

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.026; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.026.

王济元, 王力, 张仁伟, 等. 烤烟/玉米套作中生物炭与氮肥配施对坡耕地水土流失的影响[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):80-89.

Wang Jiyuan, Wang Li, Zhang Renwei, et al. Effects of combined application of biochar and nitrogen fertilizer on soil and water loss in flue-cured tobacco/corn intercropping system on sloping farmland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):80-89.

# 烤烟/玉米套作中生物炭与氮肥配施对坡耕地水土流失的影响

王济元<sup>1</sup>, 王力<sup>1,2</sup>, 张仁伟<sup>1</sup>, 于泽林<sup>1</sup>, 刘子丹<sup>1</sup>,  
李晓敏<sup>1</sup>, 高鹏<sup>2</sup>, 张德旭<sup>1</sup>, 何承刚<sup>1</sup>

(1. 云南农业大学烟草学院, 昆明 650201; 2. 安徽中烟工业有限责任公司, 合肥 230000)

**摘要:** [目的] 明确生物炭与氮肥配施对坡耕地烤烟/青贮玉米套作体系的协同保持效果及其具体作用, 为解决该体系因高强度降雨与高氮投入加剧的水土流失及氮素流失风险。[方法] 以烤烟(云烟 87)和青贮玉米(中玉 335)套作体系为研究对象, 在坡度为 10° 的模拟小区中开展降雨试验。试验分别在烤烟首次采收后(玉米移栽前)和玉米出穗前进行两次模拟降雨试验, 每次试验设置 40, 70, 160 mm/h 共 3 种雨强, 持续 30 min。试验设计包括 3 种氮肥水平(不施氮 N<sub>0</sub>: 0 kg/hm<sup>2</sup>; 减半施氮 N<sub>1</sub>: 烤烟 52.5 kg/hm<sup>2</sup>+玉米 100 kg/hm<sup>2</sup>; 常规施氮 N<sub>2</sub>: 烤烟 105 kg/hm<sup>2</sup>+玉米 200 kg/hm<sup>2</sup>)和两种生物炭处理(不添加 B<sub>0</sub>: 0%; 每 100 kg 土壤添加 3 kg 生物炭 B<sub>1</sub>: 3%)。测定不同处理在各阶段的土壤氮素含量、侵蚀量、径流产流时间、径流量以及径流中氮素流失量等指标。[结果] 在不同降雨强度下, 添加生物炭的处理在水土保持方面均表现出显著改善作用。生物炭配施常规氮肥(B<sub>1</sub>N<sub>2</sub>)显著推迟了产流时间(160 mm/h 雨强下推迟 124.86%), 降低了径流量(不同雨强下分别减少 46.58%~62.85%, 其中 40 mm/h 和 70 mm/h 雨强下降幅度显著), 显著降低了土壤侵蚀量, 并且随着降雨强度的增加, 水土保持效果进一步增强。添加生物炭还提高了土壤氮素的固持能力; B<sub>1</sub>N<sub>2</sub> 处理在 70 mm/h 雨强下显著降低了径流中的硝态氮质量浓度, 并在烤烟与青贮玉米成熟后提高了土壤的全氮含量, 土壤中的硝态氮和铵态氮含量也显著增加。生物炭配施减半氮肥(B<sub>1</sub>N<sub>1</sub>)相比单独施减半氮肥(B<sub>0</sub>N<sub>1</sub>) 在 40 mm/h 雨强下仍能显著推迟产流时间(56.8%), 减少径流量(28.1%), 但在 160 mm/h 雨强下, 侵蚀量的降低幅度不显著。[结论] 生物炭配施常规氮肥可显著提高土壤水土保持能力, 效果最佳; 减半施氮配施生物炭虽效果次之, 但仍具有明显的水土保持效益。

**关键词:** 氮素; 生物炭; 烤烟套作玉米; 水土保持; 氮素流失

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0080-10

## Effects of combined application of biochar and nitrogen fertilizer on soil and water loss in flue-cured tobacco/corn intercropping system on sloping farmland

Wang Jiyuan<sup>1</sup>, Wang Li<sup>1,2</sup>, Zhang Renwei<sup>1</sup>, Yu Zelin<sup>1</sup>, Liu Zidan<sup>1</sup>,  
Li Xiaomin<sup>1</sup>, Gao Peng<sup>2</sup>, Zhang Dexu<sup>1</sup>, He Chenggang<sup>1</sup>

(1. College of Tobacco Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. China Tobacco Anhui Industrial Co., Ltd., Hefei 230000, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to clarify the synergistic soil and water conservation effect and specific roles of combined biochar and nitrogen fertilizer application in the flue-cured tobacco/silaga maize intercropping system on sloping farmland, in order to mitigate the risks of soil erosion and nitrogen loss exacerbated by high-

收稿日期: 2025-02-03

修回日期: 2025-04-22

接受日期: 2025-05-05

资助项目: 湖南中烟工业有限责任公司烟草农业示范与推广科技项目(KY2020JD0008); 云南省烟草公司科技计划重点项目(2020530000241025)

第一作者: 王济元(2000—), 男, 云南昆明人, 在读硕士, 主要从事烟草生理与信息化研究。E-mail: wjy150221@163.com

通信作者: 何承刚(1972—), 男, 甘肃武威人, 博士, 副教授, 主要从事烤烟生理与生态研究。E-mail: 471624095@qq.com

http://stbcyj.paperonce.org

intensity rainfall and high nitrogen input in this system. [Methods] A flue-cured tobacco (Yunyan 87) and silage maize (Zhongyan 335) intercropping system was used as the study system, and simulated rainfall experiments were conducted on plots with a slope of  $10^\circ$ . Two simulated rainfall events were conducted: the first after the initial harvest of flue-cured tobacco (before maize transplanting) and the second before the tasseling stage of maize. Each event applied three rainfall intensities (40, 70, and 160 mm/h), each lasting for 30 minutes. The experimental design included three nitrogen (N) application levels: no nitrogen ( $N_0$ : 0 kg/hm<sup>2</sup>), half nitrogen ( $N_1$ : 52.5 kg/hm<sup>2</sup> for flue-cured tobacco + 100 kg/hm<sup>2</sup> for maize), and conventional nitrogen ( $N_2$ : 105 kg/hm<sup>2</sup> for flue-cured tobacco + 200 kg/hm<sup>2</sup> for maize); and two biochar treatments: no biochar ( $B_0$ : 0%) and biochar addition ( $B_1$ : 3 kg per 100 kg of soil, equivalent to 3%). Parameters, including soil nitrogen content, soil erosion amount, runoff initiation time, runoff volume, and nitrogen loss in runoff, were measured for different treatments at various stages. [Results] Under different rainfall intensities, the treatments amended with biochar demonstrated significant improvements in soil and water conservation. The combined application of biochar and conventional nitrogen fertilizer ( $B_1N_2$ ) significantly prolonged runoff initiation time (by 124.86% under the 160 mm/h rain intensity), reduced the runoff volume (by 46.58% to 62.85% across different intensities, with significant reductions at 40 and 70 mm/h), and significantly decreased soil erosion amount. Furthermore, the soil and water conservation effect was enhanced with increasing rainfall intensity. Biochar addition also improved soil nitrogen retention ability: the  $B_1N_2$  treatment significantly reduced nitrate nitrogen concentration in runoff under 70 mm/h rainfall intensity, and increased soil total nitrogen content after the maturity of flue-cured tobacco and silage maize. Soil nitrate nitrogen and ammonium nitrogen contents were also significantly increased. Compared with the half nitrogen treatment without biochar ( $B_0N_1$ ), the combination of biochar with half nitrogen fertilizer ( $B_1N_1$ ) still significantly prolonged runoff initiation time (by 56.8%) and reduced the runoff volume (by 28.1%) under 40 mm/h rainfall intensity. However, the reduction in soil erosion was not significant under 160 mm/h. [Conclusion] The combined application of biochar and conventional nitrogen fertilizer significantly enhances soil and water conservation capacity, exhibiting the optimal effect. Although combining biochar with half nitrogen fertilizer is less effective, it still provides considerable soil and water conservation benefits.

**Keywords:** nitrogen; biochar; flue/cured tobacco-corn intercropping; soil and water conservation; nitrogen loss

中国是全球水土流失最严重的国家之一,水土流失对土地资源、农业生产及生态环境造成了严重影响<sup>[1]</sup>。特别是在云贵高原等特定区域,坡耕地在当地农业产业结构中占据着重要地位。该区域地貌独特,地形起伏剧烈,降雨模式呈现出高强度且短时间内高度集中的特点,这使得地表土壤遭受极大的冲刷。更严峻的是,传统坡地的陡峭耕种与缺乏有效水土保持措施等不合理的土地利用方式进一步加剧了水土流失,导致云贵高原成为水土流失的重灾区<sup>[2]</sup>。这不仅威胁到区域的粮食安全,还严重制约了地区农业经济的可持续发展。因此,寻求高效且持续的土壤改良措施,已成为研究的重点。

生物炭作为新型土壤改良剂,具有高碳含量、多孔结构和强大的吸附能力<sup>[3]</sup>。研究表明,在保水能力方面,生物炭的添加显著提高了土壤的有效含水量、延缓土壤水分的蒸发速率。在养分管理方面,生物炭不仅凭借其自身含有的养分提升土壤的养分含

量,还能够吸附土壤中的养分,起到保肥的作用。特别是在抗侵蚀方面,其能减少径流和泥沙流失,显著降低氮、磷等养分的流失,并能够延长径流时间,降低土壤径流量及土壤侵蚀量,为坡耕地治理提供了新思路<sup>[4-5]</sup>。近年来,结合生物、化学等手段与传统治理方式联合应用,已成为治理水土流失的新趋势。尽管生物炭在土壤改良领域的研究取得了一定成果,但将其应用于坡耕地作物套种体系中的研究仍较为不足,多聚焦单一作物体系,对套作系统这一特殊种植模式的调控机制研究明显滞后。

坡耕地套种模式作为一种高效的农业生产方式,通过合理的空间和时间配置,不同作物间的搭配可以充分利用坡耕地的土地资源和光热条件,从而实现农作物产量和经济效益的双重提升。在云南烟区传统单作模式下,烤烟采收后土地闲置近3个月,叠加雨季末期降雨,导致地表裸露期侵蚀量占比超60%<sup>[6]</sup>。推广的烤烟与青贮玉米套作模式通过优化

作物生育期衔接(具体为烤烟 150 d 与玉米 110 d, 共生期 20 d), 实现了三季轮作, 从而提高了复种指数, 并在此基础上增加了经济效益。青贮玉米全株收获的特性有效避免了籽粒成熟度不足的问题, 为小春作物的种植提供了保障<sup>[7]</sup>。此外, 采用“烟粮协同”策略在平衡经济效益与粮食安全的同时, 也有效防控了耕地“非粮化”现象<sup>[8]</sup>。然而, 由于坡耕地地形复杂, 且烤烟玉米套种模式下的高氮投入、作物根系分布和植被覆盖的特殊性, 造成的水土流失问题更加复杂。王力等<sup>[9-10]</sup>研究发现, 氮肥配施生物炭能够提高烤烟的生长和烤后烟叶的化学品质, 并在坡耕地烤烟/青贮玉米套作体系中发现, 氮肥配施生物炭对生物量和光合特性都有积极影响, 但其在水土流失防控中的协同机制尚未明确。

因此, 研究生物炭在坡耕地烤烟与青贮玉米套作系统中的应用具有重要的现实意义。本研究基于微型径流小区模拟试验, 通过精确控制试验条件, 系统探讨生物炭对坡耕地土壤保水保肥能力的影响, 并分析其对氮素流失控制的效果。通过本研究为生物炭在坡耕地农业中的应用提供实例和理论支持, 助力解决坡耕地水土流失问题, 推动农业的可持续发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

本试验在云南省昆明市云南农业大学资源与节水灌溉实验室开展(海拔 1 930 m)。供试土壤为红壤, 基础肥力见表 1。

表 1 土壤基础肥力  
Table 1 Basic soil fertility

全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全钾/ (g·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	铵态氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	硝态氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
0.62	1.95	0.94	8.12	118.25	14.01	46.45	37.84	226.91

### 1.2 试验材料

本试验供试的烤烟品种为云烟 87, 青贮玉米品种为中玉 335。供试生物炭原材料为烤烟烟秆(品种为中烟 100), 其炭化温度为 500 °C。生物炭的养分含量: 有机碳 476.68 g/kg、全氮 3.29 g/kg、全磷 2.25 g/kg、全钾 17.52 g/kg。模拟试验所用肥料为烤烟专用复合肥(N:P:K=15:8:25)、普钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>≥16%)、农用硫酸钾(K<sub>2</sub>O≥50%)和尿素(N≥46%)。将生物炭与试验土壤充分混合, 烤烟专用复合肥分基肥和追肥两次施用, 基肥和追肥比例为 7:3, 磷钾肥一次性施用; 玉米则不施用基肥, 所需氮肥分两次追肥施用。

### 1.3 试验设计

1.3.1 试验装置 本试验使用由南京林业大学制造的模拟降雨装置, 该装置能够模拟 15 mm/h 至 160

mm/h 的雨强。试验设置了 18 个坡度为 10° 的径流小区<sup>[9]</sup>, 每个小区长 140.2 cm, 宽 53.3 cm, 高 26.4 cm, 装满经 10 mm 筛处理的土壤, 每个小区上部和下部分别设置一个径流管和渗透管供模拟试验收集径流及淋溶量, 模拟径流小区户外露天放置。

1.3.2 试验方法 本试验为双因素随机区组试验, 设置了氮肥施用水平(不施用、减半施氮处理和常规施氮)和生物炭施用(施用与不施用)两个因素, 共设 6 个处理, 每处理 3 次重复。试验处理包括: 未施用氮肥和生物炭(B<sub>0</sub>N<sub>0</sub>), 1/2 常规氮肥施用量与未施用生物炭(B<sub>0</sub>N<sub>1</sub>), 常规氮肥施用量与未施用生物炭(B<sub>0</sub>N<sub>2</sub>), 未施用氮肥但施用 3% (每 100 kg 土壤添加 3 kg 生物炭)生物炭(B<sub>1</sub>N<sub>0</sub>), 1/2 常规氮肥施用量与施用 3% 生物炭(B<sub>1</sub>N<sub>1</sub>), 以及常规氮肥施用量与施用 3% 生物炭(B<sub>1</sub>N<sub>2</sub>)。各处理的施肥量见表 2。

表 2 不同处理施肥量

Table 2 Fertilizer application amount of different treatments

处理	烤烟纯氮用量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	烤烟纯磷(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )用量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	烤烟纯钾(K <sub>2</sub> O)用量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	生物炭/ %	玉米纯氮用量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
B <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	0	105	210	0	0
B <sub>0</sub> N <sub>1</sub>	52.5	105	210	0	100
B <sub>0</sub> N <sub>2</sub>	105	105	210	0	200
B <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	0	105	210	3	0
B <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	52.5	105	210	3	100
B <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	105	105	210	3	200

所有小区填充相同体积的常见红壤土,烤烟株距 55 cm 种植在模拟小区的中间,每个小区种植 3 株烟,于 2023 年 5 月 6 日将烟苗移植到小区,之后按照昆明市优质烤烟栽培生产技术规范进行田间管理,成熟时按烤烟成熟标准进行采收。在烤烟首次采收后(7 月 19 日)进行第 1 次模拟降雨试验,根据昆明市盘龙区降雨强度特性,本试验设计 3 个降雨强度,分别是 40 mm/h, 70 mm/h 及 160 mm/h,降雨时长 30 min,每次模拟降雨试验前均用 20 mm/h 的雨强降雨 1 h,保证各小区土壤含水量相对一致。烤烟第二次成熟采收前(8 月 13 日)用纸杯进行玉米育苗,烤烟第三次成熟采收前(8 月 24 日)将玉米苗按行株距(25 cm×55 cm)移栽在烤烟两侧,每个小区种植 6 株青贮玉米,烤烟于 2023 年 9 月 13 日采收完毕,烤烟玉米共生期为 20 d。玉米中耕除草及病虫害防治根据昆明当地玉米田间管理进行,在拔节期(9 月 27 日)和大喇叭口期(10 月 18 日)进行追肥。在玉米出穗前(10 月 27 日)进行第 2 次模拟降雨试验,玉米于 2023 年 12 月 9 日采收完毕。

#### 1.4 测定项目与方法

土壤氮素含量测定:分别在烤烟成熟后、玉米成熟后采集耕层土壤样品,测定全氮、硝态氮和铵态氮含量。产流时间:从第 2 次模拟降雨开始到产生径流的时间(s)。径流量:在第 2 次模拟降雨试验后,用量筒测定每个小区蓄水桶中的径流体积(ml),即为该小区的径流量。土壤侵蚀量:第 2 次模拟降雨产生径流后,充分搅拌蓄水桶中的水样,分上、中、下 3 层取水样,装入塑料瓶中过滤泥沙,烘干后称重。通过以下公式与各小区径流量进行换算,得出每次降雨产生的土壤侵蚀量:土壤侵蚀量(g)=水样中泥沙含量(g)/水样体积(ml)×小区径流量(ml)。土壤氮素流失量:每次降雨产生径流时采样,将蓄水桶中的水及

泥沙搅拌均匀,取中间部分水样,每次采集 250 ml 水样,测定其中的铵态氮、硝态氮及总氮量。

#### 1.5 数据处理与统计分析

数据使用 MS Excel 2010 进行整理,SPSS 24.0 软件进行单因素和二因素方差分析,二因素包括施氮量、生物炭及施氮量×生物炭的交互作用。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物炭与氮肥配施对土壤氮素含量的影响

由表 3 可知,生物炭、氮肥施用量及其配施对烤烟成熟后土壤的全氮、硝态氮和铵态氮含量均有极显著影响。烤烟成熟后的土壤全氮含量按以下顺序排列: $B_1N_2 > B_0N_2 > B_1N_1 > B_0N_1 > B_1N_0 > B_0N_0$ 。  $B_0N_0$  处理的土壤全氮含量均显著低于其他处理,其中生物炭与氮肥配施处理的土壤全氮含量分别比未施生物炭的处理提高了 6.39% 和 8.86%。玉米成熟后,各处理的土壤全氮含量顺序为  $B_1N_2 > B_1N_1 > B_0N_2 > B_0N_1 > B_1N_0 > B_0N_0$ ,添加生物炭的处理显著高于未添加生物炭的处理。这表明生物炭能够有效提高土壤的全氮含量。

各处理在烤烟成熟后和青贮玉米成熟后的土壤硝态氮含量差异较大。烤烟成熟后,添加生物炭的处理土壤硝态氮含量显著高于未添加生物炭的处理,其中  $B_1N_2$  处理显著高于  $B_0N_2$  处理,  $B_1N_0$  处理显著高于  $B_0N_0$  处理。青贮玉米成熟后,添加生物炭对土壤硝态氮含量均有显著影响,添加生物炭处理的硝态氮含量顺序为  $B_1N_2 > B_1N_1 > B_1N_0$ 。这表明生物炭对硝态氮( $NO_3^-$ -N)有较好的吸附作用。烤烟成熟后土壤铵态氮含量的变化趋势与青贮玉米成熟后的相似,添加生物炭显著提高了土壤铵态氮的含量,其中  $B_1N_2$  处理的土壤铵态氮含量显著高于其他处理,表明生物炭对铵态氮( $NH_4^+$ -N)也具有较好的吸附作用。

表 3 不同处理土壤氮素含量

Table 3 Soil nitrogen content of different treatments

处理	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )		硝态氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )		铵态氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	
	烤烟	青贮玉米	烤烟	青贮玉米	烤烟	青贮玉米
$B_0N_0$	0.516c	0.446c	31.249d	29.529d	29.450bc	28.713b
$B_0N_1$	1.315b	1.197ab	43.932b	38.174b	25.199d	24.279d
$B_0N_2$	1.400ab	1.234ab	41.829b	40.784b	28.085c	26.266c
$B_1N_0$	1.220b	1.135b	36.088c	35.783c	30.467b	29.405b
$B_1N_1$	1.399ab	1.365a	44.439b	41.713b	30.880b	29.096b
$B_1N_2$	1.524a	1.369a	65.866a	61.606a	33.353a	32.336a
B	**	**	**	**	**	**
N	**	**	**	**	**	**
B×N	**	**	**	**	**	**

注:同列不同小写字母代表  $p < 0.05$  水平下的差异;\*\*,\*分别表示  $p$  在 0.01,0.05 水平上差异显著;NS 为差异不显著;下同。

## 2.2 生物炭与氮肥配施对径流小区产流时间和径流量的影响

由表4可见,生物炭的添加对40,70,160 mm/h降雨强度下的径流量有显著或极显著的影响;施氮量对40,160 mm/h降雨强度下的径流量也有极显著的影响。

在3个不同的降雨强度下,施用生物炭的处理都推迟了产流时间,其中 $B_1N_2$ 处理的产流时间相比其他处理显著推迟。具体表现为,3个降雨强度下分别推迟了79.7%,63.4%和124.9%。在相同施氮水平的处理中,常规施氮处理的产流时间也有不同程度的推迟。不同降雨强度下的径流量结果显示,施用

生物炭处理的径流量均较低,40 mm/h降雨强度下,添加生物炭处理的径流量显著低于未添加生物炭的处理;70 mm/h降雨强度下, $B_1N_2$ 处理的径流量显著低于其他处理,其他处理之间无显著差异,但所有添加生物炭处理的径流量都较低;在160 mm/h降雨强度下,添加生物炭的处理的径流量显著低于未添加生物炭的处理。在不同降雨强度下,相同生物炭添加量的处理中,常规施氮处理的径流量也显著减少。

综上所述,生物炭的添加对推迟产流时间和减少径流量有显著作用。相比于生物炭配施减氮处理,生物炭配常规施肥的效果更为明显。

表4 不同降雨强度下不同处理的产流时间和径流量

Table 4 Runoff initiation time and runoff volume under different rainfall intensities and treatments

处理	40 mm/h雨强		70 mm/h雨强		160 mm/h雨强	
	产流时间/s	径流量/ml	产流时间/s	径流量/ml	产流时间/s	径流量/ml
$B_0N_0$	408.0b	1778.5a	364.5b	2373.0a	67.0b	21105.0a
$B_0N_1$	498.0b	1450.0b	394.5b	1742.0a	46.0b	23792.5a
$B_0N_2$	902.0b	1079.5c	798.5b	1540.0ab	92.5b	13235.0ab
$B_1N_0$	505.5b	1214.0bc	409.5b	1709.0ab	66.0b	16108.0ab
$B_1N_1$	781.0b	1043.0c	496.0b	1444.0ab	101.0b	16015.5ab
$B_1N_2$	1621.0a	401.0d	1304.5a	747.5b	208.0a	7070.5b
B		**		*		*
N		**		*		**
$B \times N$		NS		NS		NS

## 2.3 生物炭与氮肥配施对土壤侵蚀量的影响

根据图1所示,在不同降雨强度下, $B_1N_2$ 处理的土壤侵蚀量最小,相较于 $B_0N_2$ 处理,在3种降雨强度下 $B_1N_2$ 处理的土壤侵蚀量都有不同程度的降低。在相同施氮水平的条件下,添加生物炭处理表现出明

显的土壤侵蚀量降低趋势。对于未添加生物炭的处理,其土壤侵蚀量在3种降雨强度下随着施氮量的增加而逐渐降低。综上所述,生物炭能够有效减少土壤侵蚀量,具有较好地防止土壤侵蚀的作用。

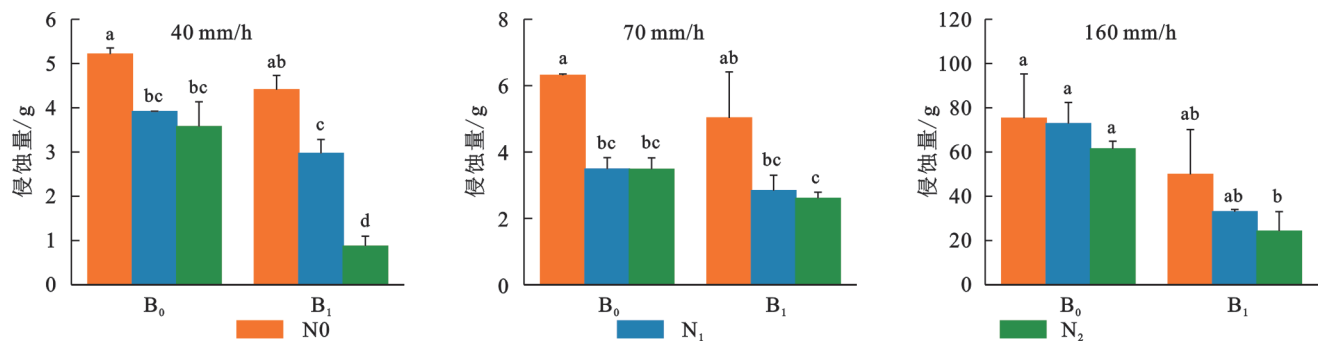


图1 不同处理不同降雨强度的土壤侵蚀量

Fig. 1 Soil erosion amount under different rainfall intensities and treatments

从表5可以看出,生物炭对不同降雨强度下的土壤侵蚀量具有极显著的影响,施氮量在40 mm/h和70 mm/h降雨强度下对土壤侵蚀量的影响也达到了极显著水平。

## 2.4 生物炭与氮肥配施对径流氮素流失的影响

从表6可以看出,生物炭对径流中硝态氮和铵态氮质量浓度具有显著影响,施氮量对硝态氮质量浓

度的影响达到极显著水平。此外,二者的交互效应对硝态氮质量浓度也有极显著影响,并且对第2次降雨后径流中的铵态氮质量浓度产生显著影响。

在40 mm/h降雨强度下,两次模拟降雨后 $B_0N_0$ 处理的径流硝态氮质量浓度均为最低, $B_1N_0$ 处理的质量浓度显著高于 $B_0N_0$ 处理。对于第1次降雨后的径流硝态氮质量浓度, $B_0N_1$ 和 $B_1N_1$ 处理之间没有显

著差异,而在第 2 次降雨后,  $B_1N_1$  处理的径流硝态氮质量浓度显著低于  $B_0N_1$  处理。  $B_1N_2$  处理在第 1 次降雨后径流硝态氮质量浓度显著低于  $B_0N_2$  处理,而在第 2 次降雨后,两者之间没有显著差异。第 1 次降雨后,未添加生物炭的处理,其径流硝态氮质量浓度随着施氮量的增加呈现上升趋势;第 2 次降雨后,添加生物炭的处理其径流硝态氮质量浓度随着施氮量的提高而逐渐增加,且 3 个处理之间差异显著。

表 5 不同处理不同降雨强度下土壤侵蚀量的方差分析结果

Table 5 ANOVA results of soil erosion amount under different rainfall intensities and treatments

处理	40 mm/h 侵蚀量	70 mm/h 侵蚀量	160 mm/h 侵蚀量
B	**	**	**
N	**	**	NS
B×N	**	NS	NS

表 6 40 mm/h 雨强下不同处理径流氮素流失

Table 6 Runoff nitrogen loss of different treatments under 40 mm/h rainfall intensity

处理	硝态氮质量浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )		铵态氮质量浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	
	第 1 次降雨	第 2 次降雨	第 1 次降雨	第 2 次降雨
$B_0N_0$	3.419c	1.717d	0.581a	0.559a
$B_0N_1$	4.111b	4.153a	0.482ab	0.522b
$B_0N_2$	6.194a	4.257a	0.496ab	0.537ab
$B_1N_0$	4.370b	2.660c	0.463ab	0.434d
$B_1N_1$	4.480b	3.501b	0.393b	0.476c
$B_1N_2$	4.212b	4.243a	0.459ab	0.525b
B	**	*	*	*
N	**	**	NS	NS
B×N	**	**	NS	*

第 1 次降雨后,添加生物炭的各处理其径流铵态氮质量浓度分别较对应未添加生物炭的处理降低了 20.31%, 18.46% 和 7.46%。第 2 次降雨后,  $B_1N_0$  处理的径流铵态氮质量浓度显著低于  $B_0N_0$  处理,  $B_1N_1$  处理显著低于  $B_0N_1$  处理,  $B_1N_2$  处理的质量浓度相比  $B_0N_2$  处理降低了 2.23%。随着施氮量的增加,添加生物炭的处理其径流铵态氮质量浓度也逐渐提高,并且 3 个处理之间有显著差异。

从表 7 可见,生物炭对 70 mm/h 降雨强度下径流中硝态氮和铵态氮质量浓度有显著影响。第 1 次降雨后,  $B_1N_1$  和  $B_1N_2$  处理的径流硝态氮质量浓度低于  $B_0N_1$  和  $B_0N_2$  处理。第 2 次降雨后,生物炭与氮肥配施处理的径流硝态氮质量浓度均低于对应的未添加生物炭处理。第 1 次降雨后,添加生物炭的处理相比未添加的处理,径流中的铵态氮质量浓度分别降低了

35.09%, 1.03% 和 9.27%, 其中  $B_1N_0$  处理的径流铵态氮质量浓度显著低于  $B_0N_0$  处理。第 2 次降雨后,添加生物炭处理的铵态氮质量浓度分别降低了 10.63%, 3.51% 和 2.14%, 且  $B_1N_0$  处理的铵态氮质量浓度显著低于  $B_0N_0$  处理。施氮量对两次模拟降雨后径流中硝态氮质量浓度,以及第 2 次降雨后径流中铵态氮质量浓度有极显著影响,而对第 1 次降雨后径流中铵态氮质量浓度有显著影响。生物炭与氮肥的互作对第 1 次降雨后径流中硝态氮和铵态氮质量浓度,以及第 2 次降雨后径流中硝态氮质量浓度有极显著影响,同时也显著影响第 2 次降雨后径流中的铵态氮质量浓度。

表 7 70 mm/h 雨强下不同处理径流氮素流失

Table 7 Runoff nitrogen loss of different treatments under 70 mm/h rainfall intensity

处理	硝态氮质量浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )		铵态氮质量浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	
	第 1 次降雨	第 2 次降雨	第 1 次降雨	第 2 次降雨
$B_0N_0$	2.280d	1.554c	0.738a	0.527a
$B_0N_1$	3.211c	4.311a	0.579b	0.484c
$B_0N_2$	6.770a	4.257a	0.550bc	0.513ab
$B_1N_0$	2.367d	1.660bc	0.479c	0.471c
$B_1N_1$	2.986c	1.470c	0.573b	0.467c
$B_1N_2$	4.489b	1.795b	0.499c	0.502b
B	**	**	**	**
N	**	**	*	**
B×N	**	**	**	*

从表 8 可见,160 mm/h 降雨强度下,生物炭对第 1 次降雨后径流中硝态氮质量浓度和第 2 次降雨后径流中铵态氮质量浓度有极显著的影响,对第 2 次降雨后硝态氮质量浓度和第 1 次降雨后铵态氮质量浓度有显著影响。其中,第 1 次降雨后,添加生物炭的处理的径流铵态氮质量浓度均低于未添加生物炭的处理,其中  $B_1N_2$  处理的径流铵态氮质量浓度显著低于  $B_0N_2$  处理。第 2 次降雨后,  $B_1N_0$  处理的径流铵态氮质量浓度最高,显著高于  $B_0N_0$  处理,  $B_1N_1$  和  $B_1N_2$  处理的径流铵态氮质量浓度显著低于  $B_0N_1$  和  $B_0N_2$  处理;施氮量除对第 1 次降雨后径流中铵态氮质量浓度无显著影响外,对硝态氮质量浓度具有极显著的影响;生物炭与氮肥的互作对第 1 次降雨后径流中硝态氮和铵态氮质量浓度有显著影响,对第 2 次降雨后径流中铵态氮质量浓度有极显著影响。

在不同降雨强度下,生物炭配施均显著降低了径流硝态氮和铵态氮浓度,且施氮量对硝态氮浓度影响极显著,二者互作效应对氮素流失调控具有关键作用。

表 8 160 mm/h 雨强下不同处理径流氮素流失  
Table 8 Runoff nitrogen loss of different treatments  
under 160 mm/h rainfall intensity

处理	硝态氮质量浓度/ (mg · L <sup>-1</sup> )		铵态氮质量浓度/ (mg · L <sup>-1</sup> )	
	第 1 次降雨	第 2 次降雨	第 1 次降雨	第 2 次降雨
B <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	2.337d	1.420b	0.503ab	0.514b
B <sub>0</sub> N <sub>1</sub>	4.365b	1.595ab	0.493ab	0.510b
B <sub>0</sub> N <sub>2</sub>	5.185a	1.024c	0.556a	0.530b
B <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	1.928d	1.633a	0.499ab	0.607a
B <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	3.213c	1.741a	0.468ab	0.370c
B <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	4.618b	1.092c	0.437b	0.393c
B	**	*	*	**
N	**	**	NS	**
B × N	*	NS	*	**

### 3 讨论

#### 3.1 生物炭与氮肥配施对土壤氮素含量的影响

氮素对作物的产量和质量有重要影响。长期以来,减少氮肥的损失、提高氮肥的利用率以及维持土壤氮素水平<sup>[11]</sup>,一直是我国农业生产领域的重点问题,尽管通过优化施肥策略已取得一定进展,仍未得到彻底解决。

本研究通过两个不同时间段的降雨模拟试验发现,添加生物炭显著提升了烤烟和青贮玉米成熟后土壤中的全氮含量。这一结论与已有研究成果一致<sup>[3]</sup>,进一步验证了生物炭通过物理吸附和化学固持作用增加土壤氮素储量的有效性。同时,B<sub>1</sub>N<sub>1</sub>与B<sub>0</sub>N<sub>2</sub>相比,二者在土壤全氮含量上未表现出显著差异。这表明,生物炭的应用可部分替代传统高氮投入,为实现化肥减施增效提供了可行路径。此外,作物成熟后土壤全氮仍维持较高水平,充分体现了生物炭在提升土壤氮素持留能力、避免养分耗竭方面的长效作用。结合生物炭的多孔结构和表面官能团特性推测,其可能通过吸附固定NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,减少降雨径流携带的氮素损失,从而维持土壤氮库稳定性。已有研究表明<sup>[12]</sup>,生物炭施用量与土壤全氮含量呈显著正相关,本试验中B<sub>1</sub>N<sub>2</sub>的全氮含量最高,同样印证了这一结果。

从氮素形态来看,生物炭的添加显著提高了两种作物成熟后土壤的硝态氮和铵态氮含量。在烤烟成熟期,B<sub>1</sub>N<sub>2</sub>的硝态氮含量较B<sub>0</sub>N<sub>2</sub>显著提升。这一现象与陈心想等<sup>[13]</sup>的研究结果一致,其机理可能与生物炭对NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的静电吸附和孔隙截留作用密切相关<sup>[14]</sup>。值得注意的是,在烤烟成熟期,除B<sub>1</sub>N<sub>1</sub>与B<sub>0</sub>N<sub>1</sub>的铵态氮含量无显著差异外,其余生物炭配施处理

均显著提升了土壤铵态氮水平,其中B<sub>1</sub>N<sub>2</sub>处理的铵态氮含量较B<sub>0</sub>N<sub>2</sub>显著增加,表明生物炭NH<sub>4</sub><sup>+</sup>对的阳离子交换吸附能力亦发挥了关键作用<sup>[15]</sup>。

综合现有研究与本文结果可知,生物炭提升土壤氮素含量的作用机制主要通过其自身所含的养分直接补充土壤养分以及通过表面吸附、孔隙截留等物理化学作用减少氮素淋失。然而,田间应用中需注意生物炭施用的阈值效应,过量施用可能导致土壤孔隙堵塞。因此,未来需要通过长期定位试验明确不同土壤类型下生物炭与氮肥的最佳配比,以实现水土保持与养分高效利用的协同优化。

#### 3.2 生物炭与氮肥配施对径流小区产流时间和径流量的影响

坡面径流的时空分布特征直接影响土壤侵蚀强度<sup>[16]</sup>。本研究表明,径流量与土壤侵蚀量呈显著正相关,这与罗伟祥等<sup>[17]</sup>提出的“径流驱动侵蚀”高度契合。

本试验结果表明,无论降雨强度如何变化,B<sub>1</sub>N<sub>2</sub>处理均能显著推迟产流时间,这与吴媛媛等<sup>[18]</sup>的研究结果一致,进一步验证了这一现象的普遍性。在相同的施氮水平下,添加生物炭也能在不同程度上推迟产流时间,其机理主要归因于生物炭的多孔隙结构对雨水的快速吸持作用。但需警惕过量施用生物炭可能引发土壤的总孔隙度降低,反而降低持水能力。

此外,施氮量的增加显著延长产流时间,这与张晓梅等<sup>[19]</sup>发现的氮肥促进玉米根系发育、增强土壤团聚体稳定性的结果相互印证。这表明氮肥不仅提供养分,还可通过改善根—土互作增强抗蚀能力。

生物炭的添加显著降低径流量,在不同降雨强度下各处理的径流量呈现相似的趋势,添加生物炭的处理的径流量低于与其对应的未添加生物炭的处理,这一趋势与Li等<sup>[20]</sup>在坡耕地的研究结果一致。在160 mm/h降雨强度下,B<sub>1</sub>N<sub>1</sub>的径流量仍高于B<sub>0</sub>N<sub>2</sub>,这与植株截留能力密切相关:减氮导致玉米株高、叶面积指数、冠层截留量降低。这说明在高强度降雨情景下,需维持适度氮肥投入以保证植被覆盖的截留效应。

#### 3.3 生物炭与氮肥配施对径流小区土壤侵蚀量的影响

土壤侵蚀引发的土地退化与养分流失已成为制约坡耕地农业可持续发展的关键瓶颈<sup>[20]</sup>。

本研究结果表明,生物炭配施常规氮肥在不同降雨强度下,土壤侵蚀量均较未添加生物炭处理呈现不同程度的降低,与Sadeghi等<sup>[21]</sup>在坡地的研究结果高度吻合。这一效应主要归因于生物炭的多级孔隙结构对径流动能的耗散作用,以及其对土壤团聚体稳定性的增强<sup>[22]</sup>。尽管生物炭显著降低土壤侵蚀

量,但其效果呈现降雨强度依赖性。在 160 mm/h 极端降雨下,  $B_1N_1$  的侵蚀量与  $B_0N_1$  无显著差异,这与 Abrol 等<sup>[23]</sup>提出的“临界雨强”理论一致——当降雨动能超过生物炭-土壤复合体的结构稳定性阈值时,其抗蚀效益将被部分抵消。

$B_1N_2$  展现出显著的侵蚀控制优势,其侵蚀量较单一施氮  $B_0N_2$  减少。这种协同作用源于两方面机制:其一,生物炭通过吸附  $NH_4^+$  和  $NO_3^-$ , 减少养分淋失导致的团聚体解体;其二,氮肥促进烤烟根系生物量增加,根长密度提升,通过根-土互作增强表层土壤抗剪强度<sup>[9]</sup>。尽管生物炭显著降低侵蚀量,但其效果存在施用阈值。当生物炭添加过量时,土壤渗透速率降低,可能导致地表径流集中<sup>[24]</sup>,进而增加土壤侵蚀量。本试验中 160 mm/h 降雨下  $B_1N_2$  的侵蚀量仍显著低于其他处理,表明生物炭与常规施氮的协同作用可突破单一措施的局限性。

本试验表明,生物炭配施常规氮肥可同步实现产流延迟、径流削减和侵蚀控制的三重效益,是坡耕地水土流失防控的优选方案。当降雨动能超过生物炭-土壤复合体的结构稳定性阈值时,其抗蚀效益将被部分抵消。但在化肥减量背景下,需通过深施生物炭结合根区精准供氮技术,在减少地表径流的同时保障作物需氮量。未来研究应聚焦生物炭孔隙老化机制及其与根系拓殖的时空耦合关系,以建立动态适配的炭-氮配施模式。

### 3.4 生物炭与氮肥配施对径流氮素流失的影响

坡耕地中,氮素流失主要通过径流携带的溶解氮( $NO_3^-$ -N)和泥沙携带的颗粒氮( $NH_4^+$ -N)两种途径,不同区域和不同氮素形态在径流氮素流失中的比例也有所不同<sup>[25-26]</sup>。

本试验中表明,随着降雨强度的变化,各处理的径流硝态氮质量浓度均表现出显著差异。 $B_0N_0$  处理的径流硝态氮质量浓度始终维持在较低水平,表明化肥的施用是径流硝态氮流失的主要来源。生物炭的添加显著改善了这一现象: $B_1N_2$  使硝态氮浓度降低,其原因在于生物炭比表面积和表面含氧官能团协同提升了硝态氮固持能力<sup>[27]</sup>。然而,在 160 mm/h 极端降雨下, $B_1N_2$  处理的硝态氮浓度仍显著高于  $B_0N_0$ ,可能的原因是本试验的连续性试验设计,高强度径流突破生物炭吸附阈值,导致浅层土壤中硝态氮在短时间内被冲刷迁移。

尽管  $NH_4^+$ -N 在总氮流失中占比不足 25%,但其环境风险不容忽视。添加生物炭使径流铵态氮浓度整体降低,这一结果与斯林林等<sup>[28]</sup>在紫色土坡地的研究结果一致。但需注意,在 160 mm/h 降雨下, $B_1N_0$  处

理的铵态氮浓度高于  $B_0N_0$ ,可能因生物炭添加改变了土壤 pH,促进了有机氮矿化<sup>[14]</sup>。

随着降雨强度增加,硝态氮流失占比从 74% 降至 58%,而铵态氮占比提升。这表明,高强度降雨更易通过剥离土壤颗粒加剧结合态氮流失。 $B_1N_2$  可同步降低溶解态和颗粒态氮素通量。这一综合效益与王舒等<sup>[27]</sup>提出的“生物炭-团聚体-氮素”三元耦合模型高度契合。

## 4 结论

生物炭与氮肥配施对烤烟/青贮玉米套作系统具有显著的积极影响。在土壤养分方面,生物炭能够显著提高烤烟和青贮玉米成熟后土壤的全氮含量,且生物炭搭配常规施氮处理能使土壤硝态氮含量达到最高水平,并且与氮肥配施能够有效提高土壤铵态氮含量。在水土保持方面,无论降雨强度如何变化,添加生物炭均能显著推迟产流时间,降低径流量和土壤侵蚀量,其中生物炭配合常规施氮的效果最为显著。此外,生物炭还能够降低径流中的硝态氮和铵态氮质量浓度,这直接减少了水体污染等风险。同时,土壤中氮素含量的提高可能促进作物生长,但需要平衡施肥量以避免过量。这些结果对土壤的影响包括改善土壤结构、增加有机质含量,从而增强土壤的抗侵蚀能力和保水保肥能力。对生产而言,这意味着更高的作物产量和更可持续的土地利用,减少肥料流失,降低成本。但本试验还存在模拟降雨与实际自然降雨的差异、生物炭的施用量和类型可能未达最优等局限性,实际推广需要进一步大田验证。综上所述,生物炭与常规施氮相结合的水土保持效果较为显著,为坡耕地农业生产中的土壤管理提供了科学依据。

### 参考文献(References):

- [1] 田卫堂,胡维银,李军,等.我国水土流失现状和防治对策分析[J].水土保持研究,2008,15(4):204-209.  
Tian W T, Hu W Y, Li J, et al. The status of soil and water loss and analysis of countermeasures in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(4): 204-209.
- [2] 陈正发.云南坡耕地质量评价及土壤侵蚀/干旱的影响机制研究[D].重庆:西南大学,2019.  
Chen Z F. Quality evaluation of slope farmland in Yunnan province and soil erosion/drought influencing mechanisms [D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [3] 葛少华,丁松爽,杨永锋,等.生物炭与化肥氮配施对土壤氮素及烤烟利用的影响[J].中国烟草学报,2018,24(2):84-92.

- Ge S H, Ding S S, Yang Y F, et al. Effects of mined application of biochar and nitrogen fertilizer on effective nitrogen in soil and nitrogen accumulation in flue-cured tobacco[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2018, 24(2):84-92.
- [4] 朱进辉,赵武成, Erastus Mak-Mensah,等.生物炭施加垄沟集雨种植对水土流失及紫花苜蓿草产量的影响[J]. *草地学报*, 2024, 32(5):1314-1326.
- Zhu J H, Zhao W C, MakMensah E, et al. Effects of biochar application and ridge-furrow rainwater harvesting on soil erosion control and alfalfa fodder yield [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(5):1314-1326.
- [5] 伍林.生物炭添加对微小区坡面土壤侵蚀的影响研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2023.
- Wu L. Effect of biochar addition on slope soil erosion in micro-plots[D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2023.
- [6] 杨铭榆,陈志诚,潘美清,等.烟-稻轮作下减氮配施生物炭对水稻茎鞘同化物转运和产量形成的影响[J]. *中国水稻科学*, 2024, 38(5):555-566.
- Yang M Y, Chen Z C, Pan M Q, et al. Effects of nitrogen reduction combined with biochar application on stem and sheath assimilate translocation and yield formation in rice under tobacco-rice rotation [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2024, 38(5):555-566.
- [7] Lahori A H, Zhang Z Q, Guo Z Y, et al. Beneficial effects of tobacco biochar combined with mineral additives on (im)mobilization and (bio)availability of Pb, Cd, Cu and Zn from Pb/Zn smelter contaminated soils [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 145:528-538.
- [8] 马林杰,张诚信,覃宝利,等.秸秆及生物炭还田对稻虾共作模式水稻产量、氮肥利用率及土壤肥力的影响[J]. *江苏农业学报*, 2024, 40(9):1623-1632.
- Ma L J, Zhang C X, Qin B L, et al. Effects of straw and biochar returning on rice yield, nitrogen use efficiency and soil fertility in a rice-crayfish integrated system [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 40(9):1623-1632.
- [9] 王力,顾浩,李嘉亮,等.氮肥配施生物炭对坡耕地烤烟/青贮玉米套作生物量和光合特性的影响[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2021, 36(6):985-992.
- Wang L, Gu H, Li J L, et al. Effect of nitrogen fertilizer combined with biochar on the biomass and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco/silage corn relay intercropping on slope farmland [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science*, 2021, 36(6):985-992.
- [10] 何聪莲,顾浩,张锦韬,等.氮肥配施生物炭对烤烟生长及烤后烟叶化学品质的影响[J]. *云南农业大学学报:自然科学*, 2022, 37(6):1014-1020.
- He C L, Gu H, Zhang J T, et al. Effects of combined application of biochar and nitrogen fertilizer on growth and chemical quality of flue-cured tobacco [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science*, 2022, 37(6):1014-1020.
- [11] 阮贞静,周静,李海,等.氮肥追施对烤烟套作早熟玉米氮素利用及产质量的影响[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2024, 39(6):151-159.
- Ruan Z J, Zhou J, Li H, et al. Effects of nitrogen fertilizer topdressing on nitrogen utilization, yield, and quality of early maturing maize intercropping with tobacco [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science*, 2024, 39(6):151-159.
- [12] 朱兆良.农田中氮肥的损失与对策[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(1):1-6.
- Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction [J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1):1-6.
- [13] 陈心想.生物炭对土壤性质、作物产量及养分吸收的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学, 2014.
- Chen X X. Effects of biochar on soil properties, crop yield and nutrient absorption [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2014.
- [14] Usman A R A, Ahmad M, El-Mahrouky M, et al. Chemically modified biochar produced from *Conocarpus* waste increases NO<sub>3</sub> removal from aqueous solutions [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2016, 38(2):511-521.
- [15] Lehmann J, Pereira da Silva J, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthro-sol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments [J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2):343-357.
- [16] 庞芳,王娜,梁致齐.不同雨强、坡度和植被覆盖对密云库区坡地产流及磷流失的影响[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(2):122-130, 139.
- Pang F, Wang N, Liang Z Q. Effects of different rainfall intensities and slope gradients on runoff and phosphorus losses on sloping lands in Miyun Reservoir Area [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(2):122-130, 139.
- [17] 罗伟祥,白立强,宋西德,等.不同覆盖度林地和草地的径流量与冲刷量[J]. *水土保持学报*, 1990, 4(1):30-35.
- Luo W X, Bai L Q, Song X D, et al. Runoff and scouring amount in forest and grass land with different cover rate [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1990, 4(1):30-35.
- [18] 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.
- [19] 张晓梅,何丙辉,郝明德,等.不同施氮量黄绵土径流泥

- 沙及全氮流失特征[J]. 西南大学学报:自然科学版, 2010,32(9):88-93.
- Zhang X M, He B H, Hao M D, et al. Loss characteristics of runoff and sediment and total nitrogen on loessial soil under different nitrogen treatments [J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2010, 32(9):88-93.
- [20] 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.
- [21] Sadeghi S H, Hazbavi Z, Harchegani M K. Controllability of runoff and soil loss from small plots treated by vinasse-produced biochar[J]. Science of the Total Environment, 2016, 541:483-490.
- [22] 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.
- [23] Abrol V, Ben-Hur M, Verheijen F G A, et al. Biochar effects on soil water infiltration and erosion under seal formation conditions: rainfall simulation experiment[J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(12): 2709-2719.
- [24] Lee S S, Shah H S, Awad Y M, et al. Synergy effects of biochar and polyacrylamide on plants growth and soil erosion control [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(3):2463-2473.
- [25] 唐倩,王克勤,宋娅丽,等.有机肥对滇中红壤烤烟坡耕地氮磷流失的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2020,48(6):106-116.
- Tang Q, Wang K Q, Song Y L, et al. Effects of organic fertilizer on nitrogen and phosphorus loss in flue-cured sloping farmland of red soil in central Yunnan[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2020, 48(6):106-116.
- [26] 伍冰晨,陈晓安,汤崇军,等.红壤坡地果园产流产沙及氮磷流失对坡面水土保持措施响应[J].水利学报, 2024, 55(7):802-814.
- Wu B C, Chen X A, Tang C J, et al. Response of runoff and sediment yield and nitrogen and phosphorus loss to soil and water conservation measures in orchards of red soil slope[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(7):802-814.
- [27] 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.
- [28] 斯林林.生物炭配施化肥对稻田养分利用及流失的影响[D].杭州:浙江大学,2018.
- Si L L. Effects of biochar combined with fertilizer on nutrient use and loss in paddy fields [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.

(上接第 79 页)

- [20] Posadas A N D, Giménez D, Bittelli M, et al. Multi-fractal characterization of soil particle-size distributions [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(5):1361-1367.
- [21] Montero E. Rényi dimensions analysis of soil particle-size distributions [J]. Ecological Modelling, 2005, 182(3/4):305-315.
- [22] Dou Y X, Yang Y, An S S, et al. Effects of different vegetation restoration measures on soil aggregate stability and erodibility on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2020, 185:104294.
- [23] Zi Q G, Hua K Z, Chen W J, et al. Impacts of 21-year field warming on soil erodibility in the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. Geoderma, 2022, 405:115382.
- [24] Li H, Liu G, Gu J, et al. Response of soil aggregate disintegration to the different content of organic carbon and its fractions during splash erosion [J]. Hydrol Process, 2021, 35(2):e14060.
- [25] Chen H, Ju P J, Zhu Q A, et al. Carbon and nitrogen cycling on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, 3(10):701-716.
- [26] Zhang Y Q, Tang Y H, Jiang J, et al. Characterizing the dynamics of soil organic carbon in grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 50(1):113-120.
- [27] 刘亚龙,王萍,汪景宽.土壤团聚体的形成和稳定机制:研究进展与展望[J].土壤学报,2023,60(3):627-643.
- Liu Y L, Wang P, Wang J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: progress and prospect [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3):627-643.
- [28] Liang C, Schimel J P, Jastrow J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage [J]. Nature Microbiology, 2017, 2:17105.
- [29] Gao Z Y, Niu F J, Lin Z J, et al. Fractal and multifractal analysis of soil particle-size distribution and correlation with soil hydrological properties in active layer of Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Catena, 2021, 203:105373.