

多因素耦合作用下黄土植被坡面水沙养分流失模拟

高爽^{1,2}, 吴磊^{1,2,3}, 迟宇博^{1,2}, 李蕊^{1,2}

(1.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100;2.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100;3.西北农林科技大学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)

摘要: 采用人工模拟降雨试验研究不同雨强(60, 90, 120 mm/h)、不同坡度(10°, 15°, 20°)、不同生物炭含量(0, 3%, 6%)等多因素耦合作用下黄土植被坡面水沙及养分流失规律。结果表明:(1)水沙及 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的流失随着雨强的增大而增大, NO_3^--N 随雨强的增大呈先上升后下降的趋势,径流及氮磷与坡度的规律性不明显,雨强坡度与 k 值(产沙速率系数)变化率的线性关系中,雨强的影响较大。(2)产流产沙过程相似,均随降雨历时先上升后趋于平稳, NO_3^--N 与降雨历时呈幂函数关系, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 在流失过程中最大浓度与最小浓度比为1~2,且在侵蚀产沙及 NO_3^--N 的流失过程中,雨强与生物炭相关性极显著。(3)生物炭含量 $\geq 3\%$ 会增加侵蚀产沙及 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的流失,雨强为60, 90 mm/h时, NO_3^--N 流失量随生物炭的增多呈先减小后增大的趋势,雨强为120 mm/h时, NO_3^--N 流失量随生物炭添加量的增大呈上升趋势。研究结果可以为黄土丘陵沟壑区水土资源管理提供科学的指导。

关键词: 黄土坡面; 雨强; 坡度; 生物炭; 土壤养分

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)04-0104-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.016

Simulation of Runoff-sediment-nutrient Loss on Loess Vegetated Sloping Land Under the Coupling Effect of Multi-factors

GAO Shuang^{1,2}, WU Lei^{1,2,3}, CHI Yubo^{1,2}, LI Rui^{1,2}

(1.Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: The simulated rainfall experiments were conducted to explore the loss rules of runoff, sediment, and nutrient on the loess vegetated sloping land under the coupling effects of different rainfall intensity (60 mm/h, 90 mm/h, 120 mm/h), slope (10°, 15°, 20°), and biochar content (0, 3%, 6%). The results showed that: (1) The loss of runoff, sediment, and $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ increases with the increase of rainfall intensity, and NO_3^--N increases firstly and then decreases with the increase of rainfall intensity. The rules of runoff, nitrogen, and phosphorus with slope were not obvious. The influence of rainfall intensity was greater in the linear relationship between the rainfall intensity, slope, and the changing rate of k value (sediment yield rate coefficient). (2) The processes of runoff and sediment yield were similar, they both first rose and then stabilized with the progress of rainfall. The NO_3^--N had a power function relationship with the rainfall duration. The ratio of the maximum concentration to the minimum concentration of $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ during loss was between 1 and 2. In the process of sediment yield and NO_3^--N loss, the correlation between rainfall intensity and biochar was extremely significant. (3) The increase of biochar content ($\geq 3\%$) could increase the sediment yield and loss of $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$. When the rainfall intensity was 60 mm/h and 90 mm/h, the amount of NO_3^--N loss decreased firstly and then increased with the increase of biochar content. When the rainfall intensity was 120 mm/h, the amount of NO_3^--N loss depended on the amount of added biochar. The results can provide scientific guidance for the management of soil and water resources in the loess hilly and gully region.

收稿日期:2019-12-22

资助项目:国家自然科学基金项目(51679206);陕西省青年科技新星项目(2017KJXX-91);“仲英青年学者”项目(Z111021720)

第一作者:高爽(1996—),女,在读硕士研究生,主要从事非点源污染研究。E-mail:571543971@qq.com

通信作者:吴磊(1981—),男,副教授,博士,主要从事流域水土环境模拟与调控研究。E-mail:lxwl@nwsuaf.edu.cn

Keywords: loess slope; rainfall intensity; slope; biochar; soil nutrient

黄土高原水土流失强度大、速度快、面积广,流失面积达 47 km²,占该区总面积 7 成左右,虽然目前年均入黄泥沙量已从 16 亿 t 降至 3 亿 t 左右,减幅达 80%,但侵蚀状况仍然十分严重^[1]。严重的水土流失不仅破坏农田、堵塞河道,使土地贫瘠低产,而且流失的氮磷对水环境也存在潜在的威胁^[2]。模拟降雨试验具有试验区可控、高效、准确、标准化等特点^[3]。因此,通过模拟降雨掌握不同降雨条件下水土养分流失过程与规律是区域水土保持规划的关键。

多数研究^[4]表明,雨强、坡度及生物炭能够明显改变坡面水文过程。首先,降雨是坡面径流的物质基础和前提条件,降雨特征的异同对坡面径流、土壤团聚体有着重要的作用。不同影响雨滴的溅蚀作用能够使较大的土壤团聚体分散成粒径较小的土壤颗粒,因此改变雨强会影响溅蚀量的大小^[5],且雨滴的击溅能够改变表土的结皮过程及坡面入渗^[6],进而影响径流的形成过程;第二,坡度的变化对坡面水文过程的影响较为复杂,坡度对水土流失的影响主要表现为对坡面流体力学特性的影响,相同降雨条件下,阻力系数随坡度的增加呈现出先增加后减小的趋势^[7],水流阻力规律的变化影响了土壤入渗率^[8];第三,生物炭由于特殊的物化性质作为土壤改良剂研究较多,施加生物炭可提高土壤入渗量,起到保水保沙的作用,同时减少坡地养分流失,但也有研究^[9]表明,生物炭含量≤3%时能够延迟产流时间,添加 1%的生物炭才具有保水保沙的作用,过量的生物炭会降低土壤抗破碎性,破坏团聚体稳定性,进而加剧土壤侵蚀。另外,土壤养分的流失与产流产沙量密切相关,有研究^[10]表明,径流中的氮素、磷素浓度与径流中的颗粒物质浓度呈线性相关;但也有研究^[11]表明,土壤中的氮素、磷素可溶解于径流中,伴随径流迁移,且土壤含水量不同时,溶解程度也有所不同。

综上,模拟降雨条件下不同雨强、不同坡度、不同生物炭添加量对坡面水土养分流失的影响已有相关研究,但针对多因素耦合条件下黄土植被坡面连续性降雨水土养分流失的研究还相对较少,且对于不同量级生物炭条件下坡面水土养分流失程度的研究也较薄弱。为此,本研究以黄绵土植被坡面为对象,探索不同雨强、坡度、生物炭条件下水、沙、NO₃⁻—N、PO₄³⁻—P 耦合流失特征,以期为黄土丘陵沟壑区多尺度水土养分流失调控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置与材料

本试验于 2019 年 6 月 27 日至 8 月 9 日在黄土

高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅进行,采用侧喷式自动模拟降雨系统,该系统模拟降雨的雨滴大小、动能与天然降雨相似。试验所用径流槽为自行设计的 3 个相同尺寸的可变坡径流钢槽(图 1),长×宽×高分别为 2 m×1 m×0.5 m,径流槽从中间一分为二,形成 6 个小径流槽,将生物炭以 0,3%,6%(质量百分比)3 种不同的含量分别添加至 3 组径流槽的土壤中。径流槽出口处安装“V”形槽收集水样,调节降雨装置后采用“五点法”率定使降雨均匀度达到 80%以上。

本试验用土取自延安市安塞县楼坪工程现场的黄绵土,通过晒土、筛土,将土壤中的石块、根系等杂物过 1 cm 筛分离出土壤,土壤中黏粒(<0.001 mm)、粉粒(0.005~0.05 mm)、砂粒(>0.05 mm)的含量分别为 11.62%,65.10%,23.74%。采用陕西省亿鑫生物能源科技开发有限公司提供的原料为苹果枝条、600℃砖窑法烧制而成的锯末生物炭,粒径为 80~400 目,将生物炭以 3%,6%(质量百分比)2 种不同的含量添加至不同径流槽的土壤中,并设置不添加作为对照。土壤初始含氮量为 0.43 g/kg,初始含磷量 0.495 g/kg,通过添加肥料(尿素、磷酸二氢钾),控制土壤氮含量为 1.4 g/kg,磷含量为 1 g/kg。具体过程为:将肥料加入需要添加的水中,充分搅拌,溶解后装入喷雾器中,将溶解后的肥料均匀喷洒至土壤中,将喷洒过肥料的土壤和计算所需生物炭放入搅拌机中进行搅拌,确保肥料、生物炭与土壤均匀混合后装入径流槽,保持土壤含水量为 10%左右。

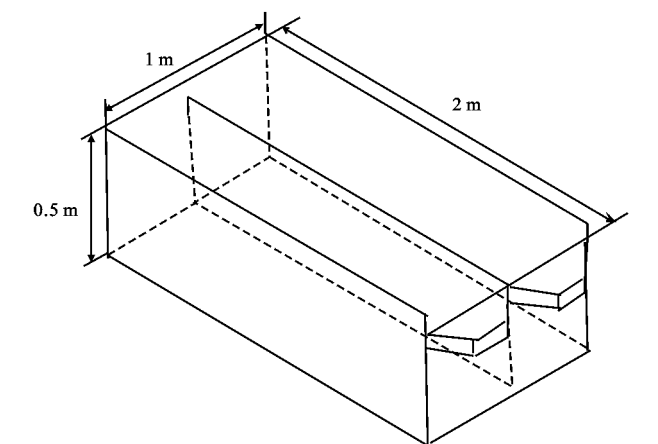


图 1 试验径流槽装置示意

1.2 试验方法

为确保供试土壤装填均匀,将试验所用径流槽调制水平,采用分层装填法将每层土壤表面抓毛以防分层,并控制填装后的土壤容重为(1.2±0.2)g/cm³。根据当地各站的降雨情况^[12],本次试验的降雨强度分别设定为 60,90,120 mm/h,雨量控制在 90 mm,

坡度设定为 10°,15°,20°,坡度范围能大致涵盖黄土高原丘陵沟壑区主要实际坡度。为实现生物炭对土壤结构的改良作用,沉积 1 周后进行黑麦草的条播,90 天后对植被坡面进行降雨,每场降雨结束后待土壤含水量保持在 10%左右时进行下一场降雨。添加 0%和添加 3%生物炭的坡面植被长势相似,添加 6%生物炭的坡面植被长势稍差。

本次试验测定内容包括 2 部分:一是径流和侵蚀产沙量;二是清水样中的硝态氮(NO_3^--N)与正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)。降雨开始后,待产流稳定记录产流时间,稳定产流前 20 min 每隔 1 min 接样 1 次,此后每 10 min 接样 1 次,接样时间均为 1 min。水样摇匀后测量体积,并取一部分均匀水样带回实验室供水质分析使用,剩余水样静置后,去掉上清液,在 120 °C 烘箱里烘干称其泥沙质量,按比例计算泥沙流失量。水样采用 0.45 μm 微孔滤膜过滤后用紫外分光光度计测定硝态氮(NO_3^--N)与正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)的浓度。

2 结果与分析

2.1 多因素耦合作用下径流变化特征

降雨是坡面径流的物质基础和前提条件,降雨特征的异同对坡面径流产生不同的影响^[4]。图 2 为不同坡度下 6 个径流槽的径流率总和随雨强的变化趋势。坡度为 10°时,90,120 mm/h 雨强的径流率分别是 60 mm/h 雨强的 1.66,2.37 倍;坡度为 15°时,90,120 mm/h 雨强的径流率分别是 60 mm/h 雨强的 2.24,2.89 倍;坡度为 20°时,90,120 mm/h 雨强的径流率分别是 60 mm/h 雨强的 2.08,2.93 倍;经方差分析后显示, $F_{\text{雨强}}=21.676$, $P=0$,径流率与雨强呈极显著相关($P<0.01$)。雨强 60 mm/h,坡度 20°时径流率最小,为 3 060.43 mL/min。同时,当其他因素相同时,径流率随坡度变化的规律不明显,当雨强为 60 mm/h,15°,20°径流率较 10°径流率分别减少 16.4%,22.2%;当雨强为 90 mm/h,15°,20°径流率较 10°径流率分别增加 12.5%,−2.5%;当雨强为 120 mm/h,15°,20°径流率较 10°径流率分别增加 2.0%,−3.7%。在雨强相对较小时,径流率随坡度的增大而减小,而雨强增大后径流率随坡度增大呈先增大后减小趋势,方差分析结果显示 P 为 0.109,坡度与径流率的相关性不显著。

由图 3 可知,不同雨强下每场降雨的产流速率随降雨历时逐渐增大后趋于平稳,坡度为 10°时,60,90,120 mm/h 雨强趋于平稳的产流速率分别达到 3 933.47,6 536.66,9 324.41 mL/min;坡度为 15°时,随着雨强的增大,稳定状态的产流速率分别达到 3 287.38,7 355.81,9 506.97 mL/min;坡度为 20°时,随着雨强的增大,稳定状态的产流速率分别达到

3 060.43,6 373.61,8 981.72 mL/min。由试验结果可知,在降雨过程中趋于平稳的产流速率与雨强呈显著正相关($P<0.05$)。从趋于平稳的时间来看,雨强为 60,90,120 mm/h 时,分别达到 55,30,20 min,雨强越大,趋于平稳的时间越短。

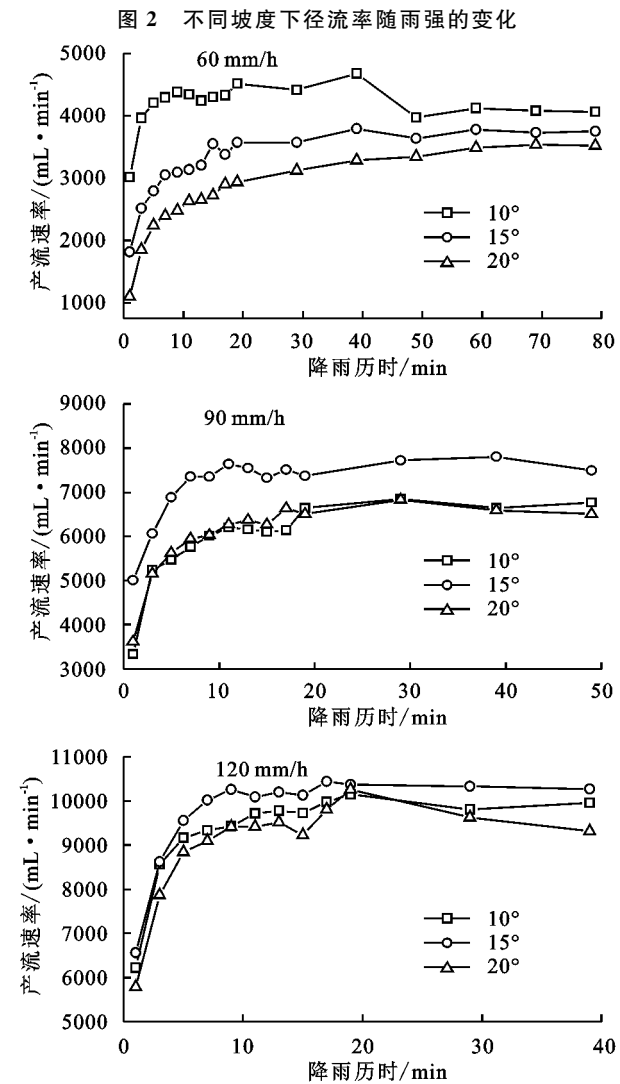
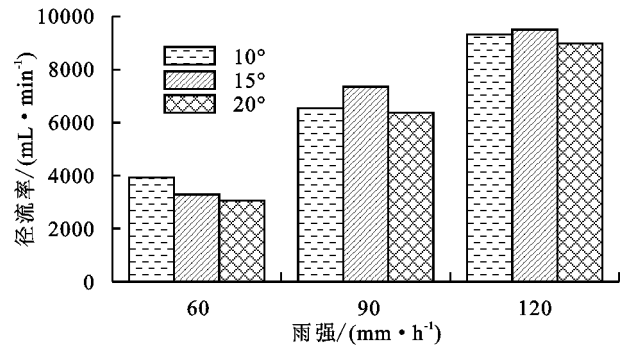


图 3 不同雨强下产流速率随降雨历时的变化

2.2 多因素耦合作用下泥沙变化特征

土壤侵蚀是坡面水土流失过程的重要组成部分,图 4 为不同坡度下 6 个径流槽的侵蚀泥沙总量随雨强的变化趋势。首先,相同坡度下总产沙量随降雨强度的增大而迅速增大,且在坡度为 15°时,增速的变化最为明显。当坡度为 10°时,90,120 mm/h 雨强的

产沙量分别是 60 mm/h 雨强产沙量的 3.2,6.7 倍;当坡度为 15°时,90,120 mm/h 雨强的产沙量分别是 60 mm/h 雨强产沙量的 13.6,28.1 倍;当坡度为 20°时,90,120 mm/h 雨强的产沙量分别是 60 mm/h 雨强产沙量的 3.8,6.9 倍;方差分析显示, $F_{雨强}=5.572,P=0.009$,雨强极显著影响产沙量($P<0.01$)。同时,当雨强较大时,总产沙量随坡度增加同样呈上升趋势,当降雨强度为 60 mm/h 时,15°,20°坡面产沙量分别是 10°坡面产沙量的 0.72,3.60 倍;降雨强度为 90 mm/h 时,15°,20°坡面产沙量分别是 10°坡面产沙量的 3.07,4.30 倍;降雨强度为 120 mm/h 时,15°,20°坡面产沙量分别是 10°坡面产沙量的 3.03,3.75 倍。

将不同场次降雨条件下的径流量设定为自变量,产沙量为因变量,径流量和产沙量可线性表达。将自变量系数定义为产沙速率系数,用 k 来表示, k 值越大,产沙越快^[13]。结果表明,坡度、雨强与 k 值均成正相关,说明坡度和雨强越大,产沙越快。

表 1 为其他因素相同时不同雨强下坡度与 k 值

表 1 不同雨强不同坡度下 k 值线性关系

雨强/ (mm · h ⁻¹)	坡度与 k 值 线性关系	R^2	坡度/ (°)	雨强与 k 值 线性关系	R^2
60	$y_1=307.43x_1-2888.7$	0.6881	10	$y_1=107.52x_2-5918.7$	0.9822
90	$y_1=5998.0x_1-2245.5$	0.9799	15	$y_1=370.40x_2-21995$	0.9978
120	$y_1=10537.0x_1-1642.4$	0.9307	20	$y_1=407.51x_2-20870$	0.9985

注: y_1 表示 k 值; y_2 表示 k 值变化率; x_1 表示坡度; x_2 表示雨强。

由图 5 可知,每场降雨的产沙速率随降雨历时有着相似的变化规律,大致表现为:前期快速上升,后波动下降,最后趋于平稳。坡度越大,进入平稳期的产沙速率越快;雨强越大,各坡面的产沙水平增长越快,当降雨强度>90 mm/h 时,15°,20°坡面对产沙量带来的影响减小。

2.3 多因素耦合作用下土壤 NO₃⁻-N 与 PO₄³⁻-P 流失特征

图 6(a)为不同雨强坡度条件下 6 个径流槽 NO₃⁻-N 流失总量的变化规律,当坡度不变时,NO₃⁻-N 的流失总量随雨强的增大呈先增加后减少的趋势,雨强为 90 mm/h 时 NO₃⁻-N 流失总量最大,雨强为 120 mm/h 时的流失总量高于 60 mm/h,但低于 90 mm/h。同时,以 10°的 NO₃⁻-N 流失总量为基准,雨强为 60 mm/h 时,15°,20°的 NO₃⁻-N 流失总量分别增加 27.3%,62.1%;雨强为 90 mm/h 时,15°,20°的 NO₃⁻-N 流失总量较 10°分别增加 42.0%,10.7%;雨强为 120 mm/h 时,15°,20°的 NO₃⁻-N 流失总量较 10°分别增加 27.0%,20.6%。在雨强相对较大时,NO₃⁻-N 流失量呈现出随坡度的增大先增加后下降的趋势,与径流率变化趋势类似。

的线性关系以及不同坡度下雨强与 k 值的线性关系,式中自变量的系数即为 k 值的变化率,分析可知, k 值变化率随着雨强、坡度的增大而增大; k 值变化率与雨强的相关关系可以表达为: $y_2=170.5x_2-9730.2$,与坡度的相关关系可以表达为: $y_2=30x_1-154.84$,自变量系数越大, k 值变化率受条件影响程度越大。坡度变化条件下,系数为 30,雨强变化条件下,系数为 170.5,表明 k 值的变化速率对于雨强变化的响应更为明显,且均为正相关。

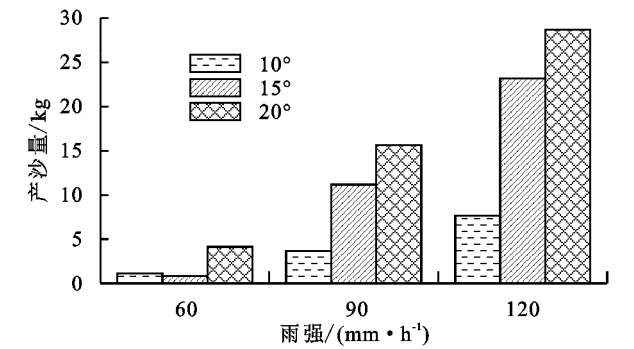


图 4 不同坡度下产沙量随雨强的变化

图 6(b)为不同降雨条件下 6 个径流槽 PO₄³⁻-P 流失总量的差异性,分析可知,总流失量最高出现在 90 mm/h 和 15°时,方差分析结果显示 $F_{雨强}=6.603,P=0.005$,雨强极显著的影响了 PO₄³⁻-P 的流失($P<0.01$)。在不同降雨条件下,PO₄³⁻-P 流失浓度随降雨波动剧烈,计算不同雨强、不同坡度条件下 PO₄³⁻-P 流失浓度随时间变化的最大值与最小值之比,比值为 1~2,说明 PO₄³⁻-P 流失浓度趋势性极小,并未出现一定的规律性。

图 7 为不同雨强和坡度下 6 个径流槽 NO₃⁻-N 平均流失浓度随降雨历时的变化趋势,NO₃⁻-N 浓度在降雨开始后达到峰值,随降雨历时迅速下降后逐渐趋于平稳。降雨强度为 60 mm/h 时,不同坡度 NO₃⁻-N 的稳定浓度呈现出 20°>15°>10°的规律,但在 90,120 mm/h 雨强时 NO₃⁻-N 趋于平稳的浓度并未与坡度出现相关性,即雨强相对较小时,坡度对于 NO₃⁻-N 流失浓度作用效果明显,雨强增大后坡度变化带来的响应减小,甚至没有。雨强不变时,15°坡度时 NO₃⁻-N 流失浓度的最大值与最小值之比皆高于 10°和 20°,表明坡度为 15°时,NO₃⁻-N 流失浓度变化最为剧烈,NO₃⁻-N 的最高流失浓度即

出现在 90 mm/h 和 15° 的降雨过程中,为 0.033 mg/mL。将所有场次降雨的 NO_3^- —N 流失浓度与降雨历时进行拟合,可知流失过程与降雨历时呈幂函数关系,拟合结果的 R^2 皆在 0.7 以上, $n \geq 12$, 表明 NO_3^- —N 的流失浓度与降雨历时相关性较好。

3 讨论

3.1 降雨强度对水土养分流失的影响

雨强不同导致单位时间内坡面承雨量不同,故径流率有所差异^[13]。相同坡度条件下径流率随雨强的增大呈上升趋势,与常松涛等^[14]的径流率随雨强增大而增大的研究结论一致,这是因为本研究试验期间植被虽有变化,但变化相对较小,对径流泥沙的影响可忽略不计。产流量随降雨历时先逐渐增加后趋于平稳,这是因为降雨起始时土壤含水率低,土壤入渗率较大,土壤入渗率从初渗到稳渗具有时变性,入渗能力的不断变化影响了黄绵土坡面的超渗产流,使径流量减小并趋于平稳,平稳后有些许波动,可能是因为坡面土壤中的包气带缺水量并非相同,且由于雨强的增大,单位时间内坡面接收雨量的增加使初渗到稳渗所需时间随之缩短。

径流的形成往往伴随着土壤的侵蚀,在黄土丘陵沟壑区,强降雨是造成土壤侵蚀的主要动力^[15]。产沙量随雨强的增大而增大,这是因为雨强增大导致雨滴动能击溅作用和径流冲刷同时增强,即分离能力和搬运能力增大,侵蚀产沙量受二者共同影响大幅提高。具体来说,在雨滴的击溅作用下,表层较大的土壤团聚体分散成粒径较小的土壤颗粒,大团聚体的分离为侵蚀产沙提供了物质来源^[16]。坡面薄水层的流速随着雨强的增

大而增大,加快了土壤颗粒的搬运,同时由于连续降雨,坡面形态已被破坏,加剧了土壤侵蚀。

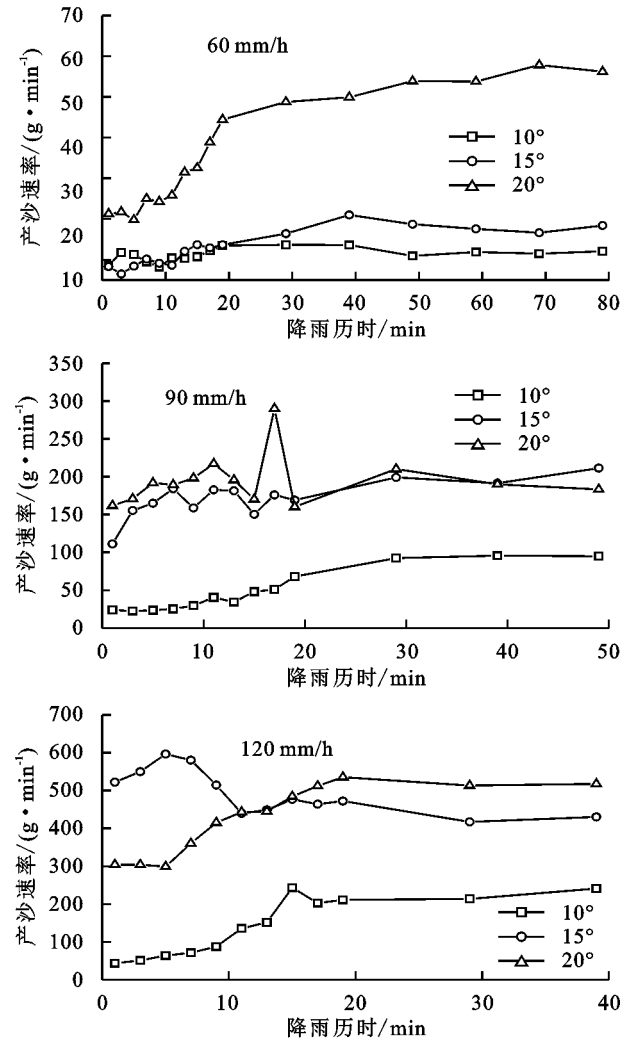


图 5 不同雨强下产沙速率随降雨历时的变化

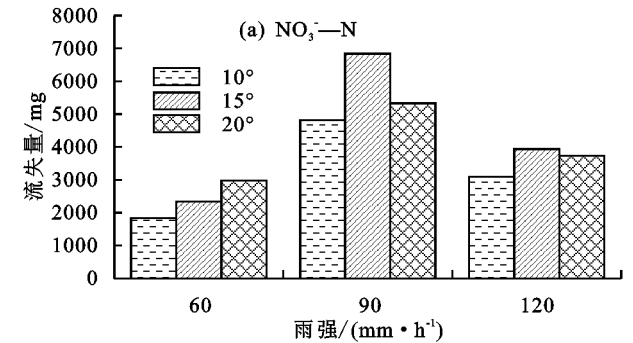
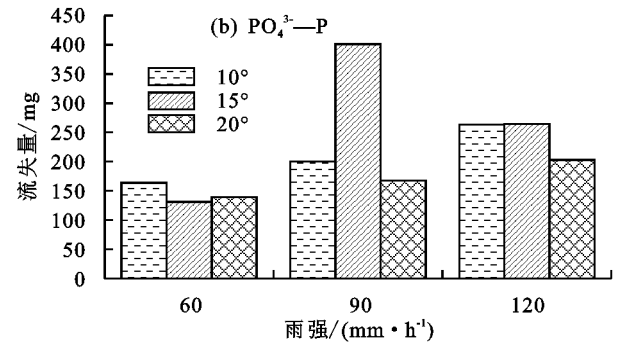


图 6 不同坡度下 NO_3^- —N、 PO_4^{3-} —P 流失量随雨强的变化



土壤养分的流失过程较为复杂,本试验中 NO_3^- —N 流失量随雨强的增大呈先上升后下降的趋势,这首先是因为雨强由 60 mm/h 增大到 90 mm/h 后,侵蚀产沙量的增多使更多土壤中 NO_3^- —N 溶解于径流中,其次径流的增加也提高了 NO_3^- —N 的迁移作用,在雨强 60 mm/h 时, NO_3^- —N 被冲刷至坡面下半部分累积,雨强增至 90 mm/h 后对累积的 NO_3^- —N 进行冲刷,导致总流失量增多。雨强增大到 120 mm/h 后,尽管冲刷作用增大,但剩余

NO_3^- —N 减少,且强降雨增大了坡面表层土壤的淋溶作用,使得 120 mm/h 雨强的 NO_3^- —N 流失量降低^[17]。 NO_3^- —N 浓度在降雨开始后达到峰值,随降雨历时迅速下降后逐渐趋于平稳,这是因为淋溶作用使得坡面上层的 NO_3^- —N 一部分随着径流流失,另一部分淋溶至坡面下层,所以在降雨前期 NO_3^- —N 流失浓度较高,降雨后期坡面上层所剩易于流失的 NO_3^- —N 含量较少,且不断累积的雨量对 NO_3^- —N 产生了一定的稀释作用,导致浓度降低,且当坡面

土壤表层和地表径流中的 NO_3^- —N 交换趋于平稳时, NO_3^- —N 流失浓度也达到平稳。 PO_4^{3-} —P 流失总量随雨强的增大而增多,这是因为雨强的增大使溶出的磷酸盐增多。

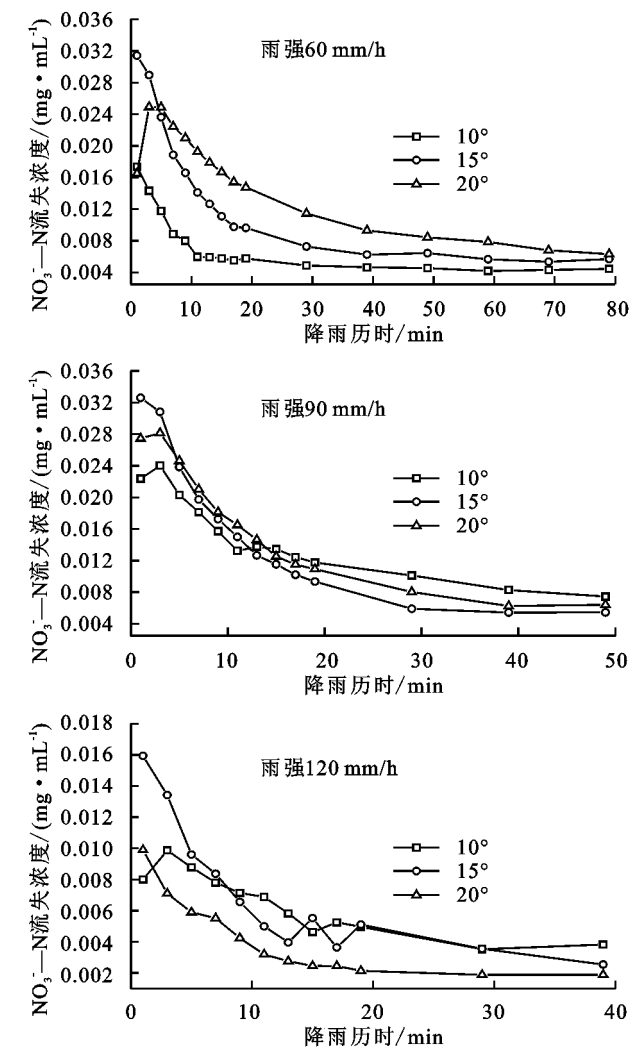


图 7 不同雨强下 NO_3^- —N 流失浓度随降雨历时的变化

3.2 坡度对水土养分流失的影响

坡度对坡面水文过程的影响较为复杂。不同雨强条件下径流率随坡度的变化趋势差异显著,但径流率并未与坡度呈现一定的规律性。这是因为坡度增大后,重力垂直于坡面的分力减小,导致坡面入渗量减少,径流率增加;但坡度增大后,坡面受到多方因素共同作用,此时受雨面积减小,使径流率减小。然而,径流率的变化同时受雨强和坡度共同作用,且一方因素变化会影响径流率随另一方因素变化的规律性,比如,雨强增大后径流率随坡度的增大呈先增加后减少的趋势。

产沙量随坡度的增大而增多,首先是因为当坡度增大时,径流槽重心的升高使坡面土壤势能增大,导致重力在坡面方向的分力增大,土壤的抗剪强度下降,可蚀性变大^[9],因而使分散的土壤颗粒增多;其次坡度增加使水流流速增大^[18],搬运能力相应增大,使

土壤结构加速破坏,所以产沙量随坡度的增大而增多^[12]。侵蚀产沙量并未出现临界坡度,这可能是因为本次试验坡面面积相对较小,径流流态在此尺度上难以发生变化^[19],当坡度增大时,同一雨强下径流造成的产沙量也相应增大。另外,产沙量随降雨历时大致呈现 3 个阶段:先快速上升,达到顶峰后下降,逐渐趋于平稳。因为在降雨初期,土壤含水量相对较小,土壤颗粒间黏结力较小,雨滴初落在坡面时,产生大量泥沙颗粒,产沙量则迅速上升,随着降雨的进行,土壤含水量逐渐饱和,土壤黏结力随之增大,同时径流的累积在坡面形成薄水层,在一定程度上削弱了雨滴的击溅作用^[20],使侵蚀产沙量下降,地表径流汇集的稳定也使侵蚀处于稳定状态^[19]。各场降雨在降雨过程中的产沙速率最大值为 13.6~290.1 g/min,但 120 mm/h, 15° 和 120 mm/h, 20° 降雨的产沙速率最大值超过 535 g/min,可知在大雨强和高坡度的双重作用下,泥沙侵蚀速率更快,并且方差分析表明, $F_{\text{雨强}} = 5.572$, $P_{\text{雨强}} = 0.009$, $F_{\text{坡度}} = 2.584$, $P_{\text{坡度}} = 0.094$,雨强对产沙量带来的影响明显高于坡度,这与黄俊等^[21]通过通径分析和灰色关联理论确定雨强是坡面产流产沙最大影响因子的结论一致。

当坡度变化时,改变了雨滴与坡面的接触角度,地表水体与土壤的平衡状态被打破,径流中携带的养分也受到坡度变化带来的影响,由于 NO_3^- —N 是土壤非反应性离子,与土壤的相互作用力较弱^[22],易溶于水,流失过程受径流的驱动,所以与径流量有关,在雨强为 90 mm/h 时, NO_3^- —N 流失量随坡度变化规律与径流量一致,但雨强在 60, 120 mm/h 时, NO_3^- —N 流失量随坡度的增加呈先上升后下降的趋势,这是因为 NO_3^- —N 虽然是清水样,但泥沙对 NO_3^- —N 吸附性较差,在水样运送实验室的过程中大量溶于水中,所以本次试验的 NO_3^- —N 流失量既受到径流量的影响,同时也受到泥沙侵蚀的影响。

3.3 生物炭对水土养分流失的影响

生物炭具有容重小、吸附性强等特性,作为土壤改良剂已有许多研究^[23]。其他条件相同时,生物炭添加量越大,输沙浓度(径流槽流失的泥沙量与径流量之比)越大,3%生物炭条件下的输沙浓度是无添加时的 1.34~8.00 倍左右,6%生物炭条件下的输沙浓度是无添加时的 7~313 倍左右,且方差分析显示,在坡面产沙过程中, $F_{\text{雨强} \times \text{生物炭}} = 4.975$, $P = 0.004$,雨强与生物炭含量极显著相关 ($P < 0.01$)。输沙浓度随生物炭添加量的增大而变化剧烈,这首先是因为生物炭比例超过一定限度时抑制了黑麦草的生长,导致

6%生物炭条件下的拦沙作用减小^[24],其次是因为生物炭粒径较大,在黄绵土中未产生胶结物质^[25],过大的灰分增加了不稳定团聚体,在降雨的作用下不稳定团聚体崩解为较小的单元,引起了土壤结构的变化,所以随着生物炭添加量的增大,使表层土更为疏松,土壤侵蚀更严重^[26]。本次试验结果表明,生物炭添加量越多,坡面土壤侵蚀越严重,这与叶丽丽等^[25]添加生物炭没有提高土壤抗破碎能力的研究结果相符。

表 2 为 10°坡度时不同生物炭添加量条件下 NO₃⁻—N 和 PO₄³⁻—P 流失浓度的变化。雨强较小时,NO₃⁻—N 流失浓度随生物炭添加量的增多呈先下降后上升趋势;雨强增大至 120 mm/h 后,NO₃⁻—N 流失浓度随着生物炭添加量的增多而增大。在不同雨强条件下,NO₃⁻—N 流失浓度随生物炭添加量变化的规律有所差异;方差分析结果显示,在 NO₃⁻—N 流失的过程中, $F_{\text{雨强} \times \text{生物炭}} = 4.779, P = 0.005$,雨强和生物炭相关性极显著($P < 0.01$)。由表 2 可知,PO₄³⁻—P 与 NO₃⁻—N 不同,无论何种降雨条件下,PO₄³⁻—P 流失浓度均随生物炭添加量的增多而增大。这是因为降雨试验初期雨强相对较小,黑麦草根系不发达,生理活动不单从光合作用获得,还需通过根系从土壤中获得,添加 3%生物炭可提高土壤微生物数量和土壤酶活性^[27],增大土壤养分供应能力,致使雨强较小时添加 3%生物炭土壤中流失的 NO₃⁻—N 浓度较小,当生物炭含量增加至 6%时,过量的生物炭抑制了黑麦草的生长,根系对 NO₃⁻—N 的吸收减少,使得土壤中流失的 NO₃⁻—N 浓度增大,且过量生物炭会加剧质地黏细土壤中 NO₃⁻—N 的淋失,这与李文娟等^[28]的研究结论一致。PO₄³⁻—P 是土壤反应性离子,与土壤相互作用力较强,生物炭添加量的增加使侵蚀产沙量增多,所以 PO₄³⁻—P 的流失呈现出与生物炭添加量正相关的趋势。

表 2 不同生物炭添加量条件下 10°坡度 NO₃⁻—N、PO₄³⁻—P 的流失浓度

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	生物炭 添加量/%	流失浓度/(mg·mL ⁻¹)	
		NO ₃ ⁻ —N	PO ₄ ³⁻ —P
60	0	0.0053	0.00040
	3	0.0042	0.00043
	6	0.0063	0.00058
90	0	0.0056	0.00036
	3	0.0053	0.00044
	6	0.0234	0.00067
120	0	0.0048	0.00051
	3	0.0069	0.00057
	6	0.0104	0.00080

4 结 论

(1)黄土植被坡面径流率和雨强呈显著正相关,但径流率与坡度的规律性在雨强不同时呈现出一定的差异性;产沙量随雨强坡度的增大而增大,但对雨强变化的响应更为明显,雨强是坡面产沙过程的主导因素。

(2)土壤养分随坡度的变化规律受雨强的影响较大。不同坡度下 NO₃⁻—N 流失量随雨强均呈先增大后减小的趋势,PO₄³⁻—P 流失量与雨强呈正相关,但在雨强不同时,2 种土壤养分随坡度的变化规律有所不同,且无论何种条件下,NO₃⁻—N 浓度均与降雨历时呈幂函数关系,PO₄³⁻—P 浓度随降雨历时变化的趋势性不大。

(3)生物炭不仅显著影响输沙浓度,3%添加量的输沙浓度是无添加时的 1.34~8.00 倍,6%添加量的输沙浓度是无添加时的 7~313 倍,且对不同养分离子的影响也具有差异性。雨强不同时,植被坡面生物炭含量的变化对 NO₃⁻—N 的影响也不同,降雨试验初中期雨强相对较小时,3%生物炭能够减少 NO₃⁻—N 的流失,降雨试验后期雨强相对较大时,NO₃⁻—N 则随着生物炭的增加而增加;但对于 PO₄³⁻—P,3%及以上的生物炭含量均增加 PO₄³⁻—P 的流失量。

参考文献:

[1] 彭珂珊.黄土高原地区水土流失特点和治理阶段及其思路研究[J].首都师范大学学报(自然科学版),2013,34(5):82-90.

[2] Markogianni V, Mentzafou A, Dimitriou E. Assessing the impacts of human activities and soil erosion on the water quality of Plastira mountainous Mediterranean Lake, Greece[J].Environmental Earth Sciences, 2016, 75(10):915-931.

[3] Xiong M Q, Sun R H, Chen L D. A global comparison of soil erosion associated with land use and climate type [J].Geoderma,2019,343:31-39.

[4] Deng L Z, Zhang L P, Fan X J,et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield from hillslopes with weathered granite[J].Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(31):32559-32573.

[5] Seyed H S, Mahboobeh K H, Hossein A. Variability of particle size distributions of upward/downward splashed materials in different rainfall intensities and slopes[J]. Geoderma,2017,290:100-106.

[6] Chen Q J, Cai Q G, Ma W J.Comparative study on rain splash erosion of representative soils in China[J].Chinese Geographical Science,2008,18(2):155-161.

[7] 刘燕,王丰.坡度和雨强对坡面流水力学特性的影响研

究[J].科技通报,2018,34(8):218-223,254.

[8] 王栋栋,王占礼,张庆玮,等.草地植被覆盖度坡度及雨强对坡面径流含沙量影响试验研究[J].农业工程学报,2017,33(15):119-125.

[9] 吴媛媛,杨明义,张风宝,等.添加生物炭对黄绵土耕层土壤可蚀性的影响[J].土壤学报,2016,53(1):81-92.

[10] 赵联芳,次仁吉保,王成,等.强降雨下果园除草对径流中颗粒物及营养盐的影响[J].水资源保护,2019,35(3):57-62.

[11] 成玉婷.冻融作用下坡面水沙与氮磷迁移过程及其响应机制研究[D].西安:西安理工大学,2019.

[12] 孙佳美,樊登星,梁洪儒,等.黑麦草调控坡面水沙输出过程研究[J].水土保持学报,2014,28(2):36-39,44.

[13] 张洋,张辉,李占斌,等.不同降雨强度下黄土区冻土坡面产流产沙过程及水沙关系[J].农业工程学报,2018,34(11):136-142.

[14] 常松涛,黄少燕,查轩,等.雨强和植被覆盖度对红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):58-63.

[15] 韩赛奇.黄土丘陵沟壑区高度治理流域对极端暴雨的水文响应研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.

[16] 高敏,牛青霞,王茹,等.人工模拟降雨条件下紫色土陡坡地侵蚀泥沙变化特征研究[J].水土保持学报,2011,25(2):19-23.

[17] 朱波,汪涛,祝福虹,等.紫色土坡耕地硝酸盐淋失特征[J].环境科学学报,2008,28(3):525-533.

[18] 杨大明,高佩玲,刘小媛,等.坡面薄层水流流速研究[J].水土保持学报,2019,33(4):72-80.

[19] 刘钦.纸坊沟流域暴雨侵蚀与坡面人工降雨产流产沙试验研究[D].兰州:兰州大学,2016.

[20] 李叶鑫,吕刚,傅昕阳,等.降雨特性和坡度对辽西低山丘陵区坡耕地褐土溅蚀的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):37-43.

[21] 黄俊,赵西宁,吴普特.基于通径分析和灰色关联理论的坡面产流产沙影响因子分析[J].四川大学学报(工程科学版),2012,44(5):64-70.

[22] 刘月娇.不同降雨强度和纱网覆盖下紫色土坡耕地水土流失与养分输出特征[D].重庆:西南大学,2016.

[23] Guo X X, Liu H T, Zhang J. The role of biochar in organic waste composting and soil improvement: A review[J].Waste Management,2020,102:884-899.

[24] Rondon M A, Lehmann J, Juan R, et al. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions[J].Biology and Fertility of Soils,2007,43(6):699-708.

[25] 叶丽丽,王翠红,周虎,等.添加生物质黑炭对红壤结构稳定性的影响[J].土壤,2012,44(1):62-66.

[26] 侯春霞,骆东奇,谢德体,等.不同利用方式对紫色土团聚体形成的影响[J].西南农业大学学报(自然科学版),2003(5):467-470.

[27] 许云翔,何莉莉,刘玉学,等.施用生物炭 6 年后对稻田土壤酶活性及肥力的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1110-1118.

[28] 李文娟,颜永毫,郑纪勇,等.生物炭对黄土高原不同质地土壤中 NO₃⁻-N 运移特征的影响[J].水土保持研究,2013,20(5):60-63,68.

(上接第 103 页)

[20] 耿晓东,郑粉莉,刘力.降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J].泥沙研究,2010(6):48-53.

[21] 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(2):97-101.

[22] 郑粉莉,高学田.黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟[M].西安:陕西人民出版社,2000:4-85.

[23] 袁希平,雷廷武.水土保持措施及其减水减沙效益分析[J].农业工程学报,2004,20(2):296-300.

[24] Gholami L, Sadeghi S H, Homaee M. Straw mulching effect on splash erosion, runoff, and sediment yield from eroded plots[J].Soil Science Society of America Journal,2013,77(1):268-278.

[25] Yonghui B, Xuan Z, Ruibo Z, et al. Effects of straw mulching on soil erosion benefits and runoff shear force under simulated rainfall[J].Journal of Soil and Water Conservation,2017,31(6):94-99.

[26] 王安.人工降雨条件下保护性耕作的水土保持效应研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.

[27] 王俊杰,张宽地,龚家国,等.不同覆盖度条件坡面水流阻力规律[J].水土保持学报,2015,29(5):1-6.

[28] 王林华,汪亚峰,王健,等.地表粗糙度对黄土坡面产流机制的影响[J].农业工程学报,2018,34(5):120-128.

[29] 徐锡蒙,郑粉莉,覃超,等.沟蚀发育的黄土坡面上秸秆覆盖防蚀效果研究[J].农业机械学报,2015,46(8):130-137.

[30] Whelan M J, Anderson J M. Modelling spatial patterns of throughfall and interception loss in a Norway spruce (*Picea abies*) plantation at the plot scale[J].Journal of Hydrology,1996,186(1/4):335-354.

[31] 蔡太义,贾志宽,黄耀威,等.不同秸秆覆盖量对春玉米田蓄水保墒及节水效益的影响[J].农业工程学报,2011,27(增刊 1):238-243.