

## 雨型对华北土石山区坡面土壤侵蚀的影响

黎俊佑<sup>1</sup>, 马岚<sup>1</sup>, 刘京晶<sup>1</sup>, 沈雨珺<sup>2</sup>, 张金阁<sup>1</sup>, 孙占薇<sup>1</sup>, 燕琳<sup>1</sup>, 张栋<sup>3</sup>

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.北京师范大学水科学研究院,  
北京 100875;3.黄河流域水土保持生态环境监测中心,西安 710021)

**摘要:**为研究雨型对华北土石山区坡面土壤侵蚀的影响,通过室内人工模拟降雨试验,以华北土石山区主要土壤类型黄土性褐土和石灰性褐土为研究对象,设计次降雨中平均降雨强度和降雨量相同的3种不同降雨类型(均匀型、增加型、减弱型对应的降雨强度组合分别为60,30~60~90,90~60~30 mm/h),分析不同雨型下华北土石山区坡面产流产沙的变化规律。结果表明:(1)不同雨型的产流时间与起始阶段降雨强度呈负相关,增加型降雨的坡面产流时间最长,且分别为均匀型和减弱型的1.98,4.15倍;减弱型降雨的总径流量和总侵蚀量最大,而均匀型降雨的最小,减弱型降雨的总径流量是均匀型和增加型降雨的1.05~1.12倍,总侵蚀量分别是增加型和均匀型的1.22,1.78倍。(2)在不同雨型下,同一降雨强度出现在不同降雨阶段,使得坡面产流产沙的过程不同。(3)同一降雨强度出现在雨型起始阶段的径流量和贡献率与结束阶段相比偏小。次降雨起始阶段的强度为30 mm/h时,黄土性褐土的侵蚀量和贡献率大于其在结束阶段的侵蚀量和贡献率,而石灰性褐土与之相反。

**关键词:**雨型;人工模拟降雨;华北土石山区;土壤侵蚀;坡面径流

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2020)04-0001-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2020.04.001

## Effects of Rainfall Patterns on Slope Soil Erosion in the Rocky Mountain Area of North China

LI Junyou<sup>1</sup>, MA Lan<sup>1</sup>, LIU Jingjing<sup>1</sup>, SHEN Yujun<sup>2</sup>,

ZHANG Jing<sup>1</sup>, SUN Zhanwei<sup>1</sup>, YAN Lin<sup>1</sup>, ZHANG Dong<sup>3</sup>

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University,

Beijing 100083; 2.College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875;

3.Ecological Environment Monitoring Center for Soil and Water Conservation in the Yellow River Basin, Xi'an 710021)

**Abstract:** In order to research the impact of rainfall patterns on slope erosion in the rocky mountain area of North China, the loess cinnamon and the calcic cinnamon from this area were selected and indoor experiments were conducted. The experiment treatment included three patterns of simulated rainfalls with the same total rainfall and mean intensity, covering uniform type (60 mm/h), rising type (30~60~90 mm/h), and falling type (90~60~30 mm/h). The results indicated that: (1) The initial runoff generation time of different rainfall and patterns was negatively correlated with the rainfall intensity at the initial stage. The initial runoff generation time of the rising type slope was 1.98 and 4.15 times higher than that of the uniform and falling types, respectively. The order of total runoff and total erosion generated by different rainfall patterns was falling type>rising type>uniform type. The total runoff of the falling type was 1.05~1.12 times of other rainfall patterns, and the total erosion was 1.22 and 1.78 times of the rising and uniform types, respectively. (2) Under different rainfall patterns, the same rainfall intensity appeared in different rainfall stages, which made the processes of runoff and sediment production on the slope different. (3) The runoff and contribution rate of the same rainfall intensity at the initial stage of the rainfall pattern was smaller than that at the end stage. When the 30 mm/h rainfall intensity appeared at the beginning of the rainfall pattern, the erosion amount and contribution rate of the loess cinnamon was greater than that at the end stage, while the calcic cinnamon was the opposite.

**Keywords:** rainfall pattern; artificial simulated rainfall; the rocky mountain area of North China; soil erosion; slope runoff

收稿日期:2019-11-24

资助项目:国家自然科学基金项目(51779004)

第一作者:黎俊佑(1994—),男,在读硕士研究生,主要从事坡面水文与土壤侵蚀研究。E-mail:junyoulifbu@qq.com

通信作者:马岚(1981—),女,副教授,硕士生导师,主要从事坡面水文与水土保持研究。E-mail:mlpcz@sina.com

土壤侵蚀已成为全球性的环境问题,不仅导致土壤质量退化,更是面源污染的主要物质来源,严重威胁现代社会和农业的可持续发展<sup>[1-2]</sup>。降雨强度是影响土壤侵蚀过程的重要因素。目前,国内外研究<sup>[3-5]</sup>不同降雨参数对土壤侵蚀产流产沙过程的影响时,主要进行均匀降雨强度的人工模拟降雨试验,并得到土壤侵蚀预测模型。然而自然降雨具有时空变异性<sup>[6]</sup>,这可能导致研究结果与实际情况存在一定的差异。

次降雨过程中不同降雨强度随降雨历时变化的组合被称为雨型<sup>[7]</sup>。目前,研究雨型对土壤侵蚀的影响主要采用统计资料和模拟降雨试验等方法<sup>[8-9]</sup>。郑粉莉等<sup>[10]</sup>、Mohamadi 等<sup>[11]</sup>、秦伟等<sup>[12]</sup>基于多年野外观测资料,选取降雨量、降雨历时和降雨强度为划分指标,把侵蚀性降雨概化为不同雨型,并分析其侵蚀能力。近年来,学者通过控制降雨参数设计出不同雨型的人工模拟降雨试验。Dunkerley 等<sup>[13]</sup>设计了峰值和平均降雨强度相同的雨型发现,变雨型下的径流率和峰值径流量比均匀雨型下高出 85%~570%。Wang 等<sup>[14]</sup>研究了降雨量和动能相同的 4 种不同雨型,结果表明侵蚀量的大小顺序为延迟型>增加型=中间型>均匀型;郑粉莉等<sup>[15]</sup>设计了总降雨量相同

的 5 种不同雨型发现,峰值型的侵蚀总量明显高于谷值型、减弱型、均匀型和增强型。综上,学者们大多侧重于次降雨中雨型整体的研究,对侵蚀动态变化的分析较少,且雨型中降雨强度发生时序对坡面侵蚀的影响有待进一步深入。

华北土石山区土层薄且粗骨质含量大,土壤下方为透水性差的岩石,导致水土流失后生态环境恶化,恢复困难,加之短历时、高强度的暴雨频发,已成为全国比较严重的土壤侵蚀区之一<sup>[16]</sup>。由于不同地域母质成土环境的不同,导致研究结论存在偏差,因此,迫切需要在华北土石山区研究雨型对土壤侵蚀的影响。本文通过室内模拟降雨试验,研究雨型对华北土石山区黄土性褐土和石灰性褐土侵蚀过程的影响,对比分析不同降雨强度分布下 2 种土壤产流产沙特征,为华北土石山区土壤侵蚀防治提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

模拟降雨试验选用石灰岩母质发育的褐土和次生黄土母质发育的褐土,这 2 种褐土均为华北土石山区典型土壤。土壤密度和颗粒组成见表 1。

表 1 土壤密度和颗粒组成

土壤类型	土壤密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	颗粒组成/%			
		0~2 μm	2~20 μm	20~50 μm	>50 μm
石灰性褐土	1.29	9.51	57.16	24.82	8.51
黄土性褐土	1.33	14.22	58.00	20.57	7.21

### 1.2 试验装置

试验地点位于北京林业大学鹫峰人工模拟降雨大厅,试验时间为 2019 年 6—8 月。试验装置主要由供水模块、降水模块、控制模块和坡面模块 4 部分组成。人工模拟降雨大厅有效降雨高度为 12 m,采用旋转下喷式喷头,降雨分布均匀度达到 0.85 以上,可以满足模拟降雨接近自然降雨的要求。试验采用可自由调节坡度的大型钢槽,长、宽、深分别为 10,3,0.6 m,采用金属隔板按 1.5 m 宽将钢槽分成两部分,分别装入石灰性褐土和黄土性褐土。

### 1.3 试验设计与流程

参考华北地区气候数据和侵蚀性降雨标准,并结合试验实际情况,设计 3 个总降雨量和平均降雨强度相同的雨型,分别为增加型(30~60~90 mm/h,降雨强度逐渐增大)、减弱型(90~60~30 mm/h,降雨强度逐渐减小)和均匀型(60 mm/h,降雨强度保持不变)<sup>[7,17]</sup>。试验控制总降雨量为 90 mm,按照 30 mm 降雨量将降雨过程划分为起始、中间和结束阶段,30,60,90 mm/h 降雨强度下,每个阶段所对应的降雨历时分别为 60,30,20 min。和继军等<sup>[18]</sup>研究发现,华

北土石山区水土流失治理的重点是坡耕地,耕作措施在<6°的坡地水土保持效益最佳,故本试验将钢槽坡度设置为 6°,为耕作措施进一步应用提供理论依据。

试验前将土样风干并过 10 mm 筛,去除杂草和石块。填土时,为了使试验土层的透水状况接近天然坡面,先在槽底填入 10 cm 厚的细沙,并在细沙上铺设透水的细纱布,然后采用分层填土法填入试验用土,每次填土 10 cm,总填土厚度为 40 cm,为了使坡面土壤与自然耕地表层土的密度相当,按照 1.29,1.33 g/cm<sup>3</sup> 装入石灰性褐土和黄土性褐土。装土时采用特制平板将土面平整,为防止土层间的滑动,填完每层土壤后在表面制造一定的粗糙度。装土结束后,土层与钢槽边壁交接处尽量压实,以减小边坡效应的影响,再用特制平尺对土层表面进行刮平。降雨前测量土壤初始含水率,待初始含水率在 15%左右时进行降雨试验。降雨过程中,每隔 2~3 min 采集 1 组径流、泥沙,用雨量筒实时监测实际雨强。坡面开始出现跌坎以后,记录坡面细沟的演变过程。试验所得的径流样,测量其体积,用烘干法测定泥沙量。

在试验结束后,移除表层 20 cm 湿土,由于无法

移动钢槽,剩余的湿土需经过7天左右的晾晒才能达到试验要求的含水率,此时按要求重新回填土壤进行下一场试验,因此,一场降雨试验周期为10天左右。采用10 m长的钢槽开展室内模拟降雨试验更具有代表性<sup>[19]</sup>,且工作量较大,故没有设置重复试验。本研究需在2种土壤坡面上进行3种雨型的降雨,人工模拟降雨试验共6场。

## 2 结果与分析

### 2.1 雨型对坡面产流产沙的影响

2种土壤在不同雨型下的模拟降雨试验结果见表2。各雨型初始产流时间的大小顺序为增加型>均匀型>减弱型,黄土性褐土增加型降雨的初始产流时间比均匀型和减弱型降雨分别延长89.2%和304.5%,石灰性褐土初始产流时间分别延长98.4%和314.9%。降雨前期土壤含水率、坡度等环境要素一致的情况下,坡面初始产流时间与土壤入渗性能和坡面承雨量有关<sup>[20]</sup>。各雨型起始阶段降雨强度越大,雨滴溅起更多细小颗粒堵塞孔隙使得坡面更容易出现结皮,严重阻碍水分下渗,而且同一坡度下降雨强度越大,坡面单位时间单位面积所容纳的降雨量也越大,从而坡面出现蓄满产流或超渗产流的时间必然缩短。

表2 不同雨型下坡面产流时间、总径流量和总侵蚀量

土壤类型	雨型	产流 时间/min	总径 流量/mm	总侵 蚀量/kg
黄土性褐土	均匀型	8.77	66.95	53.15
	增加型	16.58	69.97	77.98
	减弱型	4.10	73.68	94.86
石灰性褐土	均匀型	10.08	61.59	29.42
	增加型	20.00	64.90	36.61
	减弱型	4.82	69.08	39.02

总降雨量相同的情况下,各雨型按总径流量、总侵蚀量由大到小排列分别为减弱型、增加型和均匀型。增加型和减弱型降雨总径流量分别为均匀型降雨的1.05,1.12倍;减弱型降雨的总侵蚀量最大,最高为均匀型降雨的1.78倍;增加型降雨总侵蚀量也大于均匀型降雨,最高可达其1.36倍,与不同雨型下坡面总径流量相比,雨型对总侵蚀量的影响更为明显。较大的降雨强度(90 mm/h)下雨滴击打破坏地表能力和径流搬运能力较强。有研究<sup>[21]</sup>认为,高强度、短历时的降雨是造成土壤侵蚀的主要原因,因此在降雨量相同的条件下,减弱型和增加型降雨的总侵蚀量和总径流量均大于均匀型降雨。增加型降雨起始阶段降雨强度较小,使得坡面径流量较小,径流分散、搬运泥沙的能力较弱,土壤表层形成的结皮不易受到破坏,损失的泥沙量也相对较少;而减弱型降雨

起始阶段降雨强度大,对坡面土壤击打分散形成更多的细小颗粒,这些碎屑物质不但堵塞土壤孔隙,减小坡面入渗,还为坡面侵蚀产沙提供了大量的物质来源,导致径流量增大,径流分散、搬运泥沙的能力也随之增强。减弱型降雨坡面在10 min左右出现细沟,坡面径流由面状逐步汇聚成线状,径流侵蚀能力进一步增强,因此,总径流量和总侵蚀量大于增加型降雨。

同一雨型下,石灰性褐土的产流时间长于黄土性褐土,但石灰性褐土坡面总径流量和总侵蚀量均低于黄土性褐土,造成2种土壤在侵蚀过程中出现差异的原因可能与土壤理化性质相关。黄土性褐土的密度大于石灰性褐土,且黏粒含量是后者的1.50倍(表1),土壤表层更容易板结,因此黄土性褐土更容易产生径流,相应产流时间提前,径流量也随之增大。吕刚等<sup>[22]</sup>在研究辽西褐土和棕壤侵蚀过程时也发现,密度较大的褐土坡面产流时间比棕壤提前,径流量更大。黄土性褐土坡面抗蚀性能小于石灰性褐土<sup>[23]</sup>,而且较大的坡面径流量使径流对土壤侵蚀、搬运的能力提高,在降雨过程中更容易形成细沟,细沟的出现以及沟头溯源侵蚀、边壁的崩塌均会导致坡面侵蚀量迅速增大<sup>[24]</sup>,因此坡面总侵蚀量大于石灰性褐土。

### 2.2 雨型对坡面侵蚀过程的影响

2.2.1 雨型对坡面径流过程的影响 造成坡面产流产沙的主要驱动力源于坡面径流。由图1可知,2种土壤的径流强度在不同雨型下表现出一致规律。均匀型降雨径流强度随降雨历时呈“增加—稳定”的趋势,增加型和减弱型降雨,雨型中各阶段径流强度的变化趋势与降雨强度变化一致。均匀型降雨坡面产流稳定后径流强度为46.04~53.81 mm/h,径流强度与土壤入渗速率之间达到相对平衡状态;而增加型和减弱型降雨的起始阶段,减弱型降雨的径流强度随降雨历时的增加呈陡然上升趋势,增加型降雨呈逐渐增加趋势,并在产流12~16 min后基本趋于平稳;中间阶段,坡面初始径流强度较小,但随着降雨历时的增加迅速达到稳定趋势;结束阶段,2种雨型径流强度变化已基本趋于稳定。对3种雨型径流强度进行比较分析,均匀型降雨中间阶段60 mm/h平均径流强度为增加型和减弱型降雨的93.1%~95.7%。当降雨强度为30 mm/h,减弱型降雨平均径流强度最高为增加型降雨的1.67倍,而降雨强度为90 mm/h时,减弱型降雨平均径流强度小于增加型降雨,最高仅为其84.1%。可见,不同雨型中,同一降雨强度出现在不同的降雨阶段,导致坡面径流过程出现差异。

2.2.2 雨型对坡面产沙过程的影响 坡面侵蚀过程中径流剥离、输移颗粒物质的快慢被定义为产沙率,是体现侵蚀能力的重要指标。图2为不同雨型下产

沙率随降雨历时的变化。均匀型降雨产沙率随降雨历时呈先增加后降低的单峰曲线变化趋势,在降雨 30~50 min 前后达到最大值,随后产沙率随降雨历时趋于平稳,黄土性褐土和石灰性褐土稳定后的平均产沙率分别为 362.40, 330.32 g/min。增加型和减弱型降雨产沙率的变化与雨型中降雨强度变化一致。对于减弱型降雨,起始阶段降雨强度较大,雨滴打击力和径流搬运能力急剧增加,细沟开始发育,坡面跌坎、崩塌相继发生,2 种土壤的产沙率均随降雨历时的增加呈陡然上升趋势;随着降雨强度逐渐减小,产沙

率在中间阶段急剧下降,在结束阶段趋于平稳状态。而对于增加型降雨,起始阶段降雨强度较小,雨滴能量较小,雨滴打击力和径流搬运能力较弱,2 种土壤的产沙率均随降雨历时逐渐增加;随着降雨强度增大到 60, 90 mm/h 时,雨滴和径流侵蚀能力增加,土壤表层的结皮逐渐破碎,2 种土壤的产沙率明显增大,石灰性褐土的产沙率在中间和结束阶段随降雨历时保持平稳波动,而黄土性褐土的产沙率在中间阶段随降雨历时呈先增加后降低的单峰曲线变化趋势,在结束阶段达到峰值 2 243.49 g/min,随后呈急剧下降的趋势。

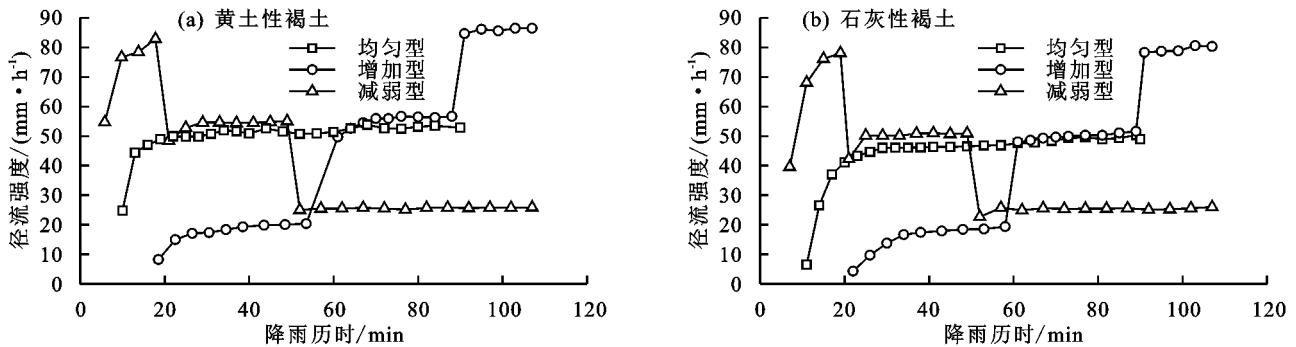


图 1 不同雨型下径流强度随降雨历时变化

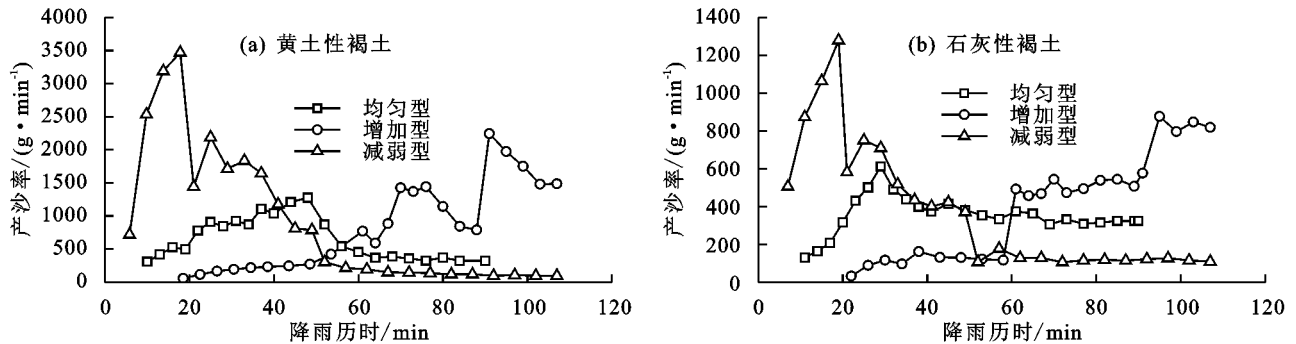


图 2 不同雨型下产沙率随降雨历时变化

通过对比 3 种雨型的产沙率发现,增加型和减弱型降雨在中间阶段的平均产沙率为均匀型降雨的 1.05~1.26, 1.32~1.48 倍。对于 30 mm/h 降雨强度,石灰性褐土减弱型降雨平均产沙率为增加型降雨的 1.67 倍,而黄土性褐土在相同条件下仅为 69.1%。降雨强度为 90 mm/h 时,黄土性褐土减弱型降雨平均产沙率为增加型降雨的 1.39 倍,而石灰性褐土在相同条件下仅为 82.5%。黄土性褐土坡面的 30, 90 mm/h 降雨强度出现在起始阶段引起的产沙率大于结束阶段,而石灰性褐土出现相反的结果,可能与土壤的抗蚀性能有关。可见,在不同雨型下,同一降雨强度出现的时序不同,以及土壤性质间的差异均会对坡面产沙过程造成影响。

综上所述,较大的降雨强度增强坡面产沙过程的波动性、偶然性和随机性,且出现在降雨前期的效应比后期更明显,正是出现这些突发事件加剧了变雨型降雨下的坡面侵蚀。从试验结果来看,黄土性褐土的

产沙率较大,随机性和波动性也更高。有研究<sup>[25]</sup>表明,其他条件相同时,坡面产沙率的变化规律随土壤性质不同而存在较大差异。黄土性褐土产沙率波动性更大,其原因可能是径流的汇集使得细沟溯源侵蚀加剧,连通了坡面的跌坎和断续的细沟,此外径流对细沟侧壁的冲掏作用加剧了沟壁随机性坍塌,使得产沙率增大<sup>[26]</sup>。

### 2.3 不同雨型中雨强分布对坡面径流量和侵蚀量的影响

由表 3 可以看出,不同雨型下,同一降雨强度出现在不同的降雨阶段,产生的径流量及其对总径流量的贡献率也不同。对于黄土性褐土和石灰性褐土,30 mm/h 降雨强度下,结束阶段的坡面径流量较起始阶段增加 98.7%和 130.7%,相应的贡献率分别增加 88.7%和 116.7%;60 mm/h 降雨强度下,结束阶段的径流量和贡献率比起始阶段均增加 68.0%和 63.2%;90 mm/h 降雨强度下,与起始阶段相比,结

束阶段径流量分别增加 46.6% 和 51.5%，相应的贡献率分别增加 54.4% 和 61.2%。说明同一降雨强度出

现在雨型起始阶段的径流量和贡献率与结束阶段相比偏小，而且降雨强度越小，时序效应越明显。

表3 不同雨型中雨强的时序及其相应的径流量、侵蚀量和贡献率

土壤类型	雨强/ (mm·h <sup>-1</sup> )	雨型	时序	径流量/ mm	径流贡献率/ %	侵蚀量/ kg	侵蚀贡献率/ %
黄土性褐土	30	增加型	起始阶段	12.86	18.4	10.29	13.2
		减弱型	结束阶段	25.55	34.7	8.81	9.3
	60	均匀型	起始阶段	15.73	23.5	12.82	24.1
		均匀型	结束阶段	26.42	39.5	11.92	22.4
	90	减弱型	起始阶段	19.52	26.5	39.66	41.8
		增加型	结束阶段	28.62	40.9	35.73	45.8
石灰性褐土	30	增加型	起始阶段	10.93	16.8	4.74	12.9
		减弱型	结束阶段	25.20	36.5	7.36	18.9
	60	均匀型	起始阶段	14.55	23.6	8.56	29.1
		均匀型	结束阶段	23.74	38.5	9.42	32.0
	90	减弱型	起始阶段	17.46	25.3	14.90	38.2
		增加型	结束阶段	26.45	40.8	15.67	42.8

次降雨起始阶段的降雨强度较小时，雨滴动能较小，击打土壤表面的能力较弱，降雨形成的结皮以及对土壤的压实作用相对较小，且坡面干燥及透水能力较强，土壤渗透吸收了大量径流，因此径流量及其对应的贡献率较小。当较小的降雨强度出现在次降雨的结束阶段时，由于前期大强度的降雨改变了土壤微地貌形态，降雨对土壤的压实作用形成致密的结皮，以及土壤含水率基本饱和，导致土壤入渗能力减小，坡面径流量和贡献率随之增加。有学者<sup>[15]</sup>研究认为，降雨强度发生时序对径流量及其贡献率的影响不明显，与本研究结果不一致。这种差别的产生可能与试验前期含水量有关，学者在试验前期进行预降雨至坡面饱和，使得较小强度的降雨在起始阶段产生的径流量较大，与结束阶段的径流量差距较小；而本试验的土壤前期含水率较低，降雨强度较小时坡面起始阶段土壤入渗率较大，相应径流量减小，与结束阶段径流量相比差距相对明显。

不同雨型下，同一降雨强度出现在不同的降雨阶段，产生的侵蚀量及其对总侵蚀量的贡献率也不同。对于黄土性褐土，30 mm/h 降雨强度下，起始阶段坡面侵蚀量较结束阶段增加 16.7%，相应的贡献率增加 42.0%；60 mm/h 降雨强度下，起始阶段的侵蚀量及其贡献率较结束阶段增加 7.6%；90 mm/h 降雨强度下，与结束阶段相比，起始阶段侵蚀量增加 11.0%，相应的贡献率则减小 8.7%。而对于石灰性褐土，30 mm/h 降雨强度下，结束阶段侵蚀量较起始阶段增加 55.4%，相应的贡献率增加 45.8%；60 mm/h 降雨强度下，结束阶段的侵蚀量及其贡献率较起始阶段增加 10.0%；90 mm/h 降雨强度下，与起始阶段相比，结

束阶段侵蚀量增加 5.2%，相应的贡献率增加 12.1%。

30 mm/h 降雨强度在不同阶段的侵蚀量及贡献率的差别较大，其原因可能是黄土性褐土的土壤抗蚀性较弱，雨滴的击溅侵蚀作用将较大的土壤团聚体分散成较小的颗粒，使得地表径流搬运的物质也相应增多，导致起始阶段侵蚀量和贡献率增加；在结束阶段，经过前期较大强度的降雨，坡面产生了大量泥沙，细沟发育程度较高，土壤表层的结皮物质和水稳性较高的团聚体抑制坡面产沙<sup>[27]</sup>，再加上降雨强度减小使得径流侵蚀能力减小，侵蚀量及其贡献率也随之减小。对于石灰性褐土，由于土壤抗蚀性较强，起始阶段雨滴击打破碎和径流冲刷分散作用对土壤团聚体的影响较小，从而侵蚀量和对应的贡献率较小；在结束阶段，即使前期降雨强度较大，细沟的发育仍比较活跃，且前期研究<sup>[28]</sup>表明，土壤可蚀性值随着降雨进行逐渐增大，达到最大值后逐渐趋向平稳，坡面产沙量增加，因此结束阶段的侵蚀量和贡献率较大。而 90 mm/h 降雨强度出现在降雨不同阶段所产生的侵蚀量及贡献率差别不明显，其原因是该降雨强度下雨滴动能和径流冲刷、搬运能力较大，在溅蚀阶段雨滴分散、剥离较大的土壤团聚体，在水力侵蚀阶段，径流搬运和携带侵蚀物质的能力增大，坡面侵蚀量及其贡献率相应增大。综上，雨型对坡面土壤侵蚀的影响较为复杂，不仅与降雨参数等因素有关，还受土壤自身理化性质和地表微地貌形态时空变化的影响。

### 3 结论

(1) 不同雨型的产流时间与起始阶段的降雨强度呈负相关，增加型降雨坡面产流时间最长，且为均匀型和减弱型的 1.98, 4.15 倍。不同雨型产生的总径

流量和总侵蚀量大小顺序均为减弱型>增加型>均匀型,减弱型坡面总径流量是其他雨型的1.05~1.12倍,总侵蚀量分别是增加型和均匀型的1.22,1.78倍。与石灰性褐土相比,同一雨型下黄土性褐土坡面的产流时间较短,而总径流量和总侵蚀量较大。

(2)在不同雨型下,同一降雨强度出现在不同降雨阶段,使得坡面产流产沙过程不同。均匀型降雨径流强度随时间呈“增加—稳定”的趋势,而产沙率呈先增加后降低的单峰曲线变化趋势,增加型和减弱型降雨各阶段径流强度和产沙率的变化趋势与降雨强度变化一致。黄土性褐土和石灰性褐土在同一雨型下坡面产沙过程存在差异。

(3)同一降雨强度出现在雨型起始阶段的径流量和贡献率与结束阶段相比偏小,而且降雨强度越小,时序效应越明显。次降雨起始阶段的强度为30 mm/h时,黄土性褐土的侵蚀量和贡献率大于其在结束阶段的侵蚀量和贡献率,而石灰性褐土与之相反。

#### 参考文献:

- [1] 刘淑珍,刘斌涛,苏正安,等.对我国水土流失调查评价方法若干问题的思考[J].山地学报,2014,32(2):150-153.
- [2] 张杰,陈晓安,汤崇军,等.典型水土保持措施对红壤坡地柑橘园水土保持效益的影响[J].农业工程学报,2017,33(24):165-173.
- [3] Derege T M, Atsushi T, Mitsuru T, et al. Evaluation of kinetic energy and erosivity potential of simulated rainfall using Laser Precipitation Monitor[J]. Catena, 2016,137:237-243.
- [4] Zhang F B, Huang C H, Yang M Y, et al. Rainfall simulation experiments indicate that biochar addition enhances erosion of loess-derived soils[J]. Land Degradation and Development, 2019,30(18):2272-2286.
- [5] Pan C Z, Ma L. How the spatial distribution of grass contributes to controlling hillslope erosion[J]. Hydrological Processes, 2019,34(1):68-81.
- [6] Dunkerley D. Rain event properties in nature and in rainfall simulation experiments; A comparative review with recommendations for increasingly systematic study and reporting [J]. Hydrological Processes, 2008, 22: 4415-4435.
- [7] 安娟,于妍,吴元芝.降雨类型对褐土横垄坡面土壤侵蚀过程的影响[J].农业工程学报,2017,33(24):150-156.
- [8] Wang B, Steiner J, Zheng F L, et al. Impact of rainfall pattern on interrill erosion process [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2017,42(12):1833-1846.
- [9] 陈晓安,蔡强国,郑明国,等.黄土丘陵沟壑区的岔巴沟流域次降雨侵蚀力的研究[J].泥沙研究,2010(1):5-10.
- [10] 郑粉莉,唐克丽,白红英,等.子午岭林区不同地形部位开垦裸露地降雨侵蚀力的研究[J].水土保持学报, 1994,8(1):26-32.
- [11] Mohamadi M A, Kavian A. Effects of rainfall patterns on runoff and soil erosion in field plots[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2015, 3(4): 273-281.
- [12] 秦伟,左长清,晏清洪,等.红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J].农业工程学报,2015,31(2):124-132.
- [13] Dunkerley D. Effects of rainfall intensity fluctuations on infiltration and runoff: Rainfall simulation on dryland soils, Fowlers Gap, Australia[J]. Hydrological Processes, 2012,26(15):2211-2224.
- [14] Wang W T, Yin S Q, Xie Y, et al. Effects of four storm patterns on soil loss from five soils under natural rainfall[J]. Catena, 2016,141:56-65.
- [15] 郑粉莉,边锋,卢嘉,等.雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响[J].农业机械学报,2016,47(2):90-97.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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,2010,29(6):1017-1026.
- [19] 刘京晶,马岚,薛孟君,等.不同处理下油松枯落物减流减沙效应试验研究[J].水土保持学报,2019,33(4):126-132.
- [20] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.雨滴打击对黄土坡面细沟侵蚀特征的影响[J].农业机械学报,2015,46(8):104-112.
- [21] 张熠昕,马超,杨海龙,等.北京市密云区龙潭沟流域泥石流灾害成因与动力学特征[J].北京林业大学学报,2018,40(7):73-84.
- [22] 吕刚,刘雅卓,陈鸿,等.褐土和棕壤坡耕地细沟侵蚀过程及侵蚀产沙特征[J].水土保持学报,2019,33(3):64-69.
- [23] 陈佩岩,马岚,薛孟君,等.华北土石山区不同粒径土壤团聚体特征及其与坡面侵蚀定量关系[J].北京林业大学学报,2018,40(8):64-71.
- [24] 和继军,吕焯,宫辉力,等.细沟侵蚀特征及其产流产沙过程试验研究[J].水利学报,2013,44(4):398-405.
- [25] 成玉婷,李鹏,徐国策,等.冻融条件下土壤可蚀性对坡面氮磷流失的影响[J].农业工程学报,2017,33(24):141-149.
- [26] 张攀,姚文艺,唐洪武,等.黄土坡面细沟形态变化及对侵蚀产沙过程的影响[J].农业工程学报,2018,34(5):114-119.
- [27] 吴发启,范文波.土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响[J].中国水土保持科学,2005,3(2):97-101.
- [28] Assouline S, Ben-Hur M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing[J]. Catena, 2006,66(3):211-220.