因素可能会被突显出来,在大雨强条件下,由于坡面径流对雨滴的阻挡,使得限制泥沙分离机制成为影响坡面产流产沙的主导因素,而在小雨强条件下,由于坡面径流搬运泥沙的能力较弱,使得限制运输机制成为影响坡面产流产沙的主导因素;另一方面由于小尺寸土槽导致试验过程中细沟产生不太明显,并且产生的边缘效应也可能会对试验结果产生影响。

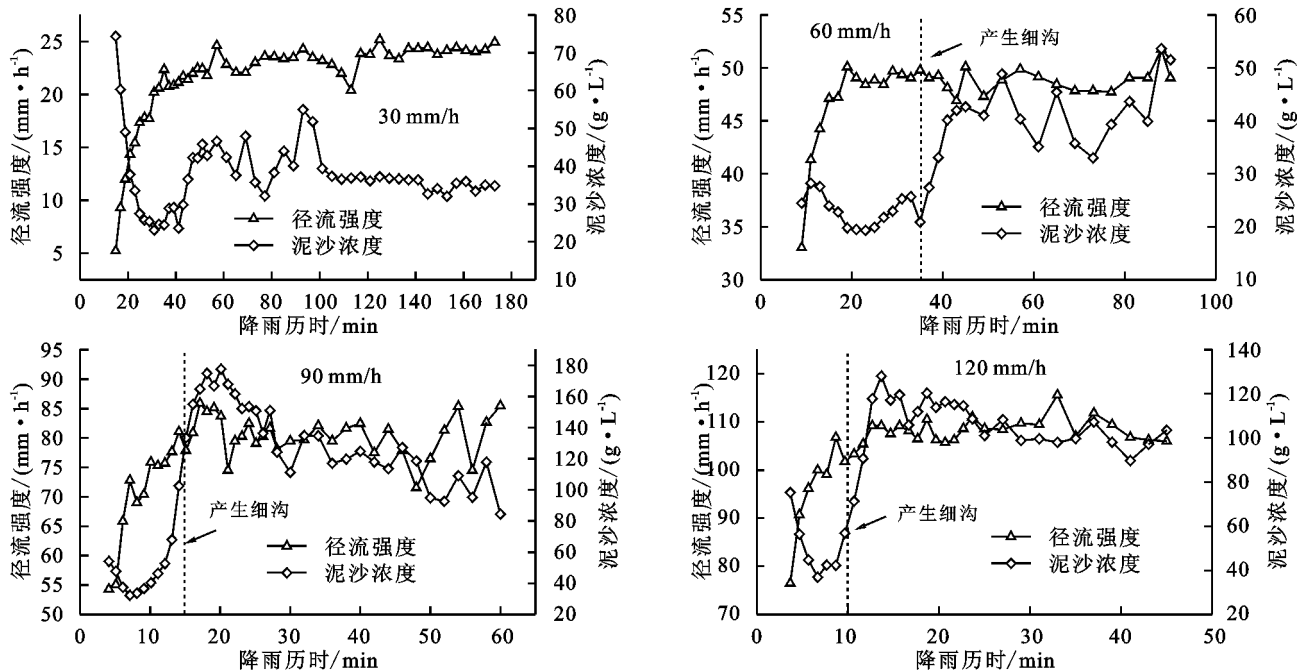


图 1 不同的降雨强度下径流强度和泥沙浓度随时间变化(黄土性褐土)

### 2.3 不同雨强下泥沙颗粒组成

为了探讨不同的降雨强度对两种土壤侵蚀泥沙颗粒组成的影响,对不同雨强条件下的两种土壤侵蚀泥沙

颗粒组成进行了相关分析。从表 3 可以看出,黄土性褐土坡面的侵蚀泥沙颗粒中黏粒和细粉粒含量与雨强分别呈极显著和显著负相关,而粗粉粒和砂粒含量与雨强

都呈显著正相关,当雨强从 30 mm/h 增大至 120 mm/h,侵蚀泥沙的砂粒和粗粉粒含量分别增加了 86%和 21%,坡面泥沙的流失朝着粗颗粒化趋势发展。彭怡等<sup>[21]</sup>在研究紫色土流失土壤的颗粒特征中也发现,随着雨强的逐渐增加,细砂含量表现出了明显的增加趋势,而黏粒和粉粒含量均逐渐减少。这是由于在小的降雨强度下,坡面径流冲刷能力较弱,粗颗粒物质不易被搬运,而细颗粒物质则容易被搬运流失,特别是粒径<0.02 mm 的黏粒和细粉粒;相反,在大的降雨强度下,雨滴击溅和径流冲刷作用增强,坡面开始出现一系列跌坎,跌坎的出现使坡面易形成股流,加速了坡面细沟的产生,径流冲刷侵蚀和搬运能力也随之增强,导致许多粒径>0.02 mm 的粗颗粒容易被径流搬运携带,相

对应地造成了侵蚀泥沙中细颗粒所占比例有所下降,此研究结果与李光录等<sup>[22]</sup>对黄土丘陵区侵蚀泥沙颗粒随雨强变化的研究结果相一致。

从表 3 还可看出,石灰性褐土坡面的侵蚀泥沙颗粒中细粉粒含量与雨强呈显著正相关,而粗粉粒含量与雨强呈显著负相关,与黄土性褐土坡面相比,石灰性褐土坡面随着降雨强度的增大,坡面泥沙的流失朝粗颗粒化趋势发展的现象并不明显,这可能与土壤本身的性质有很大关系。结合侵蚀过程观测发现,石灰性褐土坡面仅在 120 mm/h 的降雨强度下,在开始降雨 18 min 之后才出现明显细沟,因此,坡面细沟产生所表现出来的特有的侵蚀泥沙现象并未很好地在石灰性褐土坡面呈现出来。

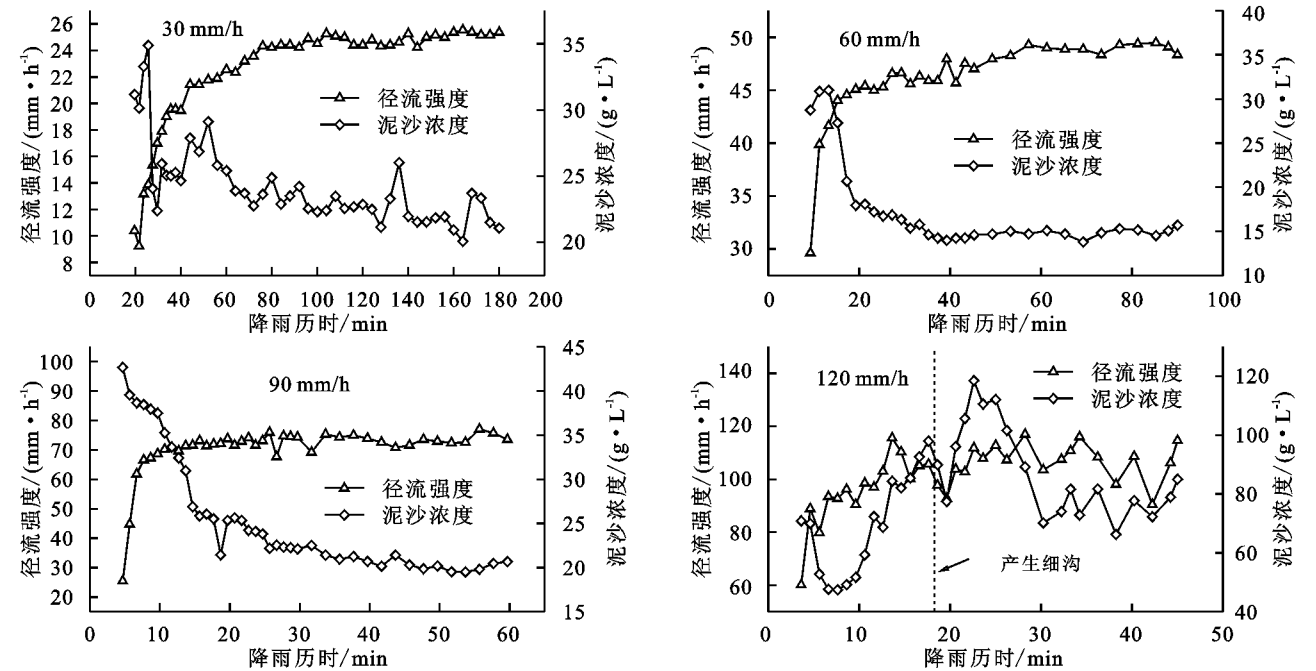


图 2 不同的降雨强度下径流强度和泥沙浓度随时间变化(石灰性褐土)

表 3 两种土壤侵蚀泥沙颗粒组成与不同雨强的相关关系

降雨强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	黄土性褐土				石灰性褐土			
	黏粒/%	细粉粒/%	粗粉粒/%	砂粒/%	黏粒/%	细粉粒/%	粗粉粒/%	砂粒/%
30	16.99	62.63	16.44	3.94	11.89	61.97	20.91	5.48
60	16.38	61.94	17.35	4.33	11.75 *	62.23	20.75	5.55
90	15.14	60.65	18.01	6.20	10.50	62.97	19.85	6.86
120	14.06	58.79	19.82	7.33	10.57	63.82	18.56	7.15
P	-0.992 **	-0.980 *	0.975 *	0.975 *	-0.903	0.977 *	-0.952 *	0.939

注: \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)显著相关; \* 表示在 0.05 水平(双侧)显著相关。

2.4 侵蚀泥沙颗粒富集率变化过程

图 3 和图 4 分别为两种土壤在降雨过程中侵蚀泥沙颗粒的富集率动态变化过程。从图 3 可以看出,对于黄土性褐土,在 30 mm/h 雨强下,产流开始阶段黏粒和细粉粒明显富集,随着降雨进行,砂粒富集率增大,最终稳定在 0.6 左右;而在 60 mm/h 的雨强下,5~10 min 之内,黏粒和细粉粒都迅速增加,而相

应地粗颗粒减少,在坡面产流 35 min 之后,坡面就开始出现由一系列跌坎形成的细沟,导致坡面侵蚀泥沙中粗颗粒富集率增加,并且从图 1 中也可以看出,此时泥沙浓度急剧增加;在 90 mm/h 和 120 mm/h 的雨强下这种现象更加明显。

从图 4 可知,对于石灰性褐土,在 30 mm/h 和 60 mm/h 两种雨强下,产流开始阶段黏粒和细粉粒明显

富集,随着降雨进行,砂粒富集率增大,最终稳定在 0.8 左右;而在 90 mm/h 雨强下,可能由于坡面径流量增大,携砂能力增强,导致砂粒富集率相对于小雨强条件下有所增加;在 120 mm/h 雨强下,坡面产生明显细沟,使得砂粒富集率进一步增加。

这两种土壤在降雨初始阶段,粒径较小的黏粒和细粉粒明显富集,而粒径较大的粗粉粒和砂粒不易流失,郭进等<sup>[23]</sup>在三峡库区紫色土坡地研究结果也表明,坡面侵蚀过程中由于径流分选作用,粒径 $<0.02$  mm 的黏粒和细粉粒会发生大量富集,但随着降雨历时的延长,不同粒径泥沙颗粒的富集率趋于 1,即说明侵蚀泥沙的粒径组成与坡面土壤基本一致。这可

能与降雨过程中坡面土壤的侵蚀方式发生变化有关。在降雨开始阶段,雨滴打击地表,坡面地表松散的土壤易被雨滴分散,但由于坡面径流强度较小,难以搬运粒径较大的土壤颗粒,因此输出的泥沙中细小颗粒含量较多,从而导致富集现象发生,这与张雪等<sup>[24]</sup>在研究红壤时所取得的侵蚀泥沙的结果相似。随着径流强度的增大以及雨滴的扰动,部分粗颗粒土壤在扰动径流的搬运作用下逐渐输出坡面。对于较小的雨强,由于径流强度相对较小而难以搬运砂粒,因此即使在降雨后期砂粒的富集率仍小于 1,而较大雨强下坡面流强度较大且雨滴打击作用增强,即使砂粒也可被完全输移出坡面。

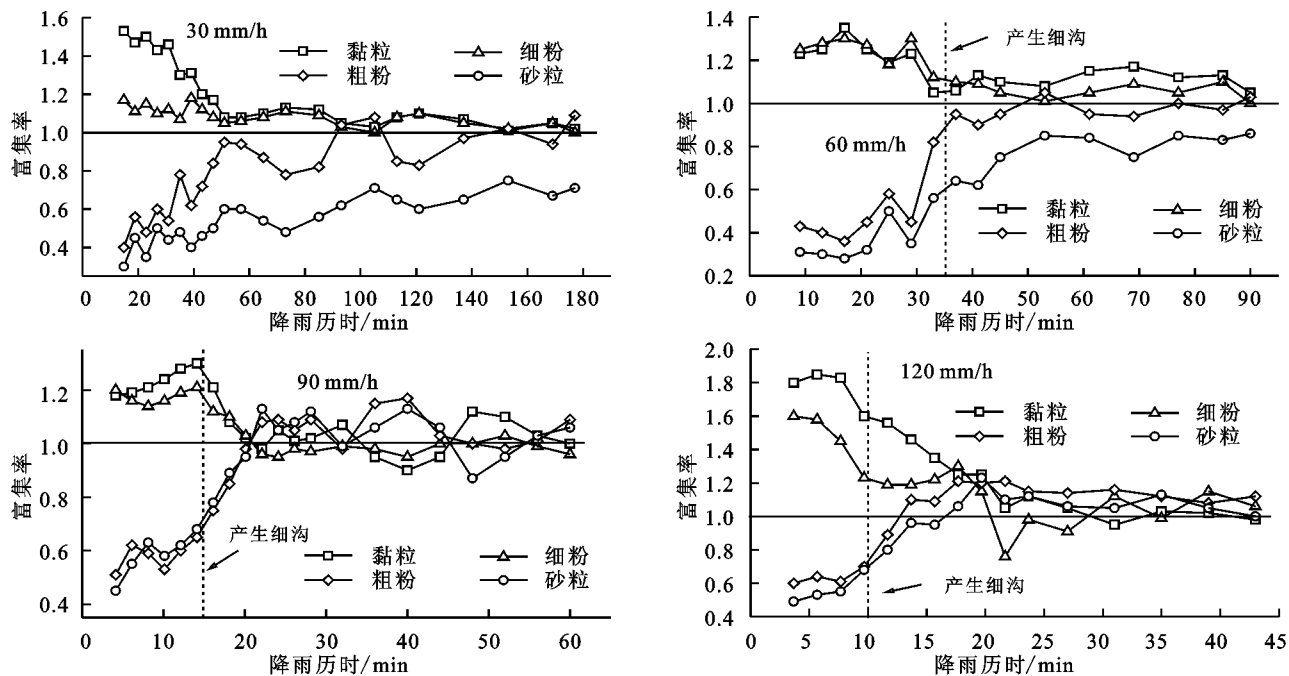


图 3 不同降雨强度下侵蚀泥沙颗粒富集变化过程(黄土地带)

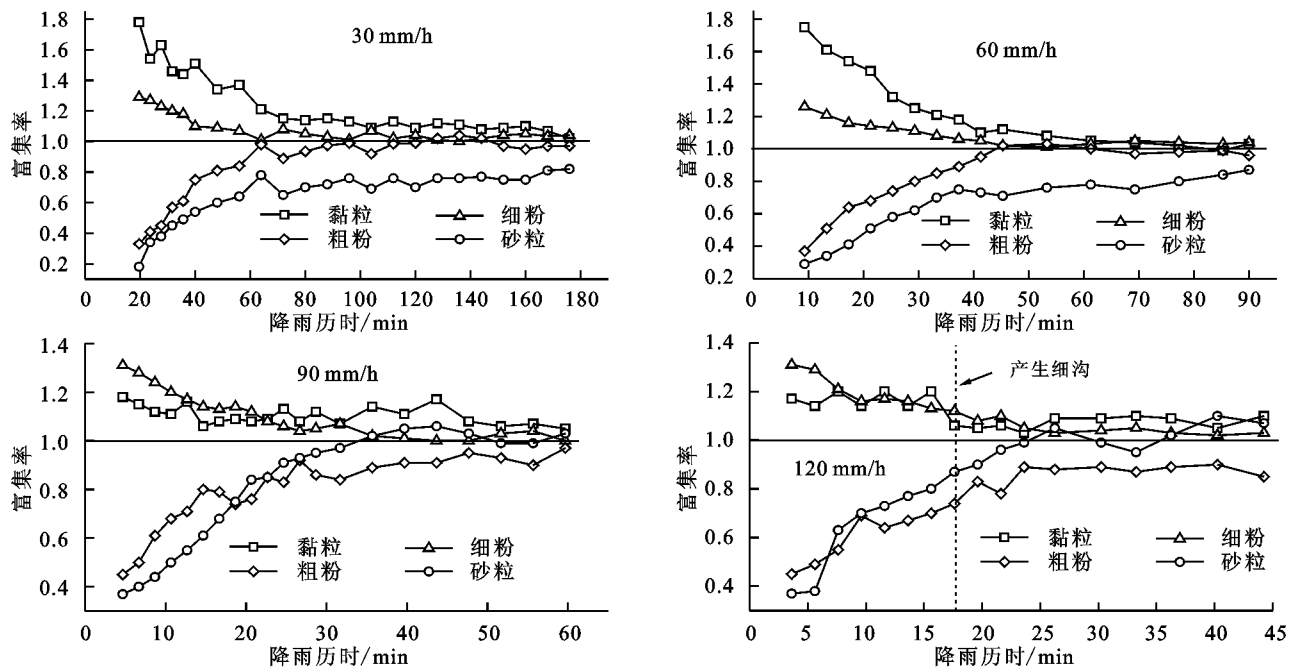


图 4 不同降雨强度下侵蚀泥沙颗粒富集变化过程(石灰性褐土)

### 3 结论

(1)两种土壤的产流时间均随雨强的增大而逐渐变小,总体上在同一降雨强度下黄土性褐土坡面的产流时间比石灰性褐土短,且径流和侵蚀强度均高于石灰性褐土坡面。

(2)两种土壤的泥沙浓度在不同雨强下表现出不同的变化趋势,黄土性褐土坡面在其他雨强条件下(除 30 mm/h 雨强下),泥沙浓度和径流强度,均随时间先减小后增大,而后趋于稳定状态;而石灰性褐土坡面仅在 120 mm/h 雨强下才会出现泥沙浓度和径流强度随时间变化趋势相同的现象。

(3)随着雨强的增大,黄土性褐土坡面泥沙流失朝着粗颗粒化趋势发展,而石灰性褐土的变化则不明显。

(4)在降雨初始阶段,粒径较小的黏粒和细粉粒明显富集,而粒径较大的粗粉粒和砂粒不易流失,但随着降雨历时的延长,不同粒径泥沙颗粒的富集率趋于 1,这种现象在大雨强下表现得尤为明显。

#### 参考文献:

- [1] 程金花,秦越,张洪江,等. 华北土石山区模拟降雨下土壤溅蚀研究[J]. 农业机械学报,2015,46(2):153-161.
- [2] 赵春红. 坡面侵蚀性降雨径流水动力学特性及其对输沙的影响[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [3] 周柱栋,程金花,杨帆,等. 北方土石山区植株密度对坡面流粒径分选的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(1):96-102.
- [4] 杨帆,张洪江,程金花,等. 基于模拟降雨的北京褐土坡地土壤团粒流失特征试验[J]. 农业机械学报,2016,47(8):137-146.
- [5] 杨帆. 北京山区坡面土壤颗粒分离和输移过程研究[D]. 北京:北京林业大学,2016.
- [6] Defersha M B, Quraishi S, Melesse A. The effect of slope steepness and antecedent moisture content on interrill erosion, runoff and sediment size distribution in the highlands of Ethiopia[J]. Hydrology and Earth System Sciences and Discussions,2011,15(7):2367-2375.
- [7] 孙继松,雷蕾,于波,等. 近 10 年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J]. 气象学报,2015,73(4):609-623.
- [8] 和继军,蔡强国,王学强. 北方土石山区坡耕地水土保持措施的空间有效配置[J]. 地理研究,2010(6):1017-1026.
- [9] 李秀彬,马志尊,姚孝友,等. 北方土石山区水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学,2008,6(1):9-15.
- [10] 李君兰,蔡强国,孙莉英,等. 坡面水流速度与坡面含砂量的关系[J]. 农业工程学报,2011,27(3):73-78.
- [11] 陈俊杰,孙莉英,蔡崇法,等. 不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素[J]. 土壤学报,2013,50(2):281-288.
- [12] 和继军,宫辉力,李小娟,等. 细沟形成对坡面产流产沙过程的影响[J]. 水科学进展,2014,25(1):90-97.
- [13] 张怡,丁迎盈,王大安,等. 坡度对侵蚀产沙及其粒径分布的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(6):25-29.
- [14] Defersha M B, Melesse A M. Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment concentration and sediment enrichment ratio[J]. Catena,2012,90(3):47-52.
- [15] Tian P, Xu X Y, Pan C Z, et al. Impacts of rainfall and inflow on rill formation and erosion processes on steep hillslopes [J]. Journal of Hydrology, 2017, 548(5):24-39.
- [16] 王剑. 降雨驱动下侵蚀泥沙颗粒分选特征及搬运机制[D]. 武汉:华中农业大学,2015.
- [17] 刘森,杨明义,张凤宝. 黄土坡面细沟发育及细沟与细沟间侵蚀比率研究[J]. 水土保持学报,2015,29(1):12-16.
- [18] 田培,潘成忠,许新宜,等. 坡面流速及侵蚀产沙空间变异性试验[J]. 水科学进展,2015,26(2):178-186.
- [19] Shi Z H, Fang N F, Wu F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes [J]. Journal of Hydrology,2012,454/455(3):123-130.
- [20] Martinez-Mena M, Castillo V, Albaladejo J. Relations between interrill erosion processes and sediment particle size distribution in a semiarid Mediterranean area of SE of Spain [J]. Geomorphology,2002,45(3/4):261-275.
- [21] 彭怡,王玉宽,傅斌,等. 紫色土流失土壤的颗粒特征及影响因素[J]. 水土保持通报,2010,30(2):142-144.
- [22] 李光录,姚军,庞小明. 黄土丘陵区土壤和泥沙不同粒径有机碳分布及其侵蚀过程[J]. 土壤学报,2008,45(4):740-744.
- [23] 郭进,文安邦,严冬春,等. 三峡库区紫色土坡地土壤颗粒流失特征[J]. 水土保持学报,2012,26(3):18-21.
- [24] 张雪,李忠武,申卫平,等. 红壤有机碳流失特征及其与泥沙径流流失量的定量关系[J]. 土壤学报,2012,49(3):465-473.