

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.04.012

李鸿, 史东梅, 盘礼东. 生物炭与化肥配施对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤水分及入渗特性的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(4): 121-132.

生物炭与化肥配施对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤水分及入渗特性的影响

李鸿, 史东梅, 盘礼东

西南大学 资源环境学院/三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715

摘要: 土壤水分及入渗是坡耕地降雨径流侵蚀的关键环节。采用铲土侵蚀模拟法, 建立 5 种侵蚀程度的坡耕地原位试验, 开展不施肥(CK)、单施化肥(F)、生物炭与化肥配施(BF)的对比试验, 分析不同施肥措施与侵蚀程度下土壤水分及入渗性能变化。结果表明: ① 在不同施肥措施下, BF 提高了土壤中粉粒占比, 显著降低了土壤容质量, 增大了毛管孔隙度, 提高了土壤自然含水率; 而随着侵蚀强度加剧, 土壤容质量总体呈现上升趋势, 总孔隙度则呈相反规律, 自然含水率也随之下降。② 坡耕地耕层土壤稳定入渗率从大到小依次为: CK, F, BF, 对施肥措施响应显著, 但土壤侵蚀强度对入渗特征作用不显著; Philip 模型对施肥措施下坡耕地侵蚀性耕层土壤水分入渗过程模拟效果最佳, Horton 模型能较好地反映低侵蚀强度下耕层入渗规律, 而高侵蚀强度下则以 Philip 模型拟合效果更优。③ 冗余分析(RDA)结果显示, BF、土壤侵蚀厚度 20 cm(S_{-20})、F、CK、土壤侵蚀厚度 15 cm(S_{-15})是引起耕层土壤物理性能与入渗参数发生变化的主要因素($p < 0.05$); 土壤孔隙度以及水分指标与砂粒、粉粒均呈正相关, 与黏粒、容质量呈负相关; 土壤容质量与黏粒、入渗特征存在正相关关系; 同时, 15 cm 侵蚀厚度(S_{-15})是该研究区紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤的承受阈值。

关键词: 生物炭; 土壤侵蚀; 耕层; 入渗模型; 紫色土坡耕地

中图分类号: P426.68; S152.7

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2024)04-0121-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Biochar and Fertilizer Application on Soil Moisture and Infiltration Performance of the Erosive Plow Layer Soil in Sloping Farmland of Purple Soil

LI Hong, SHI Dongmei, PAN Lidong

College of Resources and Environment, Southwest University/Key Laboratory of Eco-Environment in the Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400715, China

收稿日期: 2023-06-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771310)。

作者简介: 李鸿, 博士, 讲师, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。

Abstract: Soil moisture and infiltration are key aspects of rainfall runoff erosion on sloping farmland. Field test plots with 5 soil erosion intensities were established by using the shovel erosion simulation test method. Based on those field test plots, comparative tests were carried out with no fertilizer application (CK), fertilizer application alone (F) and biochar and fertilizer application (BF) to investigate the effects of biochar and fertilizer application on soil physical properties and infiltration performance of purple soil in sloping farmland. The results show that: ① Under different fertilizer applications, BF increased the proportion of silt in the soil, significantly reduced the soil bulk density, increased the soil capillary porosity and the natural water content, while the soil bulk density generally showed a rising trend with the increase of erosion intensity, but the soil total porosity and natural water content showed an opposite pattern. ② Among the soil water infiltration parameters, only the stable infiltration rate responded significantly to the fertilizer application, showing a pattern of reducing as CK, F, BF, but the effect of soil erosion intensity on infiltration characteristics was not significant. The Philip model was found to be the most effective under different fertilizer applications in this study area. Under different erosion intensities, the Horton was a better model under low erosion intensity, while the Philip model responded better under high erosion intensity. ③ The results of the redundancy analysis (RDA) showed that BF, soil erosion thickness of 20 cm (S_{-20}), F, CK and soil erosion thickness of 15 cm (S_{-15}) were the main factors causing changes in soil physical properties and infiltration parameters ($p < 0.05$). Soil porosity and moisture characteristics were positively correlated with sand and silt of soil, and negatively correlated with clay and bulk density of soil. Soil bulk density had a positive effect on clay grains and infiltration characteristics. In conclusion, the application of biochar with chemical fertilizers changed the soil properties and its infiltration characteristics. The negative effects of soil erosion were evidenced when the erosion depth reached or exceeded 15 cm. The results of the study may provide a reference for the application of biochar in the improvement of purple soil in sloping farmland, which provide ideas for sustainable agricultural development and soil erosion management in the region.

Key words: biochar; soil erosion; stable infiltration rate; infiltration model; redundancy analysis

三峡库区自然资源丰富,地势起伏变化较大,坡耕地成为支撑该区域农业活动和粮食生产的主要方式。受亚热带季风影响,库区降雨时空分布不均,暴雨与季节性干旱频繁^[1],加之该区域特色土壤——紫色土具有土层浅薄、母质疏松和易于崩解的特点,土壤侵蚀现象时有发生^[2-3]。人为耕作与土壤侵蚀所形成的双重压力导致库区土壤地表大面积扰动,植被破坏,土地疏松裸露,使坡耕地成为水土流失最为严重的土地类型之一,其土壤的流失更是致使该区域生态恶化的根本原因之一^[4],严重制约了西南地区农业可持续发展和区域经济社会的高质量发展。

生物炭作为农业生产过程中常用的土壤改良剂,以其良好的物理结构和生化性质,在调整土壤结构、提高保水保肥性能等方面起到重要作用^[5]。生物炭复杂的孔隙体系和高比表面积的特性,使其具有较强的吸附性与离子交换能力,进而表现出不同的环境效应^[6-7]。研究表明,生物炭在掺入土壤后,可显著降低土壤容质量^[8],增大土壤孔隙度^[9],提升土壤持水能力^[8],抑制土壤胶体剥离^[10],延迟产流产沙时间^[11],在水土流失防治方面具有良好效益^[6-7]。尽管大量研究证实了生物炭在土壤改良方面发挥了重大作用,但仅靠单施生物炭难以充分发挥其潜在效益且施用不当可能会适得其反,存在一定的不稳定性^[6, 12],与化肥配施可以达到既发挥其自身优势又减小化肥输入对环境带来的负面影响的良好效果^[13]。此外,有学者证实,在总体效益上生物炭虽然起到降低土壤坡面径流和产沙量的作用,但在耕作条件下却加剧了土壤侵蚀风

险^[14]。因此, 对生物炭的应用研究不能仅限于单一环境, 应基于土壤侵蚀与人为耕作的综合环境, 探究其农艺价值与改良作用, 这样才更具实际参考意义。

土壤水是农业生产中水土资源相互作用的关键枢纽, 入渗则是地表水转化为土壤水的复杂过程^[15]。土壤入渗性能不仅能够直接反映土壤涵养水源的能力, 也是阐明坡耕地产流产沙机制的前提与基础, 对土壤水文过程的探究具有重要意义^[3, 16]。鉴于此, 本研究基于不同土壤侵蚀强度的野外模拟试验小区, 设置 3 种施肥措施, 对比生物炭与化肥配施下土壤水分与入渗性能的变化规律, 模拟土壤水分入渗过程并筛选最佳适宜入渗模型, 同时分析施肥措施与土壤侵蚀强度的综合效益并明确土壤各指标间的相互作用, 从而全面揭示生物炭对土壤水力学特性与水文过程的影响, 为三峡库区紫色土坡耕地生物炭的保水抗蚀应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

由图 1 所示, 试验区位于重庆市万州区熊家镇(30°55′10″N, 108°25′51″E), 属三峡库区腹地, 亚热带季风性湿润气候, 夏季炎热多雨, 冬季寒冷湿润, 平均海拔 355.5 m, 年均气温 17.7℃, 年均降水量 1 243 mm, 多集中于 5—9 月, 年均日照时数 1 484.4 h。研究区土壤以中性紫色土为主, 属中生代侏罗系沙溪庙组灰棕紫色沙泥页岩母质发育, 土壤结构疏松, 抗蚀性差。该区域坡耕地分布广泛, 具有地块小、坡度大、土层浅的显著特点, 农业种植方式以玉米(*Zea mays* L.)、油菜(*Brassica napus* L.)为主。



审图号: GS(2023)3333 号

图 1 试验小区概况图^[33]

1.2 铲土侵蚀模拟试验小区建立

试验小区于 2018 年建立, 试验小区设置控制组(未侵蚀地块)和处理组(不同侵蚀厚度小区), 通过人为铲土法与施肥措施分别反映土壤侵蚀与人为耕作对坡耕地耕层土壤影响的真实情况。首先, 采

用人为铲土法模拟自然条件下不同土壤侵蚀强度,即人为铲去不同厚度的土层,具体方法与参照公式见文献[17]. 试验共设有 5 个土壤侵蚀强度:土层侵蚀深度 5 cm(S_{-5}),土层侵蚀深度 10 cm(S_{-10}),土层侵蚀深度 15 cm(S_{-15}),土层侵蚀深度 20 cm(S_{-20})以及未侵蚀小区作为对照(S_{-0}). 试验小区面积均为 12 m²(4 m×3 m),田面坡度 15°,各小区初始土壤理化性质如表 1 所示. 于铲土侵蚀模拟试验小区布设施肥处理,共设 3 种施肥措施:不施肥(CK),单施化肥(F)和生物炭与化肥配施(BF),其中 CK 为空白对照. 加之试验小区原有的 5 个土壤侵蚀强度,共计 15 个处理. 每个处理设置 3 次重复,共计 45 个小区.

化肥施用水平参照当地农业实际生产,以 277.5 kg/hm² 复合肥(N:P₂O₅:K₂O=25:12:18)为每年作物总施用量,每年追加 2 次尿素(总氮≥46.4%). 同时,在 BF 措施小区施肥后向土壤表面均匀撒施 15 t/hm² 生物炭(原料为水稻秸秆),经过人工翻耕将化肥与生物炭混入耕层.

表 1 各试验小区初始的土壤理化性质

处理	土壤容质量/ (g·cm ⁻³)	含水率/ %	机械组成/%			毛管孔隙 度/%	总孔隙 度/%	有机质/ (g·kg ⁻¹)
			砂粒	粉粒	黏粒			
			1~0.05 mm	0.05~0.001 mm	<0.001 mm			
S_{-0}	1.41	17.32	37.33	50.67	12.00	35.12	46.84	8.35
S_{-5}	1.44	15.67	41.83	41.17	14.50	34.96	45.52	7.10
S_{-10}	1.36	16.81	42.00	43.33	14.67	35.94	48.54	7.60
S_{-15}	1.43	15.68	44.33	38.67	17.00	34.72	46.13	7.20
S_{-20}	1.40	15.84	50.00	34.00	16.00	35.54	47.08	7.18

1.3 土壤样品采集与测定

选择 2019 年 8 月玉米收获前的晴天进行土样采集,在每个铲土侵蚀小区分别于上、中、下 3 个坡位,用 100 cm³ 环刀和铝盒采集原状土样,并用塑料膜密封,同时基于五点法在对应每个坡位垂直采集 0~20 cm 耕层土样,用四分法剔去多余土壤,保留约 3 kg 混合土样带回实验室,拣出砾石、草根等杂物后于阴凉处自然风干备用.

采用吸管法测定土壤质地(砂粒、粉粒、黏粒). 采用环刀法测定土壤容质量、孔隙度、毛管孔隙度、田间持水量以及饱和含水量. 采用烘干法测定土壤自然含水率. 采用单环有压入渗法测定并计算土壤的入渗特征参数,包括初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率、40 min 累积入渗量以及 90 min 累积入渗总量^[18].

1.4 土壤水分入渗模型建立

为模拟不同条件下入渗率随时间的变化过程,国内外专家学者提出了许多土壤水分入渗模型,主要分为两类:一类是为经验模型,模型中参数不代表明确的物理意义,例如 Kostiakov 模型;另一类是物理模型,如 Horton 方程和 Philip 入渗模型,其参数具有明确的物理意义^[19]. 选取以上 3 种常用的入渗模型,对不同施肥措施与侵蚀强度下的土壤水分入渗过程进行模拟并评价其适用性与准确性. 具体公式与参数如下.

Kostiakov 模型:

$$I(t)=at^{-n}$$

式中: $I(t)$ 为入渗率(mm/min); t 为入渗时间(min); a,n 为模型参数.

Horton 模型:

$$I(t)=I_f+(I_i-I_f)e^{-ct}$$

式中: I_f 为稳定入渗率(mm/min); I_i 为初始入渗率(mm/min); c 为模型参数.

Philip 模型:

$$I(t)=A+bt^{-0.5}$$

式中: A 为稳定入渗率(mm/min); b 为模型参数.

1.5 数据分析

基于 SPSS 20.0, 利用 K-S 检验对样本进行正态分布检验后, 进行单因素方差分析与统计分析, 采用 Excel 2016 进行数据整理、作图. 同时, 以不同施肥措施与土壤侵蚀强度为环境因素, 土壤结构、水分特征以及入渗参数为研究对象, 采用 Canoco 5.0 进行冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)并绘制相应图表.

2 结果与分析

2.1 施肥措施与侵蚀强度下耕层物理性能变化

整体而言, 在不同施肥措施与侵蚀强度下耕层均以粉粒占比最高. 在 CK 措施下, 耕层土壤粉粒占比最高, 其次为黏粒, 砂粒所占比例相对较低; 而在 F 措施下, 耕层砂粒占比升高, 黏粒占比下降, 占比从大到小依次为: 粉粒、砂粒、黏粒. 值得注意的是, BF 措施下耕层粉粒占比在 3 种措施中最高, 较 CK 与 F 分别提高了 3.73%, 8.43%, 其次为黏粒, 砂粒占比最低. 此外, 随着侵蚀强度的增加, 耕层土壤黏粒占比逐渐上升, 粉粒则逐渐下降(图 2).

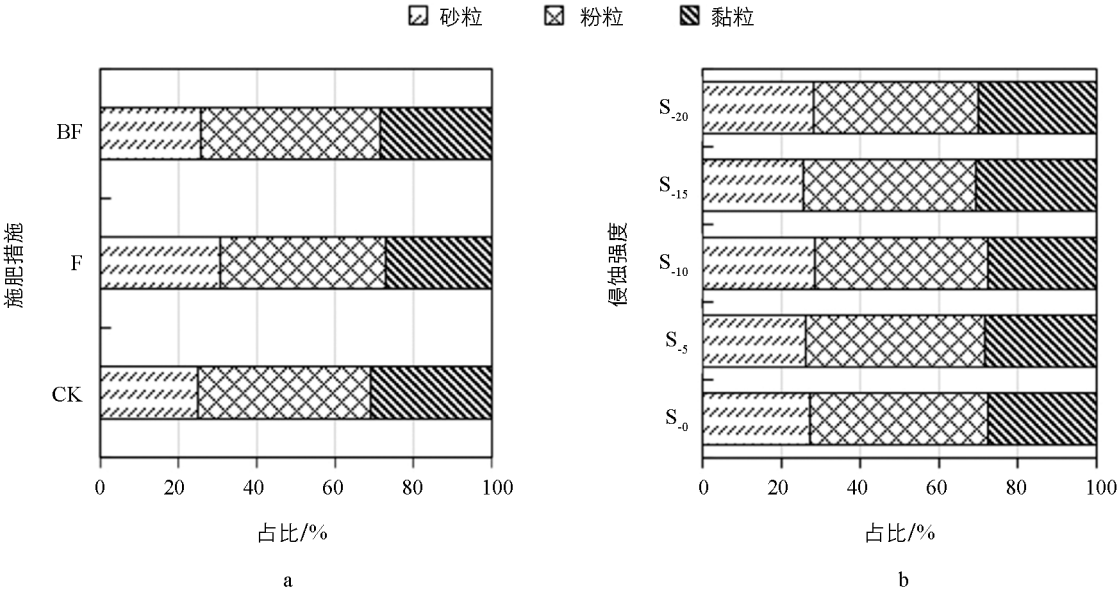
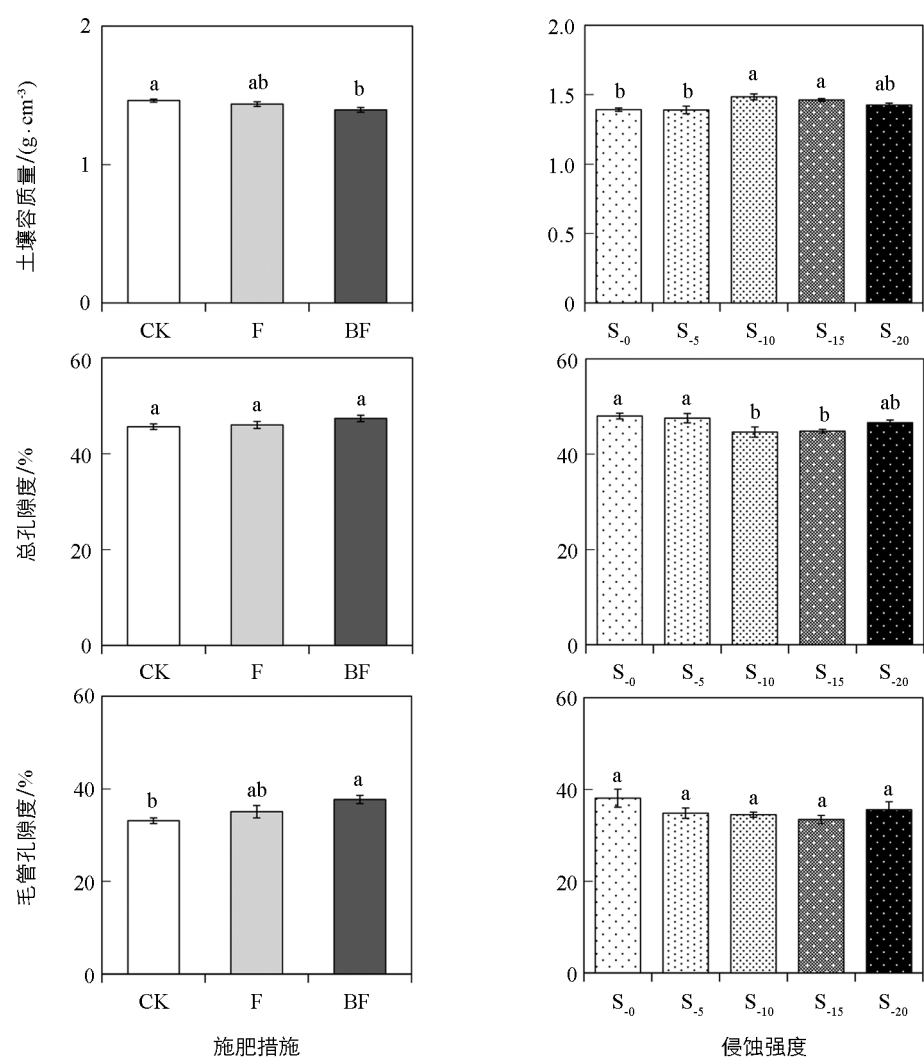


图 2 施肥措施与侵蚀强度对耕层质地的影响

在不同施肥措施的作用下, 土壤容质量与毛管孔隙度呈现相反的变化规律: 与 CK 相比, F 与 BF 耕层土壤容质量分别下降 1.70%, 4.56%, CK 与 BF 间差异有统计学意义($p<0.05$); 而毛管孔隙度在 BF 措施下达到最大值, 相比 CK 显著提升了 13.84%, 不同施肥措施对土壤总孔隙度影响不显著. 随着侵蚀强度的加剧, 耕层容质量总体呈现上升趋势, 表现为 $S_{-0}, S_{-5}<S_{-20}<S_{-15}, S_{-10}$, 而总孔隙度恰好相反, 在 S_{-0} 水平下达到最大值, 表现为 $S_{-15}, S_{-10}<S_{-20}<S_{-0}, S_{-5}$ (图 3).

2.2 施肥措施与侵蚀强度对耕层水分的影响

由图 4 可知, 不同施肥措施对耕层田间持水量与饱和含水量的影响不显著, 仅对于自然含水率作用明显($p<0.05$): 与 CK 相比, F 与 BF 措施下耕层土壤自然含水率显著提高了 30.47%与 45.33%. 与之相同的是, 不同侵蚀强度也仅对土壤自然含水率有显著作用, 主要表现为随着土壤侵蚀强度的增加, 含水量逐步降低, 表现为 $S_{-0}>S_{-5}>S_{-10}>S_{-15}>S_{-20}$, 其中与 S_{-0} 相比, S_{-20} 下耕层自然含水率显著降低了 33.22%($p<0.05$).



不同字母表示 Duncan 比较在 0.05 水平差异有统计学意义,下同。

图 3 施肥措施与侵蚀强度对耕层物理性能的影响

2.3 施肥措施与侵蚀强度下耕层水分入渗规律

相较于侵蚀强度,不同施肥措施对耕层水分入渗的影响更为显著.由图 5 可知,在不同施肥措施下,耕层稳定入渗率发生变化,从大到小依次为:CK, F, BF. 其中,与 CK 相比, BF 措施下耕层稳定入渗率显著下降了 47.20%($p < 0.05$). 初始入渗率、平均入渗率、40 min 累积入渗量与 90 min 累积入渗总量也随着不同施肥措施与侵蚀强度总体呈现下降趋势,但处理间差异无统计学意义($p > 0.05$).

2.4 施肥模式与侵蚀强度下耕层入渗过程模拟

3 种入渗模型对施肥模式与侵蚀强度下耕层水分入渗过程的拟合效果存在一定差异(表 2). 在不同施肥模式下,3 种模型 R^2 拟合度均达 0.800 以上,平均拟合度从大到小依次为:Kostiakov 模型(0.948)、Horton 模型(0.944)、Philip 模型(0.884),其中 Horton 模型拟合结果显示,拟合 I_f (稳定入渗率)分别为 3.406(CK), 0.665(F), 2.403(BF)mm/min,与实际测定值 2.902(CK), 2.279(F), 1.472(BF)mm/min 相差较大,而 Philip 模型中 A(稳定入渗率)与实际值相差较小,差幅分别在 0.214(CK), 0.220(F), 0.370(BF) mm/min,说明 Philip 模型拟合效果更佳.

在不同侵蚀强度下,基于模型拟合度 R^2 分析, S_{-0} , S_{-5} , S_{-15} 强度以 Horton 模型 R^2 拟合度最高,而在 S_{-10} , S_{-20} 强度下 3 种模型拟合均较好, R^2 均达 0.92 以上(表 3). 与稳定入渗率实际测定值(1.870~2.585 mm/min)相比, S_{-0} , S_{-10} , S_{-15} 在 Horton 模型下 I_f 拟合更为接近,差幅分别在 0.001, 0.764,

0.775 mm/min; S₋₂₀ 则在 Philip 模型下拟合值 A 预测更为准确, 仅相差 0.092 mm/min; 在 S₋₅ 强度下 Horton 与 Philip 模型均能达到较好预测效果, 差值分别为 0.655, 0.442 mm/min, 但 Horton 模型拟合度 R²(0.918)远高于 Philip 模型(0.794).

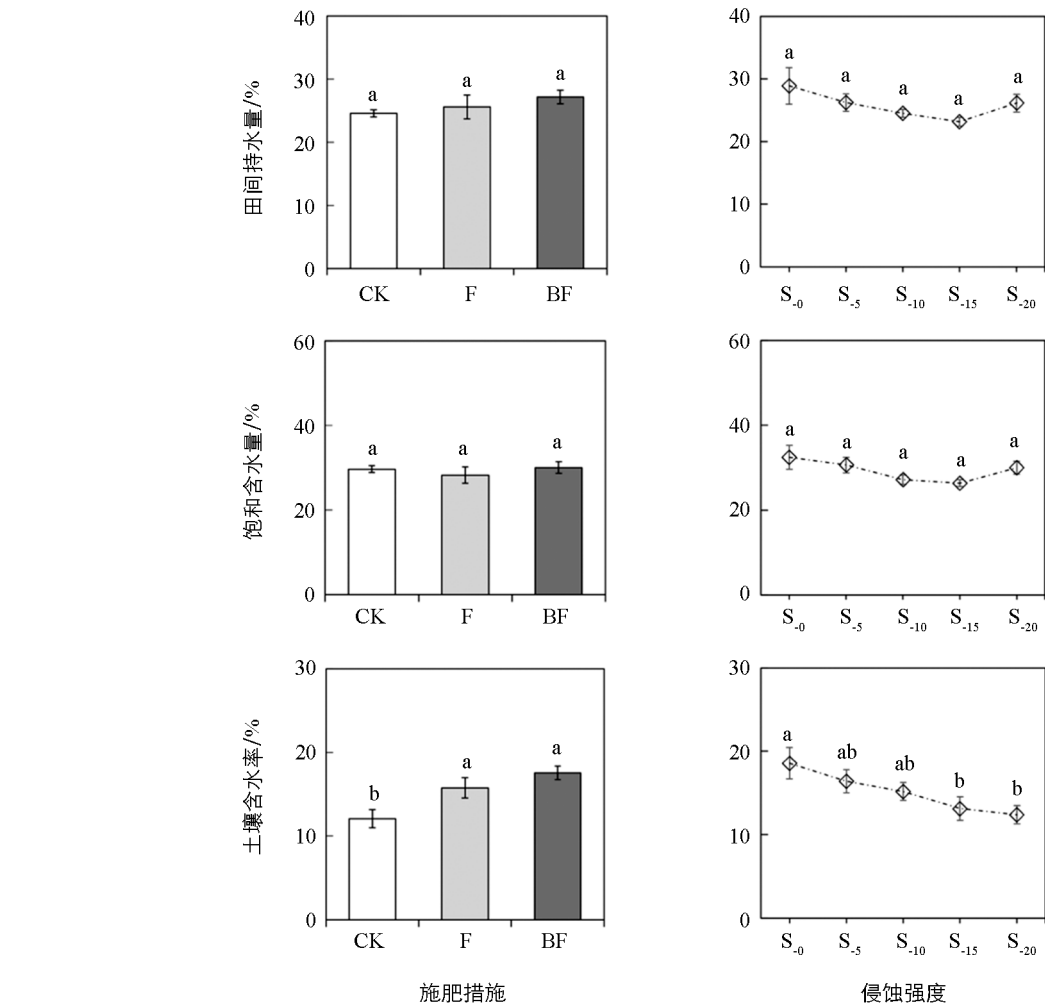


图 4 施肥措施与侵蚀强度对耕层水分的影响

表 2 施肥模式下耕层入渗模拟方程

Kostiakov 模型			Horton 模型			Philip 模型		
	$I(t)=at^{-n}$	R^2		$I(t)=I_f+(I_i-I_f)e^{-ct}$	R^2		$I(t)=A+bt^{-0.5}$	R^2
CK	$I(t)=10.810 t^{-0.288}$	0.979		$I(t)=3.406+8.232 e^{-0.137t}$	0.954		$I(t)=2.688+8.175 t^{-0.5}$	0.929
F	$I(t)=8.098 t^{-0.252}$	0.909		$I(t)=0.665+0.002 e^{-1.000t}$	0.917		$I(t)=2.499+5.625 t^{-0.5}$	0.822
BF	$I(t)=8.637 t^{-0.309}$	0.956		$I(t)=2.403+7.029 e^{-0.137t}$	0.961		$I(t)=1.842+6.841 t^{-0.5}$	0.900

表 3 侵蚀强度下耕层入渗模拟方程

Kostiakov 模型			Horton 模型			Philip 模型		
	$I(t)=at^{-n}$	R^2		$I(t)=I_f+(I_i-I_f) e^{-ct}$	R^2		$I(t)=A+bt^{-0.5}$	R^2
S ₋₀	$I(t)=8.238 t^{-0.250}$	0.953		$I(t)=2.584+5.693 e^{-0.087t}$	0.967		$I(t)=2.576+5.686 t^{-0.5}$	0.857
S ₋₅	$I(t)=8.273 t^{-0.253}$	0.889		$I(t)=2.766+5.948 e^{-0.111t}$	0.918		$I(t)=2.552+5.736 t^{-0.5}$	0.794
S ₋₁₀	$I(t)=14.129 t^{-0.377}$	0.959		$I(t)=3.274+12.940 e^{-0.176t}$	0.923		$I(t)=1.693+12.513 t^{-0.5}$	0.939
S ₋₁₅	$I(t)=6.561 t^{-0.174}$	0.832		$I(t)=2.796+3.710 e^{-0.066t}$	0.915		$I(t)=3.117+3.402 t^{-0.5}$	0.669
S ₋₂₀	$I(t)=8.797 t^{-0.318}$	0.986		$I(t)=2.514+7.185 e^{-0.152t}$	0.955		$I(t)=1.778+7.063 t^{-0.5}$	0.947

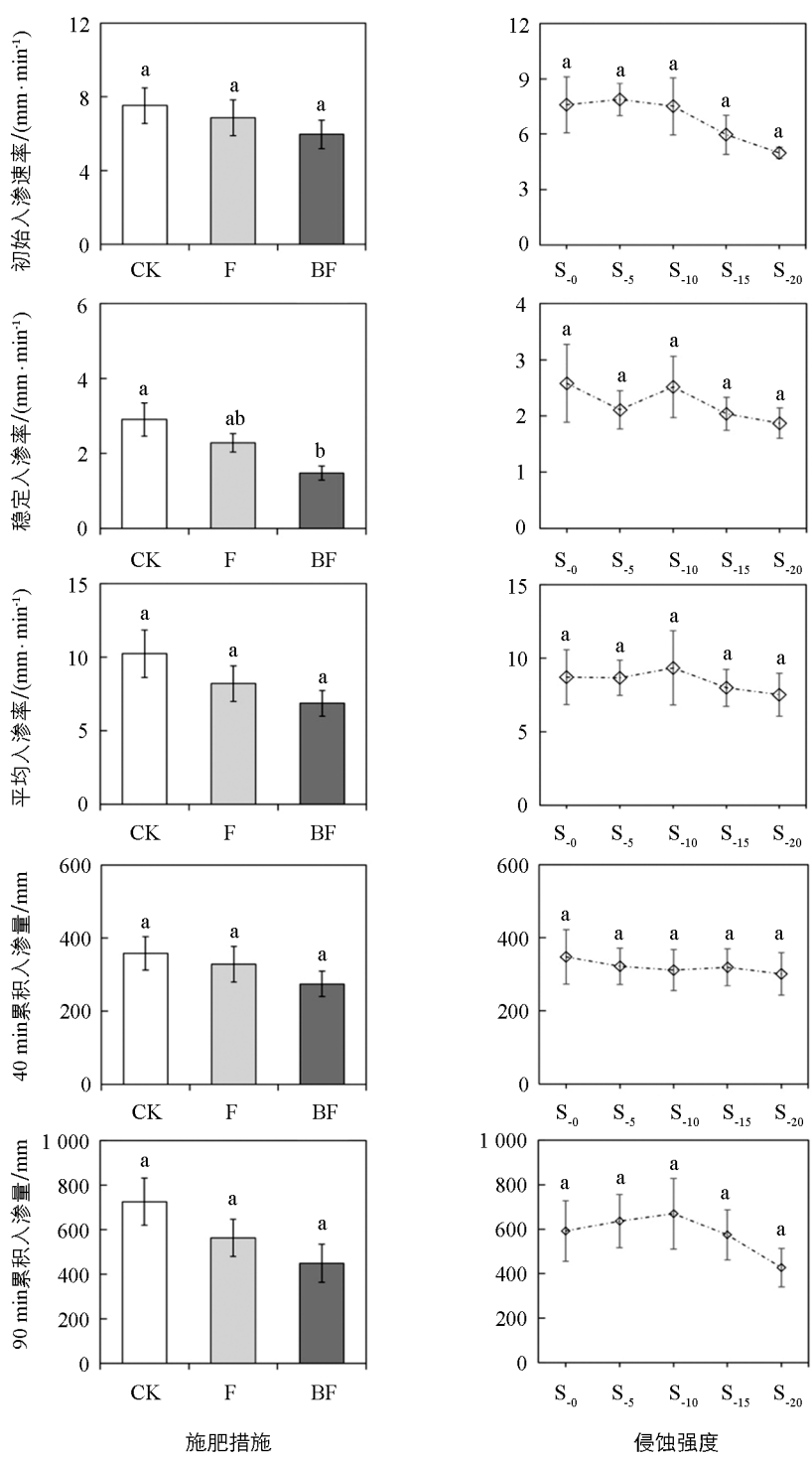


图 5 施肥措施与侵蚀强度对耕层水分入渗的影响

2.5 施肥措施与侵蚀强度下耕层物理性能与水分入渗特征的冗余分析

以耕层物理性能与水分入渗特征为物种因子,对不同施肥措施与侵蚀强度作冗余分析,进一步揭示作用因子的影响以及各指标间的相互作用.结果显示,轴 1(54.92%)与轴 2(12.14%)共解释关系总变异的 67.06%,说明排序效果良好.主成分 1 将侵蚀强度 ≥ 15 的样本划分至一、二象限,而侵蚀强度 < 15 主要划至三、四象限.同时,通过蒙特卡罗 p 值检验发现, BF, S₋₂₀, F, CK, S₋₁₅ 是引起耕层物理性能与水分入渗特征发生变化的主要因素($p < 0.05$).与侵蚀强度相比,不同施肥措施对各因子的作用更为显著,3 种施肥措施对各因子影响均有统计学意义,从大到小依次为: BF, B, CK;而不同侵蚀强度下仅 S₋₂₀ 与 S₋₁₅

影响显著, 且影响水平随侵蚀强度的增大而增大. 除此之外, 各环境因子对总变异的解释度与贡献度占比也以施肥措施更高, 施肥措施总解释度与贡献度分别为 60.3% 与 80.2%, 而侵蚀强度仅为 22.8% 与 30.3%, 其中 BF 的解释度(35.9%)与贡献度(47.8%)占比最高(表 4).

表 4 施肥措施与侵蚀强度作用因子重要性排序

处理	解释度/%	贡献度/%	近似 F 检验	p 值
BF	35.9	47.8	7.3	0.004
S ₋₂₀	14.9	19.8	3.6	0.030
F	12.2	16.2	3.6	0.014
CK	12.2	16.2	3.6	0.030
S ₋₁₅	7.9	10.5	2.7	0.048

图 6 进一步揭示了耕层物理性能与水分入渗特征之间的关系: 总孔隙度、毛管孔隙度以及水分特征(饱和含水量、田间持水量、土壤自然含水率)和土壤砂粒、粉粒均呈高度正相关, 但与黏粒、耕层容质量呈现负相关; 耕层容质量与黏粒之间存在正相关关系, 同时对水分入渗特征也有积极作用, 作用水平从高到低依次为: 黏粒、40 min 累积入渗量/平均入渗率、稳定入渗率、90 min 累积入渗总量、初始入渗率.

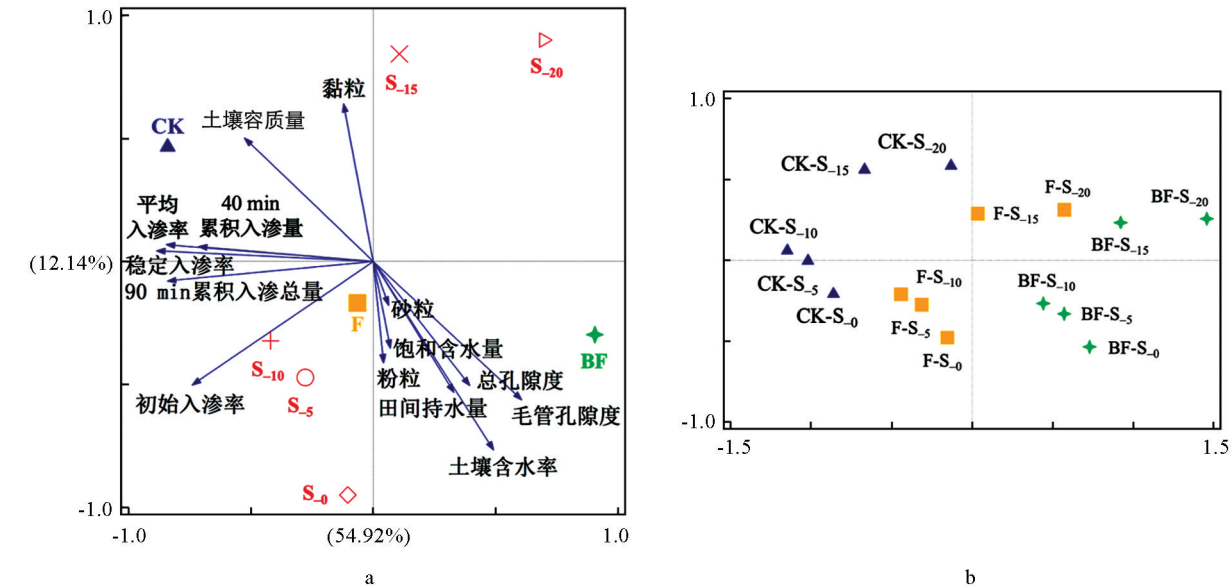


图 6 施肥措施与侵蚀强度下耕层物理性能与水分入渗特征的冗余分析

3 讨论

3.1 生物炭与化肥配施对紫色土坡耕地侵蚀性耕层物理性能的影响

土壤物理性质的变化直观显示土壤质地与结构状态^[20]. 土壤容质量综合反映土壤紧实度与总孔隙度的水平, 对土壤透气性、持水性以及入渗性能都有较大的影响^[21]. 土壤容质量较小时, 土壤疏松多孔, 土体结构趋于良好^[22]; 相反地, 土壤容质量较大时, 土壤偏于板结, 孔隙度减小, 水分渗透性能减弱^[23]. 随着侵蚀强度的增强, 耕层土壤粉粒占比下降, 黏粒上升, 说明耕层土壤质地逐步加重, 土壤容质量升高, 孔隙度降低, 导致土壤自然含水率显著下降(图 2 至图 4). 研究表明, 合理施肥与耕作可以有效降低土壤容质量和提升孔隙度^[24-25]. 本试验结果发现, 生物炭与化肥配施下土壤粉粒占比最高, 土壤容质量显著下降, 毛管孔隙度显著提升(图 3), 这是由于生物炭具有发达的孔隙且密度较低, 施入土壤后在生物炭颗粒与土壤团聚体之间形成孔隙, 使黏粒分散度提高, 起到了降低土体密度的同时又增加土壤孔隙比例的改良效果^[26]. 同时, 我们发现肥料的输入显著改善了土壤自然含水率, 而生物炭的添加进一步加强了这一效应

(图 4). 一方面, 养分的输入丰富了土壤有机质, 有机质通过改善土壤孔隙尺度和分布, 增强土壤团聚性, 提高了土壤结构稳定性, 使土壤蓄水保水能力提升^[24,27-28]; 另一方面, 生物炭比表面积巨大、孔隙繁多的结构特点使其本身对水分具有较高的亲水性与吸附性, 在掺入土壤后提高了土壤颗粒分子间作用力, 使流经土壤的水分子更易被静电力吸引, 进一步使更多水分贮存于土壤^[29-30].

3.2 生物炭与化肥配施对紫色土坡耕地侵蚀性耕层水分入渗的影响

生物炭与化肥配施并未对耕层土壤水分入渗起到进一步的促进作用. 结果表明, 与不施肥措施相比, 生物炭与化肥配施显著降低了耕层土壤水分稳定入渗率, 并且初始入渗率、平均入渗率、40 min 累积入渗量与 90 min 累积入渗总量也呈现下降趋势(图 5). 依据生物炭的物理特性, 生物炭施入后虽然增加了土壤的小孔隙, 但因其颗粒较细, 一定程度上会堵塞土体中较大孔隙的连接通道, 使可供水分流动和相互连通的孔隙减少, 水流弯曲度增加, 土壤入渗性能减弱^[30]; 在化学性质上, 生物炭表面附有丰富的含氧官能团, 其所带的负电荷和复杂孔隙结构会吸附和固定多种无机离子及其他极性或非极性有机化合物, 结合并形成有机-无机复合物和团聚体^[8], 在降低土壤大孔隙的同时加强土体吸水性, 土壤水分吸持力越强, 导水能力越弱, 从而抑制耕层水分运移^[32]. RDA 中土壤水分指标(饱和导水率、田间持水量、自然含水率)与水分入渗特征的负相关关系(图 6a)也进一步证明了这一规律, 这与人研究相近^[3,8].

3.3 施肥及侵蚀强度对紫色土坡耕地耕层的综合作用

RDA 结果揭示了不同施肥措施与侵蚀强度对土壤物理指标与水分入渗特征的综合作用. 结果表明, 在不同侵蚀强度下, S_{-20} , S_{-15} 是引起土壤物理指标与水分入渗特征发生变化的主要因素($p < 0.05$, 表 4), 主要表现为除对土壤容质量与黏粒指标呈现正相关关系外, 对其他指标均为负作用, 这与 S_{-0} , S_{-5} , S_{-10} 的作用方向截然相反(图 6a). 这说明 15 cm 土层侵蚀深度是本研究区土壤承受阈值, 即随着侵蚀强度的增大, 土壤受干扰程度加剧, 此时并未造成明显的土壤退化, 反而在一定程度上促进了土壤孔隙度、水分含量以及入渗性能的提升, 但当地表土壤剥离厚度达 15 cm 时, 土壤侵蚀的破坏力显示出来. 土壤侵蚀的加剧破坏了原有的土体结构, 使土壤质地加重, 孔隙度降低, 土壤通气性与透水性减弱, 造成土壤持水性与入渗性能的下降, RDA 的分区结果也进一步证实了该结论, 即样本以侵蚀强度 15 cm 为标准被划分至不同象限(图 6b). 在不同施肥管理中, 3 种措施均达到显著水平, 数据结果从高到低依次为: 生物炭配施化肥、化肥、不施肥, 说明相较于土壤侵蚀, 施肥措施对研究区土壤环境的变化起到更为主导的作用, 且以生物炭与化肥配施措施作用强度最大.

3.4 施肥措施与侵蚀强度下紫色土坡耕地耕层的入渗模型模拟分析

本研究通过 3 种经典入渗模型模拟不同施肥措施与侵蚀强度下土壤水分的入渗规律, 结果发现, 在不同施肥措施下 3 种模型拟合度均达到 0.800 以上(表 2), 与 Horton 模型相比, 虽然 Philip 模型拟合度相对较低, 但该模型的拟合结果能更好地反映 3 种施肥措施下稳定入渗率的实际水平, 拟合结果精度相对更高. Kostiakov 模型基于 3 种施肥措施的平均拟合度最高, 但依据公式分析可得, 当时间接近无穷大时, 入渗速率趋近于 0, 这并不符合实际垂直入渗下的土壤水动力学规律, 即在垂直入渗条件下, 最终入渗速率不可能为 0^[18]. 因此, Philip 模型用于模拟本研究区不同施肥措施下土壤入渗过程效果最佳. 然而, 不同侵蚀强度下的最佳拟合模型并不一致. 对比 Horton 模型与 Philip 模型对不同侵蚀强度下稳定入渗率的拟合值, 并结合拟合度 R^2 值发现, S_{-0} , S_{-5} , S_{-10} , S_{-15} 均以 Horton 模型结果更接近实测值, S_{-20} 则以 Philip 模型拟合结果更佳, 说明在土壤低侵蚀强度下, Horton 模型能够较好地反映土壤入渗过程, 但随着土壤侵蚀强度的加剧, 需对模型进行调整才可更好适应, 因此以 Philip 模型拟合效果更佳.

4 结论

1) 与不施肥措施相比, 生物炭与化肥配施显著降低了耕层容质量, 增大了毛管孔隙度, 提高了土壤自

然含水率. 随着侵蚀强度的增强, 土壤容质量总体呈现上升趋势, 表现为 $S_{-0}, S_{-5} < S_{-20} < S_{-15}, S_{-10}$, 而总孔隙度恰好相反, 自然含水率逐步降低, 表现为 $S_{-0} > S_{-5} > S_{-10} > S_{-15} > S_{-20}$. 坡耕地耕层土壤稳定入渗率对施肥措施响应显著, 从高到低依次为: CK, F, BF.

2) Kostiakov, Horton 和 Philip 3 种入渗模型对不同施肥措施拟合度均达到 0.800 以上, 其中以 Philip 模型拟合结果更精确; 在不同侵蚀强度下, 土壤低侵蚀强度 ($S_{-0}, S_{-5}, S_{-10}, S_{-15}$) 以 Horton 模型能更好地反映入渗过程, 但随着土壤侵蚀强度的加剧 (S_{-20}), 以 Philip 模型拟合效果更佳.

3) 根据 RDA 作用因子重要性排序结果显示, 在不同施肥与侵蚀强度下, 生物炭与化肥配施、土壤侵蚀厚度 20 cm 是引起耕层土壤物理性能与水分入渗特征发生变化的最主要因素. 与侵蚀强度相比, 施肥措施对各因子的作用更为显著. 耕层土壤总孔隙、毛管孔隙、饱和含水量、田间持水量以及自然含水率与砂粒、粉粒呈正相关, 与黏粒、容质量呈负相关; 土壤容质量与黏粒、土壤水分入渗特征呈正相关. 此外, 主成分 1 将侵蚀强度 ≥ 15 cm 与 < 15 cm 的样本划分至不同象限, 说明 15 cm 侵蚀厚度是本研究区土壤承受阈值.

参考文献:

- [1] 吕刚, 史东梅. 三峡库区紫色土土壤水分入渗特性研究 [J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(6): 87-90.
- [2] 宋稳锋, 王志远, 吴心瑶, 等. 不同保水剂及覆盖材料对西南旱作农田土壤特性和油菜生长的影响 [J]. 西南大学学报 (自然科学版), 2023, 45(3): 88-99.
- [3] 孙宁婷, 王小燕, 周豪, 等. 生物炭种类与混施深度对紫色土水分运移和氮磷流失的影响 [J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 722-732.
- [4] 夏春华, 李阳兵, 曾晨岑, 等. 三峡库区坡耕地利用转型及其社会经济-生态环境影响——以奉节县为例 [J]. 生态学报, 2023, 43(7): 2688-2702.
- [5] RAZZAGHI F, OBOUR P B, ARTHUR E. Does Biochar Improve Soil Water Retention? A Systematic Review and Meta-Analysis [J]. Geoderma, 2020, 361: 114055.
- [6] 聂小飞, 姚成慧. 生物炭对坡耕地水土流失的影响研究进展 [J]. 水土保持应用技术, 2021(6): 23-26.
- [7] 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.
- [8] 王丹丹, 郑纪勇, 颜永毫, 等. 生物炭对宁南山区土壤持水性能影响的定位研究 [J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 101-104, 109.
- [9] LAIRD D A, FLEMING P, DAVIS D D, et al. Impact of Biochar Amendments on the Quality of a Typical Midwestern Agricultural Soil [J]. Geoderma, 2010, 158(3/4): 443-449.
- [10] SOINNE H, HOVI J, TAMMEORG P, et al. Effect of Biochar on Phosphorus Sorption and Clay Soil Aggregate Stability [J]. Geoderma, 2014, 219: 162-167.
- [11] 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.
- [12] GARCIA-PEREZ T, PELAEZ-SAMANIEGO M R, DELGADO-NOBOA J, et al. Combined Effect of Biochar and Fertilizers on Andean Highland Soils before and after Cropping [J]. Sustainability, 2022, 14(14): 8912.
- [13] 勾芒芒, 屈忠义. 生物炭与化肥互作对土壤含水率与番茄产量的影响 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 283-288.
- [14] LI Z G, GU C M, ZHANG R H, et al. The Benefic Effect Induced by Biochar on Soil Erosion and Nutrient Loss of Sloping Land under Natural Rainfall Conditions in Central China [J]. Agricultural Water Management, 2017, 185: 145-150.
- [15] 陈磊, 张科利, 李业桐, 等. 喀斯特坡耕地块石出露对土壤水分入渗的影响 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 111-118.
- [16] 刘洁, 李贤伟, 纪中华, 等. 元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性 [J]. 生态学报, 2011, 31(8): 145-150.

2331-2340.

[17] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法 [M]. 北京: 科学出版社, 1978.

[18] 娄义宝, 史东梅, 江娜, 等. 土壤侵蚀对坡耕地土壤水分及入渗特性影响 [J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1399-1410.

[19] 李天阳, 何丙辉, 田家乐, 等. 重庆璧山 5 种典型农林混作模式土壤理化性质及水分入渗特性 [J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 103-108, 200.

[20] 金梁, 魏丹, 李玉梅, 等. 生物炭与化肥配施对土壤主要物理特性的影响 [J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(4): 424-430.

[21] 齐瑞鹏, 张磊, 颜永毫, 等. 定容质量条件下生物炭对半干旱区土壤水分入渗特征的影响 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2281-2288.

[22] 李建兴, 何丙辉, 黄欢, 等. 不同保水剂及覆盖材料对西南旱作农田土壤特性和油菜生长的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(05): 159-164.

[23] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容质量对土壤水分入渗能力影响模拟试验 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 40-45.

[24] 魏俊岭, 金友前, 郜红建, 等. 施肥措施对砂姜黑土水分入渗性能的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 965-971.

[25] 张健乐, 曾小英, 史东梅, 等. 生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响 [J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2209-2218.

[26] 王睿垠, 魏永霞, 刘慧, 等. 生物炭对东北草甸黑土水分运动参数的影响 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 186-194.

[27] 吕思扬, 宋思意, 黎蕴洁, 等. 氮添加和凋落物增减对华西雨屏区常绿阔叶林土壤团聚体及其碳氮的影响 [J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 277-287.

[28] 曾凤铃, 邹玉霞, 张卫华, 等. 生物炭用量与粒径对紫色土水分入渗及再分布特征的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(12): 136-144.

[29] ATKINSON C J, FITZGERALD J D, HIPPS N A. Potential Mechanisms for Achieving Agricultural Benefits from Biochar Application to Temperate Soils: A Review [J]. Plant and Soil, 2010, 337(1): 1-18.

[30] IBRAHIM H M, AL-WABEL M I, USMAN A R A, et al. Effect of Conocarpus Biochar Application on the Hydraulic Properties of a Sandy Loam Soil [J]. Soil Science, 2013, 178(4): 165-173.

[31] 解倩, 王丽梅, 齐瑞鹏, 等. 生物炭对黄绵土水分入渗和持水性能的影响 [J]. 地球环境学报, 2016, 7(1): 65-76, 86.

[32] 李帅霖, 王霞, 王朔, 等. 生物炭施用方式及用量对土壤水分入渗与蒸发的影响 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 135-144.

[33] ZHANG J L, SHI D M, JIN H F, et al. Characteristics of Cultivated Layer Soil Shear Strength for Sloping Farmland in Response to Soil Erosion in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. Catena, 2022, 215: 106304.

责任编辑 包颖