

粗质地土壤坡度和前期含水量对土壤侵蚀的影响

游微^{1,2}, 樊军¹, 魏修彬^{1,2}, 杜梦鸽³, 胡锦涛^{1,2}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 利用野外模拟降雨试验, 研究了粗质地土壤裸地和苜蓿地在不同坡度(5°, 15°, 25°)、不同前期含水量(低、中、高)条件下坡面降雨产流、产沙的过程及其特征, 以此探究该区退耕还草效益。结果表明: 3种坡度条件下裸地和苜蓿地的产流过程在不同前期含水量下均为先增大后趋于稳定, 不同坡度之间的径流量差异不显著, 但泥沙流失量随着坡度的增大而显著增加, 在降雨过程中先增大达到峰值趋于稳定波动, 裸地的波动幅度大于苜蓿地。2种处理的前期含水量对径流量以及平均入渗率的影响均达显著水平, 裸地在相同的坡度下, 前期含水量由低水平增加到中水平、低水平增加到高水平, 径流量分别增加 38.2%~52.8%, 39.7%~42.8%, 苜蓿地径流量分别增加 27.3%~77.8%, 45.5%~91.1%。坡度对泥沙流失量及含沙率影响显著, 在相同的前期含水量下, 裸地由 5°增加到 15°, 15°增加到 25°的泥沙流失量分别增加 96.3%~268.7%, 6.9%~40.3%, 苜蓿地的泥沙流失量分别增加 81.1%~384.2%, 61.7%~169.9%。在相同坡度和前期含水量下, 苜蓿地的径流量和泥沙流失量均显著低于裸地。研究结果表明粗质地土壤前期含水量和坡度显著影响坡地土壤侵蚀过程和总量, 植被不但因为冠层拦截而减少径流, 而且因为耗水量增加, 降低了土壤前期含水量而减水减沙。

关键词: 黄土高原; 人工模拟降雨; 径流; 泥沙流失

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)04-0018-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.04.004

Effect of Soil Slope and Antecedent Soil Water Content on Soil Erosion in Coarse Texture Soil

YOU Wei^{1,2}, FAN Jun¹, WEI Xiubin^{1,2}, DU Mengge³, HU Jinsheng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 2. University of China Academy of Sciences, Beijing 100049;
3. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Through the simulated rainfall experiment, the effects of slope and antecedent soil water content on the process of rainfall runoff and sediment on bare land and alfalfa land of coarse texture soil were investigated. The experiment treatment included three slopes (5°, 15° and 25°) and three antecedent soil water content (low, middle and high). The results showed that the processes of runoff on bare land and alfalfa land were at first increased and then leveled-off under different slopes and antecedent soil water content, and the effects of slopes on runoff volume were marginal. Sediment losses were greatly increased with the increasing slopes, which were increased firstly and then tended to be stable, and also greater changes occurred in bare land. Both of the runoff volume and the mean infiltration were significantly affected by antecedent soil water content. Under the same slope gradient, when antecedent soil water content increased from low to middle, and from low to high, the runoff volume of bare land increased 38.2%~52.8%, and 39.7%~42.8%, respectively, while the runoff volume of alfalfa land increased 27.3%~77.8% and 45.5%~91.1%, respectively. Slopes had significant influences on sediment losses and sediment concentration. Under the same antecedent soil water content, when slope increased from 5° to 15°, and from 15° to 25°, the sediment losses of bare land increased 96.3%~268.7%, and 6.9%~40.3%, respectively, whereas the corresponding values of alfalfa land increased 81.1%~384.2%, and 61.7%~169.9%, respectively. The results showed runoff volume and sediment losses of alfalfa land were significantly lower than bare land at same slope and antecedent soil water content. The findings indicate that antecedent soil water content and slope of coarse texture soil play important roles

收稿日期: 2017-01-14

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41571224, 41571130082)

第一作者: 游微 (1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤水热循环研究。E-mail: youwei_job@163.com

通信作者: 樊军 (1974—), 男, 研究员, 主要从事土壤水热循环研究。E-mail: fanjun@ms.iswc.ac.cn

on the process and amount of soil erosion. The vegetation not only reduces runoff by canopy interception, but also decreases antecedent soil water content through consuming soil moisture.

Keywords: Loess Plateau; simulated rainfall; runoff; sediment loss

土壤侵蚀作为全球性的环境问题之一,在我国的黄土高原地区尤为严重。为此,近年在黄土高原地区实施了大面积的退耕还林(草)措施。降雨及其产生的径流是引起黄土高原土壤侵蚀的主要动力,而坡度和前期含水量是影响坡面侵蚀的重要因素之一^[1-3]。探讨坡度及前期含水量与坡面粗质地土壤侵蚀之间的关系,以此阐明退耕还林(草)下的减流减沙机制,对正确估算未来黄土高原粗质地土壤区的产流产沙过程有重要意义。坡度和前期土壤含水量作为影响降雨入渗、产流和产沙的重要因子被诸多研究所证实^[4-6]。坡度与坡面侵蚀的关系复杂,有研究认为径流量会随着坡度的增大而增大,而坡度对泥沙流失量的影响在一定坡度范围内随着坡度增加而增加,在一定范围内随着坡度的增加而减小,存在一个临界值^[6-7],但也有研究表明在一定雨强下,径流深随着坡度的增大而减小^[8-9];张佳琪等^[10]认为坡度对坡面产流产沙动态过程影响不大;Defersha等^[11]对埃塞俄比亚高原地区两种土壤类型进行模拟降雨试验,发现两种土壤在不同坡度下的产流产沙规律是不同的。对于前期含水量,大量研究表明随着前期含水量的增大,径流量和产沙量都逐渐增大^[12-15];Sadeghi等^[16]通过野外降雨试验发现土壤前期含水量对产流时间、径流量、径流系数和泥沙流失量有显著影响,但对含沙量影响不显著。不同土壤在不同前期含水量下的产流产沙特性也有差别,前期含水量对壤土的产流产沙过程影响不显著,但对砂黄土的产流规律影响显著^[17],红壤的前期含水量在20%时径流总量最大,产沙量最小^[18]。针对坡度和土壤前期含水量的大量研究都是在室内进行模拟试验,且多数都是分开各自研究,很少在不同坡度下研究土壤含水量对降雨侵蚀的影响以及在不同前期含水量下研究坡度对降雨侵蚀的影响。本研究中以黄土高原北部地区水蚀风蚀交错区粗质地土壤(沙黄土)为研究对象,进行不同前期含水量下坡度对侵蚀影响的野外人工模拟降雨试验,旨在进一步揭示前期含水量和坡度对粗质地土壤侵蚀的影响规律,探索退耕还草的水土保持机理,并为类似区域的土壤侵蚀预报提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验设于中国科学院水利部水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站(110°21′—110°23′E, 38°46′—48°51′N),位于陕西省榆林市神木县西沟乡六道沟村。海拔1 094.0~1 273.9 m,六道沟流域面积为

6.9 km²,地处毛乌素沙漠边缘地带,属于半干旱大陆性季风气候。冬春季干旱少雨多风沙,夏秋多雨,年平均气温8.4℃,多年平均降水量为408.5 mm,其中6—9月份的降雨量占全年降雨量的81%,且多以暴雨形式出现,年际变化较大,是典型的水蚀风蚀交错区。当地主要土壤类型有黄绵土、沙黄土、红粘土、风沙土以及坝地淤土。植被类型为干旱草原,因实施退耕还林(草)工程,植被覆盖度有所增加。紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)、次生天然长芒草(*Stipa bungeana* Trin.)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica* (Laxm.) Schindl.)、沙蒿(*Artemisia desertorum* Spreng.)等植物分布比较广泛,沙柳(*Salix psammophila* Schneid.)、柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)等灌木在该流域也有少量分布。

1.2 模拟降雨装置

野外模拟降雨采用针头式降雨模拟器,降雨器由支架、盛水槽、径流汇集器、振荡器四部分组成,通过控制盛水槽水头高度或者针头大小可以获得不同的降雨强度。盛水槽长×宽为1.5 m×1 m,距离地面的高度1.5 m,降雨支架总长2 m,宽1.3 m,有效降雨面积为1.5 m²。水槽底部针头为标准兽用“8”号或“6”号针头,形成的雨滴直径大小介于0.5~1.5 mm之间,针头之间的距离间隔1 cm,振荡器可根据实际调节频率以使雨滴均匀到达地面,该降雨器的突出特点就是雨滴直径和降雨强度均匀^[19]。考虑到野外水源匮乏以及兽用针头易被堵塞等实际原因,试验用水采用桶装纯净水。

1.3 试验方法

试验样地位于六道沟小流域内一块坡地上,降雨试验小区长×宽为1.5 m×1 m,对每个小区50 cm深翻耕,去除石块、植被根系等杂质并踩实,试验小区用铁皮围成,铁皮埋入地下10 cm,以减少表层水分侧渗,小区径流出口处设漏斗状铁片槽收集径流。为了对比研究,同时布设裸地与紫花苜蓿地两种处理。苜蓿小区在2016年5月行播苜蓿种子,每行间隔30 cm,每个小区共4行,定期清除杂草,裸地小区同样做定期除杂草处理。该试验设计为5°,15°,25°三种坡度,每个坡度设置3个重复,其中紫花苜蓿地和裸地小区各9块,共计18个降雨试验小区。每个小区连续进行3场降雨,共计54场降雨。

降雨强度设定为60 mm/h,降雨前用塑料薄膜遮盖降雨小区防止率定雨强时雨水进入小区,通过控制盛水槽水头高度调节雨强大小,多次率定雨强,当降雨强度达到要求时开始降雨,去掉遮盖的塑料布。

秒表记录开始降雨时间,降雨历时 60 min。根据六道沟流域土壤含水量的实际情况及预试验结果将土壤前期含水量定为低(4%~10%)、中(11%~17%)、高(17%~23%)3 个等级,因野外试验环境因素难以控制,低土壤前期含水量通过太阳照射,塑料薄膜遮盖防止天然降雨干扰等措施来达到,中前期含水量则是第一场降雨结束后,自然晾干 5~6 h 使水分充分入渗来达到,高前期含水量则是通过两场降雨结束后自然晾干入渗 1 h 达到。降雨雨滴打击到地表时秒表开始计时,当地表均匀产流,径流槽开始有成股水流产生,秒表记录产流时间,产流开始 20 min 内每 2 min 用水桶收集径流,之后到降雨 60 min 结束每间隔 5 min 收集径流。降雨过程中随机率定 2~3 次雨强,保证雨强在要求大小之内。

开始降雨前,在小区内上下两个部位各选取一点用土钻取土,取样深度为 5,15,25,35 cm,烘干法测定土壤含水量,并回填钻孔确保土壤表面平整。降雨结束后使用百分之一天平称量径流重,将径流静置一段时间后,取其泥沙晒干称重。

平均径流深度和土壤平均入渗率计算公式为:

$$H=10R/(tS) \quad i_a=(Pt\cos\alpha-10R/S)/t$$

式中: H 为平均径流深度(mm); R 为在时间 t 内的径流量(mL); S 为坡面实际承雨面积(cm^2); t 为降雨时间(min); i_a 为坡面平均入渗率(mm/min); P 为降雨强度(mm/min); α 为地表坡度($^\circ$)。

使用 Excel 和 SPSS 19.0 软件对数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 坡度与前期含水量对产流过程的影响

裸地和苜蓿地两种处理不同前期含水量下不同坡度的降雨产流变化过程见图 1。不同坡度的径流量变化趋势基本一致,在开始降雨的前 20 min,径流量迅速增大,之后趋于稳定,而坡度对径流量影响不显著($P>0.05$)。裸地的 5 $^\circ$ 和 15 $^\circ$ 产流量变化过程几乎重合,25 $^\circ$ 产流量变化稍低于其他两个坡度,方差分析表明裸地不同坡度之间稳定径流量差异不显著($P>0.05$)。苜蓿地的 25 $^\circ$ 径流量变化过程整体高于 15 $^\circ$,稳定径流量差异显著($P<0.05$),5 $^\circ$ 径流量变化过程在低、高前期含水量下和 15 $^\circ$ 径流量变化过程几乎重合,在中前期含水量下处于 5 $^\circ$ 和 25 $^\circ$ 径流量过程之间,5 $^\circ$ 稳定径流量与其他两个坡度差异不显著($P>0.05$)。

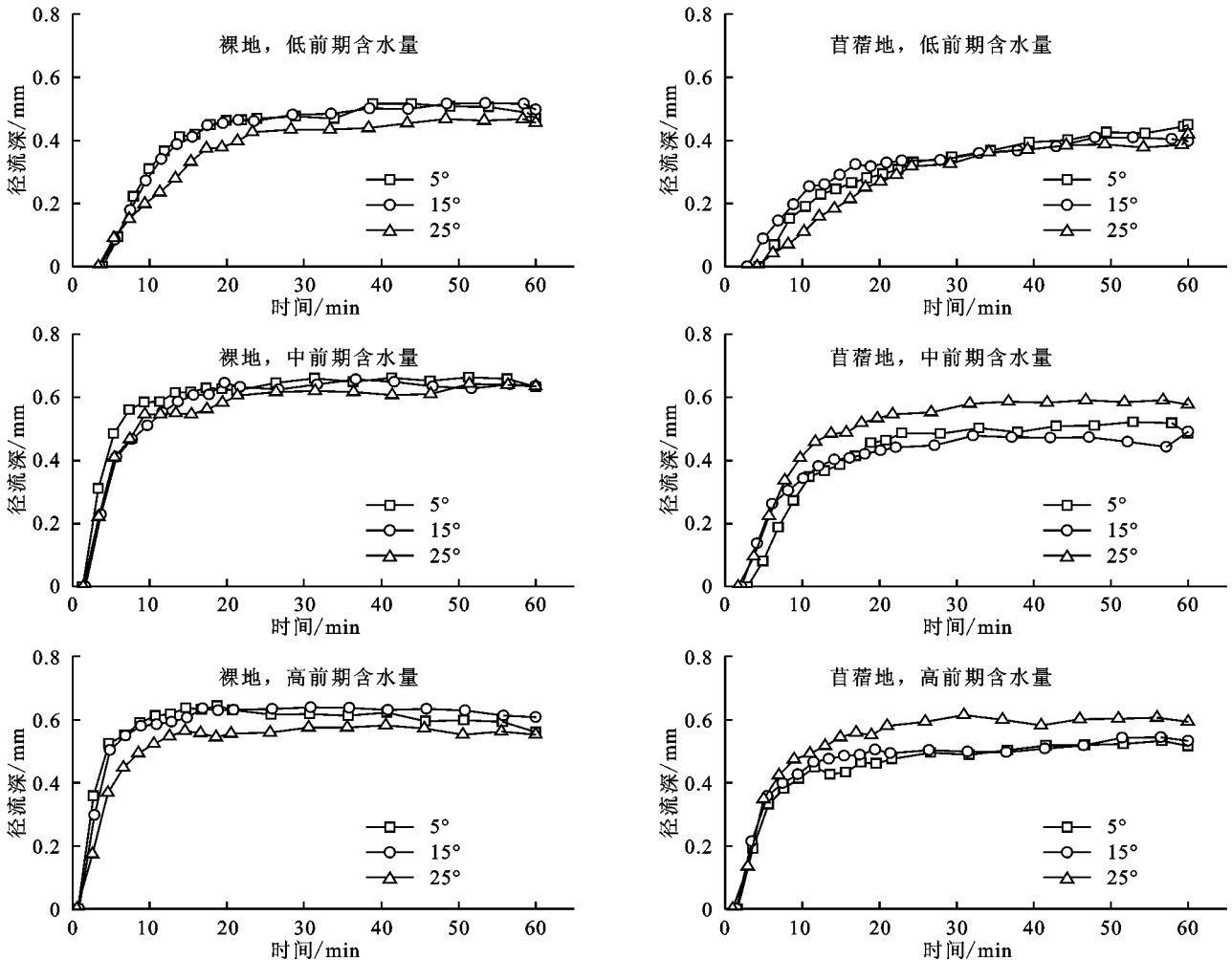


图 1 裸地、苜蓿地不同坡度和前期含水量下降雨产流的变化过程

在同一坡度水平下,径流量达到稳定的时间随着前期含水量的增加而缩短,裸地低前期含水量下不同坡度达到稳定径流的时间为 28.90~38.51 min,在中前期含水量达到稳定径流的时间为 15.39~21.69 min,在高前期含水量下达到稳定径流时间为 16.70~18.70 min。苜蓿地在低、中、高含水量下的不同坡度达到稳定径流的时间分别为 52.91~54.41,37.15~41.72,21.47~35.98 min,苜蓿地达到稳定产流时间显著长于裸地,这是因为随着前期含水量的增加,土壤入渗能力下降,苜蓿地由于植被根系等原因增加了土壤入渗;裸地和苜蓿地处理中、高前期含水量的产流过程中,各个阶段的产流量都高于低前期含水量的产流量,尤其是在稳定产流阶段,差异达到极显著水平($P < 0.01$),中前期含水量和高前期含水量的稳定产流量没有显著差异($P > 0.05$),这可能是因为粗质地土壤在低含水量下的土粒易被水流冲散携带,填塞土壤孔隙,使其形成致密层,减弱入渗能力,使得后两场

连续性降雨产流过程相近。

2.2 坡度与前期含水量对产沙过程的影响

不同前期含水量下不同坡度的降雨产沙量变化过程见图2。裸地和苜蓿地的产沙过程存在显著差异,说明地表植被状况影响坡地的产沙过程。裸地在降雨开始一段时间内产沙量迅速增加,达到一定值后在一定范围内波动并趋于稳定,低、中含水量下各阶段产沙量均随坡度的增大而逐渐增大,并且在降雨开始一段时间内,产沙量的增加速率随着坡度的增大而增大,高含水量下不同坡度的产沙量过程差异不大,可能是因为连续性降雨使得大部分易被剥蚀的泥沙已经被冲走而减弱了坡度的影响。苜蓿地的3个前期含水量水平下泥沙量的变化趋势基本一致,在降雨开始的一段时间内增大之后趋于稳定,相较于裸地稳定后的波动程度减小,各阶段产沙量都随着坡度的增大而增大,而且 25° 和 15° 之间的差异大于 15° 和 5° 之间的差异。

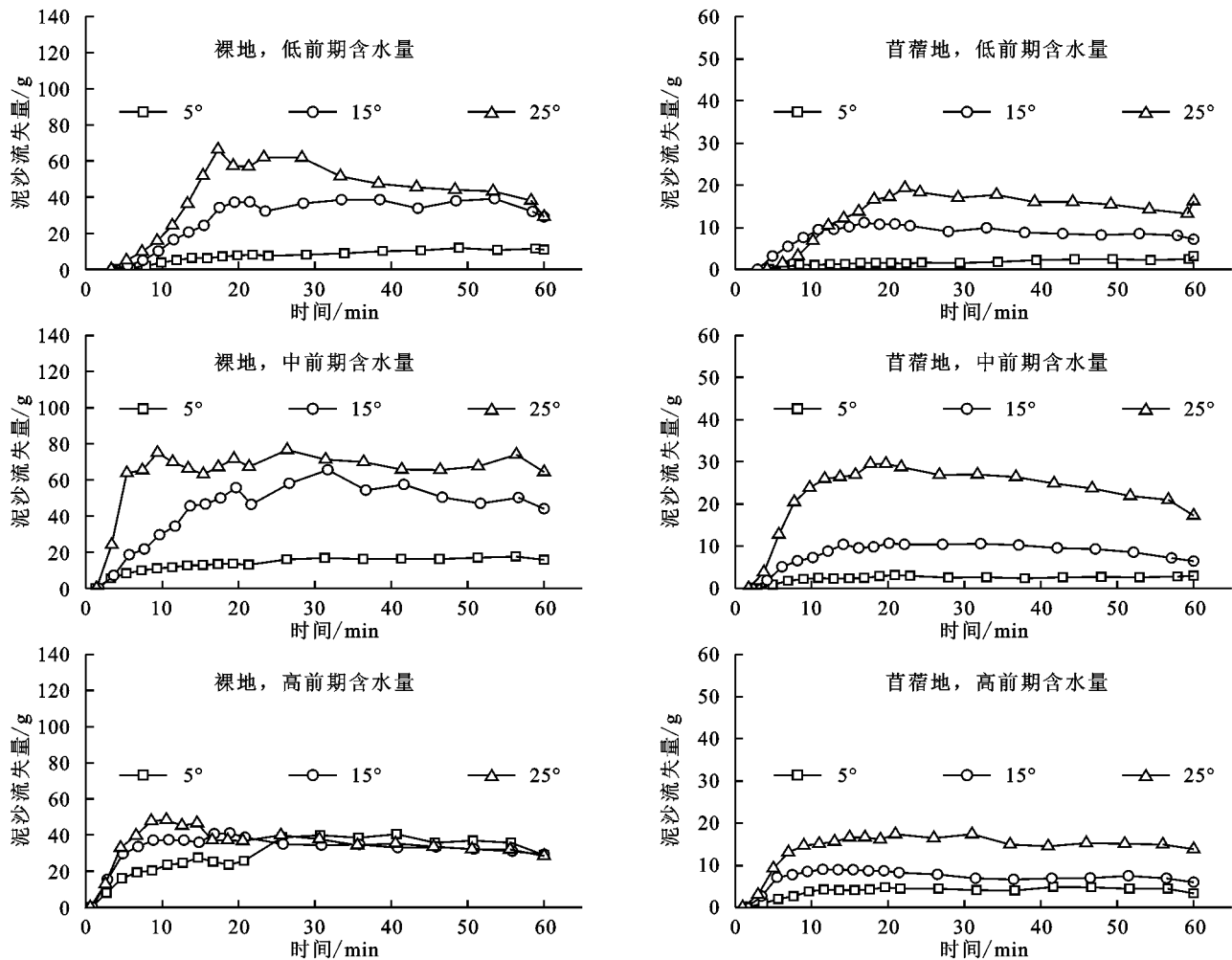


图2 裸地、苜蓿地不同坡度和前期含水量下降雨产沙的变化过程

在 5° 坡度下,裸地产沙量随着前期含水量的增加而增加,产沙量的增加速率随着前期含水量的增大而增大。在 15° 和 25° 坡度下,裸地产沙过程整体大小表现为中前期含水量>低前期含水量>高前期含

水量,裸地降雨初期地表土粒松散,易被击溅冲刷而使得产沙量增加,随着连续性降雨的进行,大部分易被剥蚀的泥沙已被冲刷完以及表层结皮形成等原因使得产沙量减少。苜蓿地产沙过程随前期含水量的

变化过程复杂,在 5° 坡度下,苜蓿地产沙规律与裸地处理基本一致,均表现为随着前期含水量的增加而增加,但其增加速率低于裸地,在 15° 坡度下,低前期含水量稳定阶段的产沙量最高,而 25° 坡度下中前期含水量稳定阶段的产沙量最高。

2.3 坡度与前期含水量对产流产沙特征的影响

2.3.1 坡度和前期含水量对产流时间的影响 产流时间在一定程度上反映了产流前土壤物理状况差异。在该试验中,裸地和苜蓿地的产流时间均随前期含水量的增加而缩短,且差异均达极显著水平($P < 0.01$)。相同坡度下,裸地不同前期含水量的产流时间差最大为 191

s,最小为 37 s,苜蓿地不同前期含水量的产流时间差最大为 193 s,最小为 41 s(表 1)。在相同水平的前期含水量下,苜蓿地的初始产流时间长于裸地,这是因为植被叶片等拦蓄降雨使得产流时间延长,以及裸地在连续降雨中产生结皮而缩短了中、高前期含水量的产流时间。

裸地的坡度对产流时间的影响不显著($P > 0.05$),但苜蓿地的坡度对产流时间影响显著($P < 0.05$)。苜蓿地在中、高前期含水量下,产流时间均随坡度的增大而减小,低前期含水量下的产流时间为 $5^{\circ} > 25^{\circ} > 15^{\circ}$,这可能是因为坡度对产流时刻的影响在一定程度上被前期含水量掩盖所致。

表 1 裸地及苜蓿地降雨入渗、产流产沙的相关参数

植被状况	坡度/ ($^{\circ}$)	土壤前期 含水量/%	承雨量/ mm	产流 时间/s	泥沙 流失量/g	径流量/ mm	平均入渗率/ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	含沙率/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)
裸地	5	8.6	59.8	234±20Aa	478.1±166.9Cb	25.3±2.9Ab	0.6±0.05Aa	12.8±4.5Ca
	5	13.8	59.8	80±12Ab	1119.3±421.4Ca	36.5±2.0Aa	0.4±0.03Ab	20.8±8.6Cab
	5	20.7	59.8	43±9Ac	1010.2±182.8Cb	35.3±2.6Aa	0.4±0.04Ab	19.4±4.8Cb
	15	8.4	58.0	211±53Aa	1762.9±128.1Bb	25.3±3.5Ab	0.6±0.06Aa	48.9±8.7Ba
	15	16.0	58.0	99±25Ab	2772.3±215.2Ba	35.0±2.7Aa	0.4±0.04Ab	54.7±0.2Bab
	15	22.0	58.0	52±5Ac	1982.6±345.5Bb	35.8±2.4Aa	0.4±0.04Ab	38.2±5.7Bb
	25	5.8	54.4	200±74Aa	2472.5±702.9Ab	22.3±2.1Ab	0.6±0.03Aa	83.4±29.8Aa
	25	17.0	54.4	84±9Ab	3949.7±652.5Aa	35.1±5.6Aa	0.4±0.09Ab	83.9±24.5Aab
	25	23.8	54.4	34±7Ac	2120.2±730.0Ab	31.9±4.3Aa	0.4±0.07Ab	48.3±10.9Ab
	25	3.8	59.8	265±55Aa	101.9±58.5Ca	19.0±2.6Ab	0.7±0.04Aa	3.6±1.8Ca
苜蓿地	5	15.9	59.8	174±35Ab	145.0±84.3Ca	25.6±1.7Aa	0.6±0.03Ab	3.7±1.9Ca
	5	22.3	59.8	97±24Ac	234.8±119.4Ca	27.7±3.8Aa	0.5±0.06Bb	6.0±3.9Ca
	15	4.5	58.0	174±15Ba	493.4±30.6Ba	19.3±1.0Ab	0.7±0.02Aa	17.7±0.2Ba
	15	17.8	58.0	129±36Bb	509.5±87.5Ba	24.5±3.7Aa	0.6±0.06Ab	14.4±1.4Ba
	15	22.4	58.0	88±30Bc	425.2±175.0Ba	28.6±4.5Aa	0.5±0.07Bb	10.2±3.0Ba
	25	5.0	54.4	251±41Ba	798.0±503.6Aa	17.1±4.2Ab	0.7±0.06Aa	31.9±14.6Aa
	25	18.6	54.4	103±25Bb	1375.2±438.5Aa	30.4±2.0Aa	0.5±0.03Ab	32.9±8.6Aa
	25	22.8	54.4	59±14Bc	873.2±277.4Aa	32.7±2.2Aa	0.4±0.03Bb	19.4±5.2Aa

注:同一列中同一前期含水量下带有不同大写字母表示不同坡度的产流产沙参数在 0.05 水平上差异显著;同一列中同一坡度下带有不同小写字母表示不同土壤前期含水量的产流产沙参数在 0.05 水平上差异显著;坡度和土壤前期含水量之间交互作用不显著;土壤前期含水量,即全坡面两测点 0—10 cm 平均含水量。

2.3.2 坡度和前期含水量对径流量的影响 前期含水量对坡地降雨—入渗—产流过程有显著影响。在不同坡度下,裸地的径流量大小表现为中前期含水量>高前期含水量>低前期含水量,这是因为第一场降雨的前期含水量低,土壤干燥,产流少且慢,而第二、三场雨的土壤入渗相对稳定,产流差别不大,前期含水量对裸地和苜蓿地径流量有极显著影响($P < 0.01$),裸地在相同的坡度下,前期含水量由低水平增加到中水平、低水平增加到高水平,径流量分别增加 38.2%~52.8%,39.7%~42.8%,苜蓿地径流量分别增加 27.3%~77.8%,45.5%~91.1%(表 1),裸地和苜蓿地径流量随着 0—10 cm 土层前期含水量的增加而增加(图 3),裸地相关系数为 0.63,苜蓿地相关系数为 0.92,在相同坡度水平下,苜蓿地各前期含水量的径流量都低于相同前期含水量的裸地径流量,

分别减少了 27.4%~42.6%(5° 下),25.2%~42.9%(15° 下),15.5%~30.4%(25° 下),说明植被通过拦蓄径流、增加入渗等可减少径流流失。

裸地坡度对径流量的影响未达显著水平($P > 0.05$),但在不同的前期含水量下,径流量均随坡度的增大而减小,这是因为随着坡度的增加,在同样的坡长及降雨倾角下受雨面积减小,降雨在单位时间单位面积产生的径流量减小,苜蓿地坡度对径流量的影响不显著($P > 0.05$),在低前期含水量下径流量随着坡度的增大而减小,在高前期含水量下径流量随着坡度的增大而增大(表 1)。在相同的前期含水量下,各坡度苜蓿地的径流量低于裸地的径流量,分别减少了 30.4%~33.2%(低含水量下),15.5%~42.6%(中含水量下),25.2%~27.4%(高含水量下),这表明在一定的坡度范围内,植被覆盖有效减缓径流,增加入

渗,显著减少径流量。

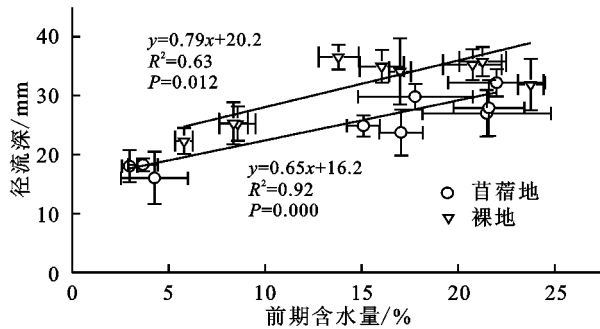


图3 裸地和苜蓿地0—10 cm前期含水量与径流量的关系

2.3.3 坡度和前期含水量对泥沙流失量的影响 裸地前期含水量对泥沙流失量影响显著($P < 0.05$),裸地中前期含水量的泥沙流失量显著高于低前期含水量和高前期含水量的泥沙流失量,相同坡度下中前期含水量相较于低前期含水量增加了57.3%~134.1%,中前期含水量相较于高前期含水量增加了10.8%~86.3%。苜蓿地在5°坡度下,泥沙流失量随着前期含水量的增大而增大,而在15°和25°坡度下,中等水平含水量下的泥沙流失量高于低前期含水量和高前期含水量的泥沙流失量,但前期含水量对泥沙流失量的影响并未达到统计上的显著水平($P > 0.05$),这是因为裸地地表降雨初期土粒比较松散,抗蚀能力差,雨滴击溅和径流冲刷强烈,随着土壤前期含水量的增加,地表的松散土粒减少,表层结皮的形成以及土壤入渗稳定等原因都使得坡面侵蚀强度减小,产沙量减小,而苜蓿地植被覆盖能够通过减少雨滴直接击溅,根系固土等来减少水土流失,降低土壤侵蚀力使得不同土壤前期含水量下的泥沙流失量差异不大。

雨滴击溅是降雨过程中泥沙流失的主要来源,径流搬运能力也会影响坡面泥沙流失量。坡度越大,坡面土壤稳定性下降,更易发生侵蚀。本试验中坡度对裸地和苜蓿地的泥沙流失量均呈极显著影响($P < 0.01$),在不同的前期含水量下,裸地和苜蓿地的泥沙流失量都随着坡度的增大而增大,且增加速率随着坡度的增大而减小。在相同的前期含水量下,裸地由5°增加到15°,15°增加到25°的泥沙流失量分别增加96.3%~268.7%,6.9%~40.3%,苜蓿地的泥沙流失量分别增加81.1%~384.2%,61.7%~169.9%。裸地的泥沙流失量高于苜蓿的泥沙流失量,在低前期含水量下,裸地5°,15°,25°的泥沙流失量是苜蓿地泥沙流失量的3.1~4.7倍,中前期含水量和高前期含水量下的倍数分别为2.9~7.7倍,2.4~4.7倍,这说明在一定的坡度范围内植被能显著减少水土流失,有较好的水土保持功效。

2.3.4 坡度和前期含水量对平均入渗率和含沙率的影响 前期含水量对裸地和苜蓿的平均入渗率均有显著影响($P < 0.05$),裸地和苜蓿地低前期含水量的平均

入渗率与中、高前期含水量的平均入渗率有显著差异。前期含水量对裸地径流含沙率的影响显著($P < 0.05$),而对苜蓿地的径流含沙率影响不显著($P > 0.05$),裸地在中前期含水量下的含沙率最高。坡度对裸地和苜蓿的平均入渗率没有显著影响($P > 0.05$);而裸地和苜蓿地的含沙率都随着坡度的增加而显著增加($P < 0.01$)。

3 讨论

陈洪松等^[20]在黄土高原沟壑区、秦川等^[21]在紫色丘陵区的研究均表明前期含水量越高,产流越快,在本研究得出相同结论,粗质地土壤条件下,土壤含水量的升高,减少了入渗水的库容,必然导致产流量和产流速度增加。对比两个处理发现,裸地随着土壤含水量的增加,其产流的增加幅度大于苜蓿地,反映的是有植被存在条件下,不但减少了产流量,而且减少了随着前期含水量增加而径流量增加的幅度(图3)。对不同深度土层的前期含水量与产流的分析发现,苜蓿地径流量和0—10,10—20 cm土层前期含水量呈极显著相关关系,但是和20—30 cm和30—40 cm土层含水量关系并不密切,这是因为通过连续降雨增加土壤前期含水量过程中,苜蓿地尽管产流量少于裸地,但是其入渗量并未超过裸地,部分水分被冠层截留和苜蓿生长消耗。裸地条件下,0—10,10—20,20—30,30—40 cm土层含水量和径流量之间均有显著的线性相关关系,相关系数并不随着深度的增加而降低,说明裸地的降雨产流过程会受到更深层土壤含水量的影响。对于不同前期含水量下坡面的产沙特征大量的研究都表明,不同的土壤有不同的产沙特性,其并不会随着前期含水量递增或者递减,而是存在一个阈值,黑垆土在13%~17%,而壤土和砂黄土的泥沙流失量最少的最优前期含水量为11.3%和12.7%^[10,13,17]。

坡度作为影响土壤侵蚀的重要因素之一,大量研究针对其产流特性的研究。朱永杰等^[7]研究结果表明,草地的径流量会随着坡度的增大而增大,不同雨强条件下,不同坡度的径流系数规律均呈先快速增加,一段时间后趋于稳定;而张会茹等^[9]研究结果显示径流量随坡度变化比较复杂,在50 mm/h雨强下,径流量随着坡度的增加而减小,在75 mm/h的雨强下,径流量随坡度的增加先增大后减小;王添等^[22]研究认为径流总量随坡度先增大后减小。本研究中,径流量随坡度的变化比较复杂,并未随着坡度增大而增大,甚至出现减小,这是因为随着坡度的增加,在同样的坡长及降雨倾角下受雨面积减小,降雨在单位时间单位面积产生的径流量减小。

自退耕还林(草)以来,黄土高原植被恢复是生态环境建设的重要部分。植被覆盖具有增加入渗、拦蓄截流、削弱土壤侵蚀和提高土壤抗冲性的作用。本文通过裸地和苜蓿地在不同前期含水量和不同坡度对比得出

了一致的结论,苜蓿地相较于裸地在不同坡度、不同前期含水量下都显著低于裸地的径流量、泥沙流失量,这是因为苜蓿通过冠层拦截雨滴、根系固土、增加入渗等实现水土保持作用;但是,苜蓿也减少了通过径流方式进入流域水循环的水量。与此同时,苜蓿耗水强烈也使得降水入渗深度变浅,入渗量减小,甚至导致土壤剖面发生干化现象,可能影响区域地下水的入渗补给。

4 结论

(1)坡度对坡面产流动态过程影响比较复杂,裸地不同坡度之间稳定径流量差异不显著,苜蓿地 25°径流量过程整体高于 15°径流量过程,且稳定径流量差异显著。裸地和苜蓿地的中、高前期含水量的径流量过程显著高于低前期含水量的径流量过程,稳定产流阶段存在极显著差异。对于产沙过程,裸地低、中含水量下各阶段产沙量都随着坡度的增大而逐渐增大,苜蓿地在 3 个前期含水量水平下,各阶段产沙量都随着坡度的增大而增大。前期含水量在不同坡度水平下对产沙过程的影响更加复杂,需进一步研究探讨。

(2)裸地坡度对径流总量的影响达到极显著水平,苜蓿地的坡度对径流总量影响不显著,裸地和苜蓿地的泥沙流失总量均随着坡度的增大而显著增大,在相同的前期含水量下,裸地由 5°增加到 15°,15°增加到 25°的泥沙流失量分别增加 96.3%~268.7%,6.9%~40.3%,苜蓿地的泥沙流失量分别增加 81.1%~384.2%,61.7%~169.9%。前期含水量对裸地和苜蓿地径流总量有极显著影响,裸地在相同的坡度下,前期含水量由低水平增加到中水平、低水平增加到高水平,径流量分别增加 38.2%~52.8%,39.7%~42.8%,苜蓿地径流量分别增加 27.3%~77.8%,45.5%~91.1%,裸地对泥沙流失量的影响并未达显著水平,苜蓿地的泥沙流失量随着前期含水量的增加而显著增加。在相同坡度和前期含水量下,苜蓿的径流量和泥沙流失量均显著低于裸地,说明粗质地土壤植被覆盖是有效的减流减沙措施之一。

参考文献:

[1] Castillo V, Gomez-Plaza A, Martinez-Mena M. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semi-arid catchments: A simulation approach[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 284(1/4): 114-130.

[2] 刘目兴, 聂艳, 于婧. 不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程[J]. *生态学报*, 2012, 32(3): 871-878.

[3] 王占礼, 靳雪艳, 马春艳, 等. 黄土坡面降雨产流产沙过程及其响应关系研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(2): 24-28.

[4] Zhu Q, Nie X, Zhou X, et al. Soil moisture response to rainfall at different topographic positions along a mixed land-use hillslope[J]. *Catena*, 2014, 119(8): 61-70.

[5] 张玉斌, 郑粉莉. 近地表土壤水分条件对坡面土壤侵蚀

过程的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2007, 5(2): 5-10.

[6] 和继军, 蔡强国, 刘松波. 次降雨条件下坡度对坡面产流产沙的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(5): 1263-1268.

[7] 朱永杰, 毕华兴, 霍云梅, 等. 坡度与降雨强度对狗牙根草地产流的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(6): 20-25.

[8] 盛贺伟, 郑粉莉, 蔡强国, 等. 降雨强度和坡度对粘黄土坡面片蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(6): 13-17.

[9] 张会茹, 郑粉莉. 不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 40-43.

[10] 张佳琪, 王红, 代肖, 等. 坡度对片麻岩坡面土壤侵蚀和养分流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(6): 1-5.

[11] 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*, 2011, 15(7): 2367-2375.

[12] Truman C C, Potter T L, Nuti R C, et al. Antecedent water content effects on runoff and sediment yields from two Coastal Plain Ultisols[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(8): 1189-1196.

[13] 王丽, 王力, 王全九. 前期含水量对坡耕地产流产沙及氮磷流失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(11): 2171-2178.

[14] Yi C, Fan J. Application of HYDRUS-1D model to provide antecedent soil water contents for analysis of runoff and soil erosion from a slope on the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2016, 139(4): 1-8.

[15] Radatz T F, Thompson A M, Madison F W. Soil moisture and rainfall intensity thresholds for runoff generation in southwestern Wisconsin agricultural watersheds[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(25): 3521-3534.

[16] Sadeghi S H, Moghadam E S, Darvishan A K. Effects of subsequent rainfall events on runoff and soil erosion components from small plots treated by vinasse[J]. *Catena*, 2016, 138(11): 1-12.

[17] 王辉, 王全九, 邵明安. 前期土壤含水量对坡面产流产沙特性影响的模拟试验[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(5): 65-68.

[18] 沈紫燕, 王辉, 平李娜, 等. 前期土壤含水量对粘性红壤产流产沙及溶质运移的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 58-62.

[19] 孙恺. 针管式人工降雨装置的研究与应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.

[20] 陈洪松, 邵明安, 张兴昌, 等. 野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗、产流试验研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(2): 5-8.

[21] 秦川, 何丙辉, 王亮, 等. 紫色土区土壤初始含水量对坡面径流溶质流失的影响[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(1): 19-24.

[22] 王添, 任宗萍, 李鹏, 等. 模拟降雨条件下坡度与地表糙度对径流产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(6): 1-6.