

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.033.

张伟, 曾凤铃, 邹玉霞, 等. 秸秆和生物炭对紫色土坡耕地产流产沙与氮素流失的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 20-27.

Zhang Wei, Zeng Fengling, Zou Yuxia, et al. Effects of Straw and Biochar on Runoff, Sediment Yield and Nitrogen Loss in Sloping Farmland of Purple Soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 20-27.

# 秸秆和生物炭对紫色土坡耕地产流产沙与氮素流失的影响

张伟<sup>1</sup>, 曾凤铃<sup>2</sup>, 邹玉霞<sup>1</sup>, 赵一凡<sup>1</sup>, 张卫华<sup>1</sup>

(1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400716; 2. 重庆市荣昌区人民政府 双河街道办事处, 重庆 402460)

**摘要:** [目的] 探究不同添加量的秸秆和生物炭对紫色土坡耕地的具体改良效果, 从而为合理防治三峡库区水土流失提供理论参考。[方法] 采用人工模拟降雨的方法, 以裸坡为对照, 研究了紫色土中添加水稻秸秆(施用量 4, 7, 10 t/hm<sup>2</sup>)和生物炭(含量 13, 39, 65 t/hm<sup>2</sup>)对紫色土坡耕地产流产沙与氮素流失的影响。[结果] (1) 高强度降雨条件下, 紫色土混掺生物炭加快了坡面产流进程, 而施加碎混秸秆能延长起始产流时间、削减产流速率; (2) 紫色土添加生物炭后累积产沙量较对照增加了 0.64%~66.29%, 而施加碎混秸秆后减少了 42.58%~70.27%, 且施加碎混秸秆对坡面产沙的抑制效应远强于对坡面产流的控制作用; (3) 地表径流中氮素流失过程以 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 为主, 且 TN, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的流失量和养分流失模数整体表现为生物炭处理最大, 碎混秸秆处理最小。[结论] 紫色土坡耕地施加碎混秸秆能促进渗阻流、有效控制水土及养分流失, 而短期施加生物炭可能会产生负面影响。

**关键词:** 生物炭; 紫色土; 产流产沙; 氮素流失

**中图分类号:** S157.1; S158.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2024)04-0020-08

## Effects of Straw and Biochar on Runoff, Sediment Yield and Nitrogen Loss in Sloping Farmland of Purple Soil

Zhang Wei<sup>1</sup>, Zeng Fengling<sup>2</sup>, Zou Yuxia<sup>1</sup>, Zhao Yifan<sup>1</sup>, Zhang Weihua<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Shuanghe Sub-district Office of Rongchang District, People's Government of Chongqing Municipality, Chongqing 402460, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to investigate the specific improvement effects of different additions of straw and biochar on the sloping arable land of purple soil, so as to provide theoretical references for the reasonable prevention and control of soil erosion in the Three Gorges Reservoir area. [Methods] The effects of rice straw (4, 7, 10 t/hm<sup>2</sup>) and biochar (13, 39, 65 t/hm<sup>2</sup>) on sediment yield and nitrogen loss in purple soil slope were studied by artificial rainfall simulation method, with bare slope as the control. [Results] (1) Under the condition of high intensity rainfall, the mixture of biochar with purple soil accelerated the process of runoff production on slope, and the application of mixed straw could prolong the initial time of runoff production and reduce the rate of runoff production. (2) The cumulative sediment yield of purple soil increased by 0.64%~66.29% compared with the control group after adding biochar, but decreased by 42.58%~70.27% after adding mixed straw. The inhibitory effect of mixed straw on sediment yield on slope was much stronger than that on runoff yield on slope. (3) The nitrogen loss process in surface runoff was dominated by NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, and the overall loss moduli of TN, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N were the largest

收稿日期: 2023-05-12

修回日期: 2023-09-10

资助项目: 国家自然科学基金(U20A20326); 西南大学教育教学改革研究项目(2022JY012); 西南大学试验技术研究项目(SYJ2023040)

第一作者: 张伟(1999—), 男, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与流域治理。E-mail: 2551757373@qq.com

通信作者: 张卫华(1974—), 男, 河北沙河人, 博士, 副教授, 主要从事水文循环与水土资源管理研究。E-mail: swuwater@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

under biochar treatment, and the smallest under mixed straw treatment. [Conclusion] The application of crushed straw can promote seepage and inhibit flow, effectively control soil, water and nutrient loss in purple slope farmland, while the short-term application of biochar may have negative effects.

**Keywords:** biochar; purple soil; runoff and sediment yield; nitrogen loss

紫色土是我国重要的土壤类型,其有机成分较低,矿质养分含量充分,富含磷、钾、钙质等元素,是良好的肥沃旱耕土壤,以四川、重庆两地分布面积最广,多分布于三峡库区低山丘陵区<sup>[1]</sup>。由于紫色土表面岩层物理风化十分剧烈,易形成大量胶结能力差的松散碎屑物质,具有极强的侵蚀性,导致紫色土坡耕地成为我国土壤侵蚀最为严重的地类之一<sup>[2]</sup>,其土壤侵蚀面积仅次于黄土<sup>[3]</sup>,成为江河泥沙的主要策源地。据统计<sup>[4]</sup>,2021年三峡库区水土流失面积达1.85万km<sup>2</sup>,占其土地总面积5.77万km<sup>2</sup>的32.10%,与之伴随的是土壤肥力和生产力的下降,径流泥沙携带大量土壤养分迁移至河湖水体,威胁水体生态安全,严重制约着区域经济和农业的可持续性发展。因此防治三峡库区的水土流失、减缓紫色土坡地的养分流失已刻不容缓。

众多研究表明,采取保护性耕作措施并配合施用有机肥以及土壤改良剂等可以提高土壤上层渗透能力,增强团聚体的稳定性,减缓雨滴对土壤表层颗粒的击溅分散作用,是控制坡耕地土壤侵蚀的重要方法<sup>[5-7]</sup>。秸秆还田作为一种保护性耕作措施,可以降低坡面径流流速,延长了表层养分与径流的作用时间,更多数量的养分可以溶解和解吸至径流中,使养分流失浓度增大,但秸秆还田后又可以显著减少径流量和侵蚀泥沙量,因而能够有效减少土壤氮素流失总量<sup>[8]</sup>。靳玉婷等<sup>[9]</sup>研究发现地表径流养分损失量主要取决于养分流失浓度和径流量,秸秆还田一方面降低了径流总氮、硝态氮和氨态氮的养分浓度,另一方面可以保护和改良土壤结构,降低地表径流量,大大减少了氮素总量的流失。徐泰平等<sup>[10]</sup>研究指出秸秆还田处理使雨季紫色土坡地径流量和侵蚀量分别减少了26%~31%和70%~82%,并显著降低了氮、磷的输出负荷,其减幅达60%~76%。除此以外,由秸秆制成的生物炭能够促进土壤对氮素的截留与转化,增加作物对土壤氮素的吸收利用<sup>[11]</sup>,从而减少土壤养分流失量。Li等<sup>[12]</sup>在自然降雨条件下添加水稻秸秆生物炭后,坡耕地的年均径流量减少了28.1%,但年均产沙量增加了18.2%。张璐等<sup>[13]</sup>研究发现秸秆逐年全量炭化还田可以增强土壤对碳、氮元素及速效养分的固定作用,提高作物产量。王舒等<sup>[14]</sup>研究指出化肥减量配施生物炭相较于常规施肥明显降低了紫色土坡耕地径流量,其全氮流失通量减幅最大,可

以有效控制三峡库区农业非点源污染发生的风险。总体而言,现有关于碎混秸秆添加和生物炭添加两种方式对紫色土坡耕地土壤侵蚀及养分流失所产生的效益还未有明确的对比分析,因此本文以紫色土坡耕地为研究对象,采用人工模拟降雨的试验方法,通过添加不同量的碎混秸秆和生物炭,探讨其对紫色土坡耕地产流产沙和氮素流失的影响,以期丰富秸秆资源在紫色土坡耕地水土及其养分流失方面的应用。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤采自西南大学紫色土试验基地,为侏罗纪沙溪庙组紫色泥页岩发育形成的紫色土,机械组成黏粒7.4%、粉粒46.1%、砂粒46.5%,属于壤土(国际制),可代表三峡库区主要的耕作土壤类型。研究区土壤pH值6.80,土壤容重1.25~1.46g/cm<sup>3</sup>,饱和含水率38.6%,有机碳含量8.07g/kg,全氮0.63g/kg、全磷0.78g/kg。供试秸秆及生物炭购自郑州昊森环保科技有限公司,供试秸秆选择水稻秸秆,自然风干后粉碎成3~5cm小段备用,其全氮7.68g/kg、全磷4.83g/kg;供试生物炭是由水稻秸秆在绝氧条件下通过400~500℃高温裂解制备,粒径在100~400目,全氮10.53g/kg、全磷4.47g/kg。

### 1.2 试验方法

模拟径流小区采用1m×0.5m×0.4m可移动变坡式钢制土槽,土槽底部密封。装填前,土槽四周边坡需涂抹适量凡士林以减少边缘效应,底部铺设5cm的干沙,上覆透水纱布模拟自然透水层;然后填装25cm过1cm筛的试验用土,土壤氮含量控制为150kg/hm<sup>2</sup>,按设计容重1.35g/cm<sup>3</sup>称取相应质量的肥土,每5cm一层分层填装并均匀压实,每层填完后用毛刷将表层打毛,避免相邻土层间分层;最后表层5cm按比例将碎混秸秆或生物炭与紫色土均匀混合后再进行填装,填装完毕后静置24h,进行降雨试验,每次试验前测得不同处理土壤初始含水量为24%~26%。模拟降雨装置采用BSJY-14-7人工模拟降雨系统,该装置共有4条供水管道,通过对不同规格降雨喷头进行叠加组合,使降雨强度变化范围在0.20~2.03mm/min,降雨均匀系数≥90%,可保证试验的准确性。

本试验于2021年9—12月在西南大学资源环境

学院人工降雨实验室进行。根据紫色土地区坡耕地的常见坡度和降雨等级,试验的模拟降雨强度设置为 90 mm/h,降雨坡度设置为 15°,并以紫色土裸坡为对照(CK),按目前水稻产量设置施用量为 4,7,10 t/hm<sup>2</sup> 的碎混秸秆处理(对应 R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>),按炭土比 1%,3%,5% 设置 13,39,65 t/hm<sup>2</sup> 3 种生物炭含量处理(对应 B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub>),试验共计 7 个处理,每个处理重复 3 次。为使数据合理、准确,率定试验降雨强度及均匀度至达标后开始正式试验,试验时间自降雨开始到结束控制为 60 min,当有连续水流从槽口流出时标志着产流开始,记录起始产流时间,并采集径流水样。根据先密后疏的原则,前 10 min 内每 2 min 取 1 次水沙样,之后每 5 min 取 1 次水沙样,直至降雨结束。每次降雨前,先收集 0.5 L 雨水,用于测定雨水中养分的背景值。降雨结束后,将取得水沙样静置 24 h 后,采集径流上清液测定水体中的总氮、硝态氮和氨态氮含量,将剩下的泥沙倾倒入铝盒,在 105℃ 下烘干至恒重,称取泥沙干重。水样总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度计比色法测定;水样硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)和氨态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)分别采用紫外分光光度计比色法和靛酚蓝比色法测定,本试验 7 个处理共测定 315 个径流样品,每个样品测定上述养分指标时进行 2~3 次重复,减少试验结果中的随机误差。

### 1.3 数据分析

后期采用 Microsoft Excel 2010, SPSS 22.0 及 Origin 2018 进行统计分析和绘图,运用方差分析、回归分析,以及最小显著性差异(LSD)检验对试验结果进行多重比较。

## 2 结果和分析

### 2.1 秸秆与生物炭对产流的影响

从降雨开始直至产生径流的时间即为起始产流时间。由图 1 可知,CK 的起始产流时间为 93 s, R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> 和 B<sub>3</sub> 处理的起始产流时间分别为 108,

117, 122, 6, 64, 86 s。在碎混秸秆处理下, R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> 和 R<sub>3</sub> 的起始产流时间较 CK 分别延长了 15, 24, 29 s ( $p < 0.05$ ), 表明了随着碎混秸秆量增大, 碎混秸秆处理对延长起始产流时间效果越好, 但对坡面产流的抑制效应不再明显增强; 而生物炭处理下的起始产流时间均显著缩短且没有明显变化规律, 这表明高强度降雨条件下, 土壤中混掺生物炭后会加快坡面产流进程。

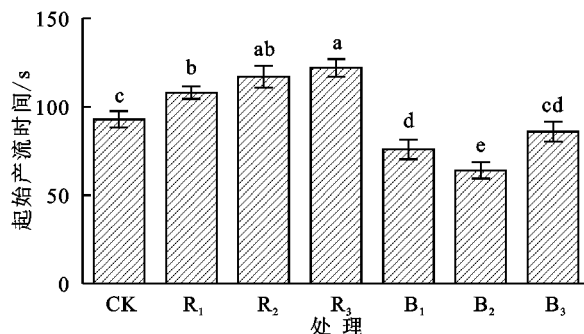


图 1 不同碎混秸秆及生物炭处理下的起始产流时间

Fig. 1 Initial runoff production time under different treatments of crushed straw and biochar

各处理下的产流速率随产流历时的变化趋势大体一致,如图 2A 所示,各处理下的产流速率随产流历时的延长急速增加,然后缓慢趋于稳定,且在产流 20,26 min 时 B<sub>2</sub>, B<sub>1</sub> 处理的产流速率率先达到稳定阶段为 0.65, 0.75 mm/min, CK 和 B<sub>3</sub> 处理的产流速率也在产流 30 min 时相继到达稳定状态下的 0.59, 0.60 mm/min, 在产流 40 min 时 R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> 和 R<sub>3</sub> 处理达到稳定产流速率分别为 0.51, 0.43, 0.39 mm/min。这表明土壤中添加生物炭会提前坡面产流速率达到稳定状态的时间,并提高稳定产流速率,而掺加碎混秸秆则与之相反。如图 2B 所示,累积产流量随产流历时的增加呈线性增长趋势,且碎混秸秆处理明显减缓了累积产流量的增速,其增速随碎混秸秆量增大而减小,生物炭处理则提高了累积产流量的增幅,各处理下累积产流量由大到小表现为 B<sub>1</sub> > B<sub>2</sub> > B<sub>3</sub> > CK > R<sub>1</sub> > R<sub>2</sub> > R<sub>3</sub>。

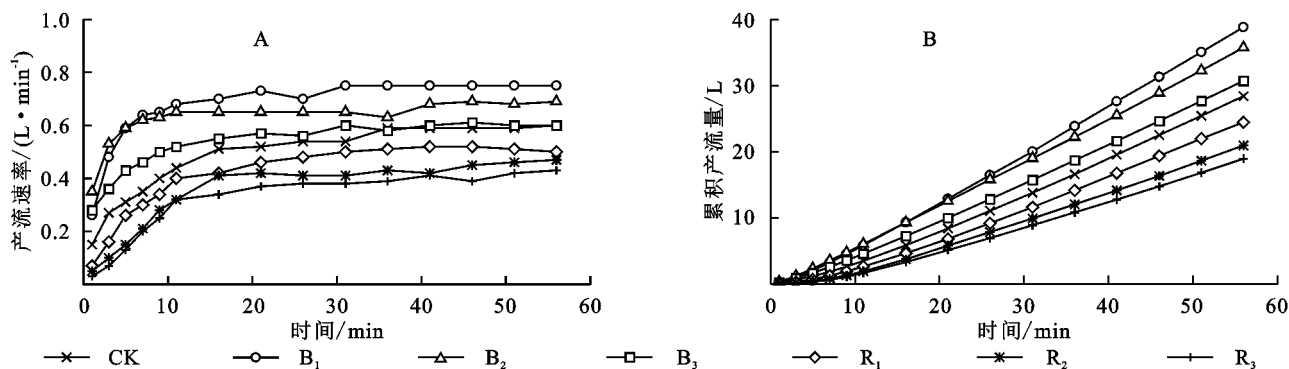


图 2 不同处理下产流速率及累积产流量随产流历时的变化过程

Fig. 2 Variation process of runoff yield rate and cumulative runoff yield with runoff yield duration under different treatments



在本试验中,产流速率最大值出现在 B<sub>1</sub> 处理为 0.75 L/min,最小值出现在 R<sub>3</sub> 处理仅为 0.03 L/min,与 CK 相比,碎混秸秆处理的平均产流速率减小了 15.9%~36.4%,生物炭处理的平均产流速率增加了 11.4%~40.9%。

这表明了碎混秸秆处理可以削减坡面产流速率

峰值,而生物炭处理却提高了产流速率峰值。对不同处理下产流速率和累积产流量分别作差异性分析和回归分析(表 1),可知除 R<sub>1</sub> 和 B<sub>3</sub> 处理外,其余处理的平均产流速率与 CK 间的差异达到显著性水平( $p<0.05$ ),且坡面累积产流量与产流历时之间具有线性关系,决定系数  $R^2$  为 0.988~0.999。

表 1 不同处理下产流速率特征值和累积产流量回归分析

处理	产流速率/(L·min <sup>-1</sup> )			累积产流量/L			
	最大值	最小值	平均值	斜率	回归方程	R <sup>2</sup>	F
CK	0.60	0.15	0.44bc	0.515	$y=0.515x-1.4775$	0.993	2103.667
R <sub>1</sub>	0.52	0.07	0.37cd	0.449	$y=0.449x-1.577$	0.990	1551.056
R <sub>2</sub>	0.47	0.05	0.31de	0.385	$y=0.385x-1.505$	0.989	1303.038
R <sub>3</sub>	0.43	0.03	0.28e	0.348	$y=0.348x-1.423$	0.988	1206.332
B <sub>1</sub>	0.75	0.26	0.62a	0.706	$y=0.706x-1.360$	0.998	7094.552
B <sub>2</sub>	0.69	0.35	0.58a	0.644	$y=0.644x-0.750$	0.999	22101.395
B <sub>3</sub>	0.61	0.28	0.49b	0.555	$y=0.555x-1.060$	0.997	5707.362

注:y 表示累积产流量(L);x 表示降雨历时(min)。

2.2 秸秆与生物炭对产沙的影响

侵蚀产沙是一个复杂的过程,对研究土壤侵蚀规律至关重要。由图 3A 可知,各处理下的产沙速率随产流历时的变化趋势差异较大,碎混秸秆处理的坡面产沙速率随着产流时间的延长缓慢上升并趋于稳定;CK 及生物炭处理下产沙速率随产流历时的增加先迅速上升至峰值,然后降低并趋于波动性稳定。在产流即将趋于稳定时 R<sub>1</sub>,R<sub>2</sub> 和 R<sub>3</sub> 处理下的坡面产沙速率分别较 CK 减少了 32.6%,53.8%,67.9%,碎混秸秆处理之间具有显著差异( $p<0.05$ ),且差异随着碎混秸秆量的增加而减小。而 B<sub>1</sub> 的峰值产沙速率高达 CK 的 1.73 倍,B<sub>2</sub> 和 B<sub>3</sub> 处理在增加坡面产沙速率的同时,明显延长了坡面产沙速率到达峰值的时间,并且随着生物炭含量的增加其峰值产沙速率也在

减小,这说明生物炭含量的提高能削减产沙速率的峰值,但其短期施加会加剧土壤侵蚀,生物炭处理间除 B<sub>3</sub> 外,B<sub>1</sub>,B<sub>2</sub> 处理下的产沙速率与 CK 均存在显著差异( $p<0.05$ )。

如图 3B 所示,各处理下的累积产沙量随产流历时呈不断增加的变化趋势,且各处理下的累积产沙量从大到小表现为 B<sub>1</sub>>B<sub>2</sub>>B<sub>3</sub>>CK>R<sub>1</sub>>R<sub>2</sub>>R<sub>3</sub>,相较于 CK,生物炭处理的累积产沙量分别增加了 0.64%,37.82%,66.29%,碎混秸秆处理的累积产沙量分别减少 42.58%,63.26%,70.27%。这表明将秸秆粉碎后混掺还田可以有效防治土壤侵蚀,而由秸秆制备的生物炭短期还田后会加重坡面侵蚀,且不同碎混秸秆及生物炭施用量处理下累积产沙量与产流时间均呈现线性正相关关系。

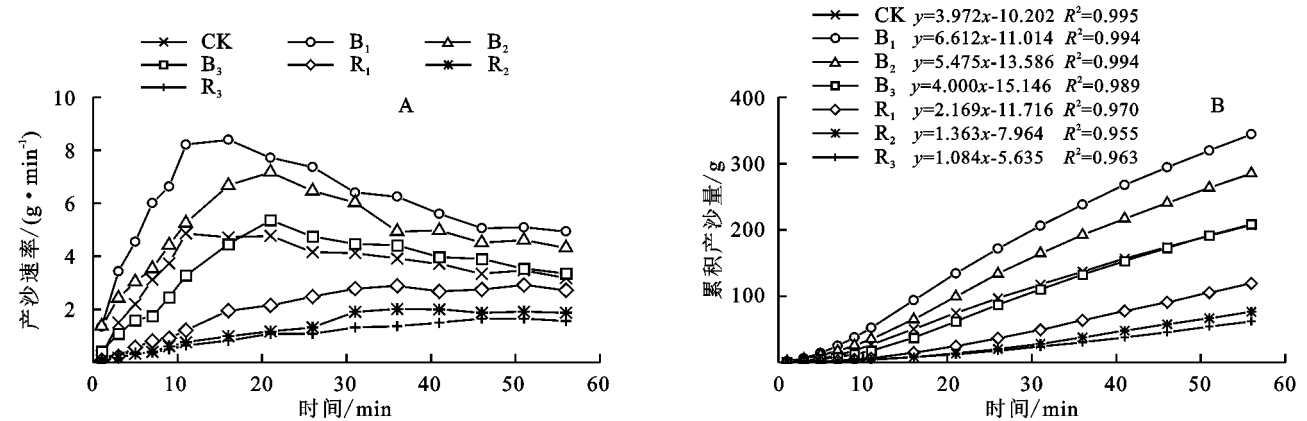


图 3 不同处理下产沙速率及累积产沙量随产流历时的变化过程

Fig. 3 Variation process of sediment yield rate and cumulative sediment yield with runoff duration under different treatments

2.3 产流量与产沙量的关系分析

如图 4A 所示,不同碎混秸秆及生物炭施用量处

理下坡面总产流量与总产沙量的变化规律存在明显差异,且各处理下总产流量和总产沙量最大值均出现

在  $B_1$  处理(40.80 L 和 387.05 g),最小值均出现在  $R_3$  处理(26.38 L 和 70.60 g)。相比于 CK,碎混秸秆处理下总产流量分别减少了 3.44%,12.06%,12.82%,总产沙量分别降低了 42.50%,69.14%,75.19%,这表明碎混秸秆对坡面产沙的抑制效应远强于对坡面产流的控制作用;生物炭处理下,除  $B_3$  外, $B_1$  和  $B_2$  处理下的总产流量和总产沙量均显著高于 CK 及碎混

秸秆处理( $p < 0.05$ ),但随着生物炭含量的增加土壤侵蚀量逐渐递减,这表明施加生物炭确实可以改变土壤理化性质、提高其抗蚀性,但短期施加的生物炭由于与土壤颗粒形成胶结作用有限,反而增加了土壤侵蚀量。坡面产流与产沙过程密切相关,由图 4B 可知,不同碎混秸秆及生物炭处理下累积产沙量与累积产流量呈线性函数的变化规律( $p < 0.05$ )。

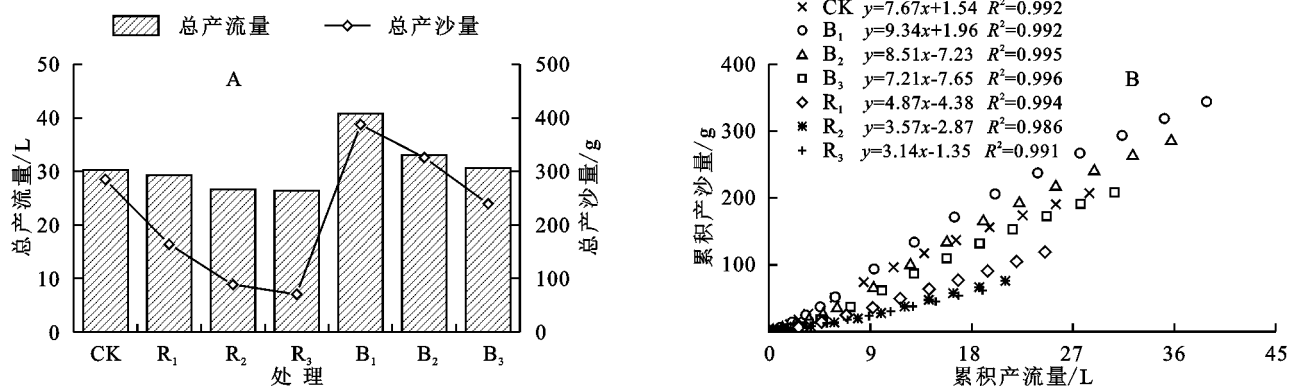


图 4 不同处理下产流量和产沙量的关系

Fig. 4 Relationship between runoff and sediment yield under different treatments

## 2.4 秸秆与生物炭对氮素流失的影响

降雨对土壤的溅蚀以及径流对土壤的冲刷是造成土壤养分流失的主要途径。如图 5 所示,不同碎混秸秆及生物炭处理下径流各形态氮素浓度随产流时间的延长先快速降低,然后呈波动性稳定。产流初期,在雨滴击溅和薄层水流作用下,干燥的土壤结构容易受到破坏,表层疏松土壤被径流裹挟流失,大量氮素也被溶解或解吸后随径流流失,此时坡面径流强度较低,导致各形态氮素流失浓度较高,并且在雨滴溅蚀下开始形成了土壤表层结皮;在产流后 30 min 左右,各处理下 TN,  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度变化基本达到动态稳定,此时进入了产流中后期,随着径流强度的增大坡面水层增厚,减弱了雨滴的打击

作用,径流挟沙量也逐渐减少,且土壤表层结皮的形成抑制了土壤颗粒态氮的释放,各形态氮素浓度逐渐降低并呈波动性稳定,这时碎混秸秆处理、CK 及生物炭处理下 TN 的浓度变化范围分别为 0.77~1.52, 3.24, 3.27~3.99 mg/L,  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度变化范围分别为 0.40~0.61, 0.75, 1.01~1.47 mg/L,  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度变化范围分别为 0.05~0.11, 0.12, 0.19~0.23 mg/L, 各处理下径流不同形态氮素浓度达到动态平衡时整体上呈现  $B_1 > B_2 > B_3 > \text{CK} > R_1 > R_2 \approx R_3$ 。进一步分析径流氮素随产流历时的变化特征,发现 TN,  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 的浓度与产流历时之间存在较好的幂函数关系,且生物炭处理的拟合效果优于碎混秸秆处理。

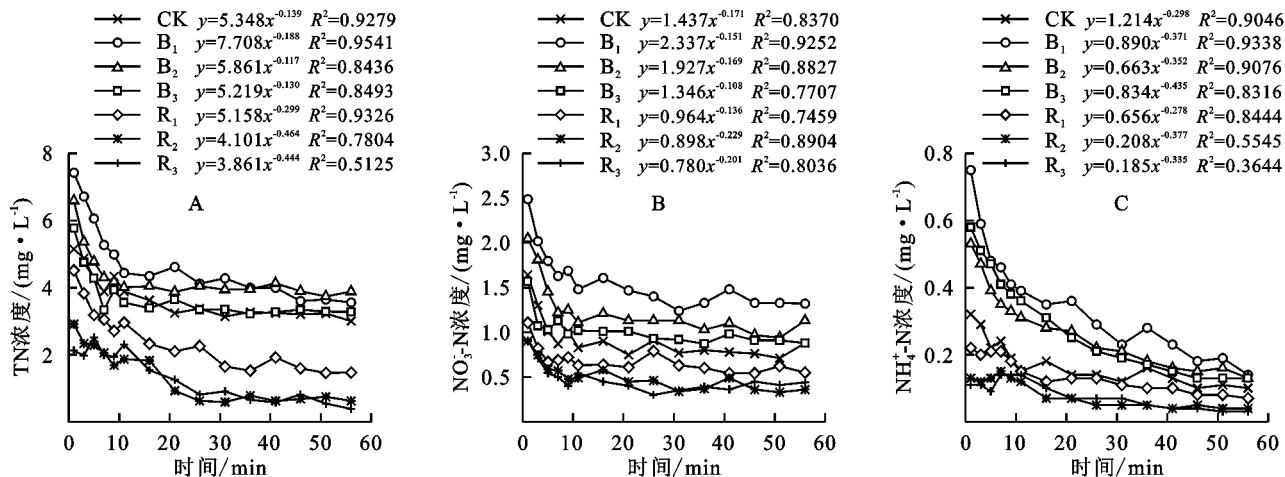


图 5 不同碎混秸秆及生物炭施用量下径流氮素随产流历时的动态变化

Fig. 5 Dynamic changes of runoff nitrogen with runoff duration under different application rates of crushed straw and biochar

从表 2 可发现,相同处理下各形态氮素流失量总是呈现出  $\text{NO}_3^-$ -N 高于  $\text{NH}_4^+$ -N,表明地表径流中氮素流失过程以  $\text{NO}_3^-$ -N 为主, $\text{NH}_4^+$ -N 流失量占 TN 比例较小。对比不同处理之间的氮素流失量,发现相较于 CK,碎混秸秆处理能有效降低氮素流失量,且碎混秸秆处理下 TN, $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 流失量最高时分别为 CK 的 58.2%,70.5%,77.3% ( $p<0.05$ ),

而生物炭处理下 TN, $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 流失量最高时分别为 CK 的 1.72,2.34,2.84 倍 ( $p<0.05$ )。不同处理下 TN, $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 的流失量和养分流失模数整体表现出碎混秸秆处理 $<$ CK $<$ 生物炭处理的趋势,且流失量和养分流失模数的最大值均出现在 B<sub>1</sub>处理,表明短期施加少量生物炭会加剧坡面养分流失。

表 2 不同碎混秸秆及生物炭施用量下径流氮素流失特征

Table 2 Characteristics of nitrogen loss in runoff under different application rates of crushed straw and biochar

处理	流失量/mg					养分流失模数/(mg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )		
	TN	$\text{NO}_3^-$ -N	占 TN 比例/%	$\text{NH}_4^+$ -N	占 TN 比例/%	TN	$\text{NO}_3^-$ -N	$\text{NH}_4^+$ -N
CK	107.18c	26.37d	24.60	4.71c	4.39	214.36c	52.74d	9.42c
R <sub>1</sub>	62.34d	18.60e	29.84	3.64d	5.84	128.84d	37.20e	7.28d
R <sub>2</sub>	26.87e	11.10f	41.31	1.73e	6.44	53.74e	22.20f	3.46e
R <sub>3</sub>	26.57e	10.13f	38.13	1.76e	6.62	53.14e	20.26f	3.52e
B <sub>1</sub>	184.61a	61.75a	33.45	13.36a	7.24	369.22a	123.50a	26.72a
B <sub>2</sub>	139.35b	39.87b	28.61	8.70b	6.24	278.70b	79.74b	17.40b
B <sub>3</sub>	110.36c	30.33c	27.48	8.15b	7.38	220.72c	60.66c	16.30b

注:表中数据后 a,b,c,d,e,f 表示不同处理的差异性。

3 讨论

降雨是土壤侵蚀的主要动力,本研究表明了当雨强为 90 mm/h 时,坡面施加碎混秸秆显著延长了坡面起始产流时间,并且随着碎混秸秆量的增加,坡面产流速率、累积产流量不断减少,这与贺云锋<sup>[15]</sup>得出的结论相同。可能是由于秸秆与土壤混掺后:(1) 改变了地表糙度,雨水与地表的接触面积减少,阻碍了土壤表层因溅蚀而产生结皮,促使更多雨水就地入渗<sup>[16]</sup>;(2) 增加了水分通道,且干燥的秸秆可以吸收部分雨水,延迟了坡面产流<sup>[17]</sup>;(3) 有利于土壤团聚,提高了土壤抗破碎性,能够有效抵抗雨滴和径流等机械外力的分散作用<sup>[18]</sup>,并且秸秆与土壤掺插固结形成复合体可以增大径流阻力,从而进一步减少土壤侵蚀量<sup>[19]</sup>。因此在降雨初期,随着碎混秸秆量的增加,对雨滴动能的削减能力增强,能更有效地拦水促渗,对坡面产流的减小幅度更明显,而到降雨中后期,土壤入渗速率达到稳定,此时产流速率主要由单位时间降雨量决定,产沙速率也随产流时间的增加而平缓减少,累积产沙量随碎混秸秆施加量的增多而减少,这与曾建辉等<sup>[20]</sup>研究结论相同。然而与碎混秸秆处理表现不同的是,生物炭处理下起始产流时间较对照明显缩短,且其并未像多数研究<sup>[21-23]</sup>一样表现出促渗阻流作用,反而增加了坡面径流量。这可能是由于:(1) 生物炭影响了土壤孔隙数量及分布,随着生物炭含量的增加土壤大孔隙数量增多,但土壤有效孔隙度会降低;(2) 生物炭细粒子填充了土壤孔隙,在

雨滴的击打下,使土壤表层变得致密,阻碍了雨水下渗,导致坡面产流缩短,径流量增大。不同含量生物炭处理中,仅 B<sub>3</sub>处理下产流初期的产沙速率低于对照,并显著减少了总产沙量。这可能是由于生物炭施用量的进一步增大,土壤中产生了更多的大团聚体( $>0.25$  mm),有效改善了土壤团粒结构<sup>[24]</sup>,提高了土壤抗蚀性。而考虑到生物炭具有易蚀性<sup>[25]</sup>,在径流冲刷下会发生侵蚀,而本研究中土壤混掺低量生物炭对土壤颗粒的黏结力较弱,所以 B<sub>1</sub>和 B<sub>2</sub>处理下的产沙速率和产沙量较对照及碎混秸秆处理更高。

水是土壤养分流失的载体,地表径流养分损失量主要取决于养分流失浓度和径流量<sup>[9]</sup>。本研究中,碎混秸秆处理下 TN, $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 流失浓度明显低于同一产流时刻对照及生物炭处理下的浓度,主要是秸秆有良好的促渗阻流作用,暴露于地表的秸秆能够有效抵挡降雨径流对土壤表层的破坏作用,从而降低了径流中的养分溶质浓度,同时减少了径流量,因此碎混秸秆处理显著减少了 TN, $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 流失总量,这与林超文等<sup>[26]</sup>研究结果一致。生物炭具有多孔性和比表面积大的特点,可以吸附土壤中的氮素<sup>[27]</sup>,有研究结果表明在紫色土中添加生物炭使坡地氮素失流通量减少了<sup>[28]</sup>,但本研究中不同生物炭含量处理均增大了各形态氮素的损失,这与上述研究结果存在差异。可能是由于土壤中混掺生物炭后,生物炭的细粒子会堵塞土壤孔隙,加强了土壤的斥水性,使得雨水入渗量减少,导致坡面径流量增大<sup>[25]</sup>,同时生物炭本身的低密度性质使其在降雨



侵蚀中更易随径流流失,更导致了土壤理化性质发生改变,降低了抗侵蚀能力,这双重作用共同导致了土壤表层侵蚀的加剧,从而使更多的土壤养分可以溶解和解吸至径流中,另一方面由于生物炭作为一种富含氮的养分缓释剂,土壤中添加生物炭会导致土壤氮素含量上升<sup>[29]</sup>,为氮素流失提供了物质来源,导致土壤氮素流失量增大。综合分析,不同碎混秸秆及生物炭处理下的养分流失变化与产流产沙变化规律基本一致,因此控制紫色土坡耕地养分流失最重要的是阻控土壤侵蚀的发生。碎混秸秆通过促渗减流可有效减缓土壤侵蚀与养分流失,而添加生物炭虽然可以通过改良土壤性质节水增产,但鉴于本研究中生物炭对土壤水沙-养分流失存在负面影响,不同秸秆生物炭含量处理间产流产沙及养分流失规律也较复杂,故秸秆生物炭在紫色土坡耕地区的实际应用中需注意其对土壤侵蚀的短期负面效应,须通过大量室内及野外试验进行研究和验证后再行推广。

## 4 结论

(1) 高强度降雨条件下,紫色土混掺生物炭后平均产流速率较裸坡增加了 11.4%~40.9%,加快了坡面产流进程;施加碎混秸秆后平均产流速率较裸坡减小了 15.9%~36.4%,且起始产流时间延长了 15~29 s,其延长效果随着碎混秸秆量越大而越好。

(2) 紫色土添加碎混秸秆主要通过促渗阻流来减少地表产流产沙,碎混秸秆处理下累积产沙量减少了 42.58%~70.27%;添加生物炭主要通过改变土壤结构性质来影响地表产流产沙,其短期添加改良效果不明显,生物炭处理下累积产沙量增加了 0.64%~66.29%。

(3) 施加碎混秸秆对坡面产沙的抑制效应远强于对坡面产流的控制作用,其对总产沙量减少的贡献率最多为 75.19%,而对总产流量减少的贡献率最多为 12.82%;生物炭改良土壤性质受多种条件影响,短期添加生物炭可能会增加土壤侵蚀量。

(4) 地表径流中氮素流失过程以  $\text{NO}_3^-$ -N 为主,且 TN,  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 的流失量和养分流失模数整体表现为生物炭处理最大,碎混秸秆处理最小。

### 参考文献 (References):

- [1] 慈恩,唐江,连茂山,等.重庆市紫色土系统分类高级单元划分研究[J].土壤学报,2018,55(3):569-584.  
Ci E, Tang J, Lian M S, et al. Higher category partition for purple soils in Chongqing in Chinese soil taxonomy[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(3): 569-584.
- [2] 苏正安,熊东红,张建辉,等.紫色土坡耕地土壤侵蚀及其防治措施研究进展[J].中国水土保持,2018(2):42-47,69.  
Su Z A, Xiong D H, Zhang J H, et al. Research progress of soil erosion of purple soil slope farmland and its prevention and control measures[J]. Soil and Water Conservation in China, 2018(2): 42-47, 69.
- [3] 刘力,郑粉莉.紫色土土壤侵蚀研究进展[J].安徽农业科学,2006,34(12):2804-2805.  
Liu L, Zheng F L. Summary of the research on purple soil erosion[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006, 34(12): 2804-2805.
- [4] 中华人民共和国水利部.中国水土保持公报(2021年)[EB/OL].(2022-07-13). [http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202207/t20220713\\_1585301.html](http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202207/t20220713_1585301.html).  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Bulletin of Soil and Water Conservation in China (2021)[EB/OL]. (2022-07-13). [http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202207/t20220713\\_1585301.html](http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202207/t20220713_1585301.html).
- [5] 高洪军,彭畅,张秀芝,等.不同秸秆还田模式对黑钙土团聚体特征的影响[J].水土保持学报,2019,33(1):75-79.  
Gao H J, Peng C, Zhang X Z, et al. Effects of different straw returning modes on characteristics of soil aggregates in chernozem soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(1): 75-79.
- [6] 于亚莉,史东梅,蒋平.不同土壤管理措施对坡耕地土壤氮磷养分流失的控制效应[J].水土保持学报,2017,31(1):30-36,42.  
Yu Y L, Shi D M, Jiang P. Effect of different soil management measures on controlling soil nitrogen and phosphorus loss from slop farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 30-36, 42.
- [7] 徐国鑫.不同施肥处理对紫色土旱坡地氮磷流失及作物效应的影响[D].重庆:西南大学,2019.  
Xu G X. Effects of Different Fertilization Treatments on Nitrogen and Phosphorus Loss and Crop Benefit in Purple Soil of Arid Sloping Farmland[D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [8] 张亚丽,张兴昌,邵明安,等.秸秆覆盖对黄土坡面矿质氮素径流流失的影响[J].水土保持学报,2004,18(1):85-88.  
Zhang Y L, Zhang X C, Shao M A, et al. Impact of straw cover on mineral nitrogen loss by runoff on loess slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(1): 85-88.
- [9] 靳玉婷,刘运峰,胡宏祥,等.持续性秸秆还田配施化肥对油菜-水稻轮作周年氮磷径流损失的影响[J].中国农业科学,2021,54(9):1937-1951.  
Jin Y T, Liu Y F, Hu H X, et al. Effects of continuous straw returning with chemical fertilizer on annual runoff loss of nitrogen and phosphorus in rice-rape rotation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(9): 1937-1951.
- [10] 徐泰平,朱波,汪涛,等.秸秆还田对紫色土坡耕地养分流失的影响[J].水土保持学报,2006,20(1):30-32,36.  
Xu T P, Zhu B, Wang T, et al. Effects of returned

- straw on nutrient loss from slope cropland of purple soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(1):30-32,36.
- [11] Wang Z, Wang Z, Luo Y, et al. Biochar increases <sup>15</sup>N fertilizer retention and indigenous soil N uptake in a cotton-barley rotation system[J]. *Geoderma*, 2020, 357:113944.
- [12] Li Z G, Gu C M, Zhang R H, et al. The benefic effect induced by biochar on soil erosion and nutrient loss of slopping land under natural rainfall conditions in central China[J]. *Agricultural Water Management*, 2017,185:145-150.
- [13] 张璐,董达,平帆,等.逐年全量秸秆炭化还田对水稻产量和土壤养分的影响[J].*农业环境科学学报*,2018,37(10):2319-2326.
- Zhang L, Dong D, Ping F, et al. The effects of successive whole-dose biochar application on rice yield and soil nutrient concentrations[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018,37(10):2319-2326.
- [14] 王舒,王子芳,龙翼,等.生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响[J].*环境科学*,2020,41(5):2406-2415.
- Wang S, Wang Z F, Long Y, et al. Effect of fertilizer reduction and biochar application on soil nitrogen loss in purple upland[J]. *Environmental Science*, 2020,41(5):2406-2415.
- [15] 贺云锋.黑土区坡耕地垄作和秸秆还田方式对土壤侵蚀的影响研究[D].长春:吉林农业大学,2021.
- He Y F. Effects of Ridge Tillage and Straw Returning on Soil Erosion at Sloping Croplands in the Black Soil Region [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2021.
- [16] 高泽超,潘焰菲,徐勤学,等.秸秆覆盖对西南喀斯特坡地幼龄橘园产流产沙的影响[J].*水土保持研究*,2022, 29(1):36-43.
- Gao Z C, Pan Y F, Xu Q X, et al. Effect of straw mulch on runoff and sediment production in young Citrus orchards in southwest Karst[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(1):36-43.
- [17] Wang C, Zhang Z Y, Fan S M, et al. Effects of straw incorporation on desiccation cracking patterns and horizontal flow in cracked clay loam[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018,182:130-143.
- [18] 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.
- Ye L L, Wang C H, Zhou H, et al. Effects of rice straw-derived biochar addition on soil structure stability of an ultisol[J]. *Soils*, 2012,44(1):62-66.
- [19] Liu H Q, Yang J H, Liu C X, et al. Flow velocity on cultivated soil slope with wheat straw incorporation[J]. *Journal of Hydrology*, 2020,584:124667.
- [20] 曾建辉,李占斌,马波,等.小麦秸秆长度、覆盖量对坡面产流产沙的影响[J].*水土保持学报*,2020,34(4):98-103,111.
- Zeng J H, Li Z B, Ma B, et al. Effects of wheat straw length and coverage on runoff and sediment yield[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020,34(4): 98-103,111.
- [21] 刘祥宏.生物炭在黄土高原典型土壤中的改良作用[D].北京:中国科学院大学,2013.
- Liu X H. Effects of Biochar Application on Soil Improvement on the Loess Plateau[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [22] Li Y Y, Zhang F B, Yang M Y, et al. Effects of adding biochar of different particle sizes on hydro-erosional processes in small scale laboratory rainfall experiments on cultivated loessial soil [J]. *catena*, 2019,173:226-233.
- [23] Ahmadi S H, Ghasemi H, Sepaskhah A R. Rice husk biochar influences runoff features, soil loss, and hydrological behavior of a loamy soil in a series of successive simulated rainfall events[J]. *Catena*, 2020, 192:104587.
- [24] Jien S H, Wang C S. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil[J]. *Catena*, 2013,110:225-233.
- [25] 吴媛媛,杨明义,张凤宝,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.
- Wu Y Y, Yang M Y, Zhang F B, et al. Effect of biochar application on erodibility of plow layer soil on loess slopes [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016,53(1):81-92.
- [26] 林超文,罗春燕,庞良玉,等.不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响[J].*生态学报*,2010,30(22):6091-6101.
- Lin C W, Luo C Y, Pang L Y, et al. Effects of different cultivation and mulching methods on soil erosion and nutrient losses from a purple soil of sloping land [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010,30(22):6091-6101.
- [27] 武玉,徐刚,吕迎春,等.生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J].*地球科学进展*,2014,29(1):68-79.
- Wu Y, Xu G, Lü Y C, et al. Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties: Current status and knowledge gaps[J]. *Advances in Earth Science*, 2014,29(1):68-79.
- [28] 周志红,李心清,邢英,等.生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用[J].*地球与环境*,2011,39(2):278-284.
- Zhou Z H, Lee X Q, Xing Y, et al. Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in soil[J]. *Earth and Environment*, 2011,39(2):278-284.
- [29] Liu J, Ding Y L, Ji Y R, et al. Effect of maize straw biochar on bacterial communities in agricultural soil [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2020,104(3):333-338.