

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.01.019

CSTR:32310.14.stbxb.2025.01.019

刘兵,刘煜,郝卓,等.自然降雨下紫色土坡耕地碳源添加对碳迁移及固碳的影响机制[J].水土保持学报,2025,39(1):

LIU Bing, LIU Yu, HAO Zhuo, et al. Mechanisms of the effects of carbon source addition on carbon transport and sequestration in purple soil sloping farmland under natural rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1):

自然降雨下紫色土坡耕地碳源添加对碳迁移及固碳的影响机制

刘兵^{1,2}, 刘煜², 郝卓², 展晓莹², 张晴雯²,
杨洋¹, 陈红琳³, 陈尚洪³, 刘定辉³

(1.河北建筑工程学院市政与环境工程系,河北张家口075000;

2.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京100081; 3.四川省农业科学院农业资源与环境研究所,成都610066)

摘要: [目的]紫色土土壤退化形势严峻,水体流失严重,土壤增碳固碳困难,为探究碳源添加对紫色土坡耕地碳固存的影响。[方法]以四川紫色土坡耕地为对象,在10°紫色土坡耕地设置不施肥(CK)、化肥+秸秆还田(T1)、化肥+秸秆生物炭(T2)、化肥+牛粪(T3)、化肥+有机改土基质(T4)、化肥+生物炭牛粪菇渣堆肥(T5)6种处理,每种处理重复3次。分析降雨量及不同碳源处理下径流、泥沙、碳质量分数的变化特征。[结果]1)降雨量>30 mm,短时强降雨(16.1 mm/h)可促使地表径流的产出。碳源添加可显著减少地表径流量($p<0.05$),与CK相比,T2、T3、T5减流效益分别达到38.64%、38.61%、62.95%。不同处理产沙量为T1>T4>CK>T2>T3>T5,最高较CK降低58.99%。2)地表径流有机碳流失主要以泥沙有机碳为主,占比为67.47%~90.43%。T2、T3、T5可有效减少有机碳迁移,较CK处理有机碳损失总量分别减少21.74%、19.40%、49.28%。T5处理可溶性有机碳(DOC)、可溶性无机碳(DIC)、可溶性总碳(DTC)、泥沙有机碳迁移通量较CK分别减少70.88%、70.92%、37.52%、60.07%。3)PLS-PM表明,降雨是碳迁移的主要驱动因子,降雨特征、土壤理化性质、不同碳源添加均不同程度地影响土壤有机碳固存。[结论]碳源添加(T2、T3、T5)使有机碳损失总量减少。T5处理有机碳固存量提升,T2和T3减少地表径流各碳组分的流失,而其有机碳固存量减少。表明碳源添加可提升碳质量分数,减少碳迁移,但固存量却减少,需长期试验来验证。研究结果对提升紫色土土壤肥力、维持土壤碳平衡和缓解土壤碳迁移具有重要意义。

关键词: 自然降雨; 紫色土坡耕地; 地表径流; 碳迁移; 有机碳固存

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242-(2025)01-0000-00

Mechanisms of the Effects of Carbon Source Addition on Carbon Transport and Sequestration in Purple Soil Sloping Farmland under Natural Rainfall

LIU Bing^{1,2}, LIU Yu², HAO Zhuo², ZHAN Xiaoying², ZHANG Qingwen²,

YANG Yang¹, CHEN Honglin³, CHEN Shanghong³, LIU Dinghui³

(1. Department of Municipal and Environmental Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou, Hebei 075000, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Institute of Agricultural Resources and Environment, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China)

Abstract: [Objective] Degradation of purple soil and water loss is serious, and it is difficult to increase and sequester carbon in the soil. The aim of the study was to explore the impact of carbon source addition on carbon sequestration of purple soil sloping farmland. [Methods] Purple soil sloping farmland in Sichuan Province was selected as the research object. Six treatments were set up on 10° purple soil slopes, including no fertilization (CK), fertilizer+straw returning (T1), fertilizer+straw biochar (T2), fertilizer+cow dung (T3), fertilizer+organic soil matrix (T4), fertilizer+biochar cow dung and mushroom slag compost (T5),

收稿日期:2024-07-02 修回日期:2024-09-26 录用日期:2024-10-19 网络首发日期(www.cnki.net):

资助项目:国家重点研发计划项目(2022YFD1901401);国家自然科学基金项目(42107083)

第一作者:刘兵(1998—),男,硕士研究生,主要从事紫色土流域碳的水文过程研究。E-mail:liu11111b000@163.com

通信作者:郝卓(1990—),女,博士,助理研究员,主要从事流域碳-氮-水耦合过程与机制研究。E-mail:haozhuo@caas.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

and each treatment was repeated three times. The change characteristics of runoff, sediment and carbon content under rainfall and different carbon sources were analyzed. [Results] 1) Rainfall >30 mm and short-term heavy rainfall (16.1 mm/h) could lead to surface runoff. The addition of carbon sources notably decreased surface runoff. In comparison with CK, the runoff reduction benefits of T2, T3, and T5 reached 38.64%, 38.61%, and 62.95%, respectively. The sediment erosion in different treatments was observed to follow the order of T1>T4>CK>T2>T3>T5, with the highest reduction being 58.99% compared to CK. 2) The loss of organic carbon through surface runoff was primarily attributed to sediment organic carbon, which accounted for 67.47%~90.43% of the total organic carbon loss. T2, T3, and T5 were effective in reducing the transport of organic carbon, resulting in a total organic carbon loss reduction of 21.74%, 19.40%, and 49.28%, respectively, compared to CK. Furthermore, the carbon fractions of T5, including dissolved organic carbon (DOC), dissolved inorganic carbon (DIC), dissolved total carbon (DTC), and sediment organic carbon, exhibited a reduction in transport fluxes by 70.88%, 70.92%, 37.52%, and 60.07%, respectively, compared to CK. 3) PLS-PM showed that the carbon sequestration of soil organic carbon was influenced to varying degrees by rainfall characteristics, soil physicochemical properties, and the addition of different carbon sources. [Conclusion] Carbon source addition (T2, T3, T5) can reduce the total amount of organic carbon loss. T5 can increase organic carbon sequestration; T2 and T3 can reduce the loss of each carbon component of surface runoff, but also reduce organic carbon sequestration. Addition of carbon source can increase carbon content and reduce carbon transport, but reduce carbon sequestration. The results need to be verified by long-term experiments. This study is of significant importance for enhancing the fertility of purple soil, maintaining soil carbon balance, and reducing soil carbon loss.

Keywords: natural rainfall; purple soil slope; surface runoff; carbon transport; organic carbon sequestration

Received: 2024-07-02

Revised: 2024-09-26

Accepted: 2024-10-19

Online(www.cnki.net):

土壤碳库是大气碳库的 3.3 倍,是生物碳库的 4.5 倍^[1]。农田土壤碳库是土壤碳输入和输出动态平衡的结果,碳(C)迁移破坏土壤团聚结构,同时一定程度上促进其他养分流失,降低生产力,限制农业可持续发展^[2-4]。并且碳的迁移过程加剧农药、重金属的络合和吸附作用^[5],以可溶性碳形式随径流进入水体后对环境产生负面影响^[5-6]。紫色土有机质质量分数低,且化肥施用量大,降水集中,极易产生地表径流,易造成耕地质量下降和环境污染^[7]。因此,减少紫色土坡地碳迁移对于耕地可持续发展具有重要意义。诸多研究^[8-10]表明,地表径流驱动下碳迁移规律主要受降雨特征、土壤性质、碳源添加等多种因素影响,其中,碳源类型与添加量、降雨径流量和泥沙量是主要影响因素。施肥是改良土壤结构、提高土壤肥力和减少碳迁移的重要途径^[11]。熊子怡等^[2]研究表明,85%优化施肥配施秸秆能显著降低紫色土坡耕地地表径流量和泥沙量,还能有效降低土壤有机碳的迁移。但在对生物炭还田能否减少水土和土壤碳流失持不同看法,雨强较大时,施用生物炭加剧水土流失和养分迁移^[12];范亚琳等^[13]研究发现,生物炭配施化肥与单施化肥相比,有机碳阻控效果不显著,且生物

炭配施化肥泥沙有机碳迁移量最多。降雨特征对径流泥沙、碳迁移也有较大的影响。大雨强下土壤颗粒易被破坏,阻塞土壤孔隙,导致土壤渗透能力降低,使得坡面径流增强,径流量和泥沙流失量开始增加^[14]。肖胜生等^[15]通过野外径流小区降雨发现,降雨强度越大,溶解于径流的有机碳和泥沙携带的有机碳总量也越大;何淑勤等^[16]研究发现,地表径流养分迁移随降雨强度的增大而显著增加。

目前,关于紫色土坡耕地碳迁移规律的研究主要集中在有机碳随径流及泥沙的流失特征,同时碳源处理单一,多以秸秆、有机肥为主,而秸秆还田分解缓慢,使土壤通透性和水热交换能力变差,造成作物产量下降,有机肥又存在有机质提升难、固碳难、易造成重金属污染等^[12]缺点。且当前主要是在模拟降雨条件下进行,在自然降雨下新型碳基材料添加对碳组分迁移及有机碳固存的研究较少。因此,依托四川省农业科学院中江仓山综合试验示范基地,以紫色土旱坡地为研究对象,在自然降雨条件下,通过观测不同碳源(秸秆源、动物源、植物源)添加对紫色土坡地产流产沙和不同碳组分迁移特征变化,探讨适合紫色土坡地碳固存管理方式,以期为提高紫色土坡地土壤肥力

和减少土壤有机碳流失提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

选取四川省农业科学院中江仓山综合试验示范基地为研究区,该区年平均气温 16.7 °C,年平均降水量 882 mm。旱地主要种植作物小麦、玉米、油菜。径流场修建于 2017 年,试验土壤为侏罗纪遂宁组母质发育的紫色土,土层厚度为 60 cm,经过长期耕作土壤有机质质量分数低,土壤颗粒较粗,质地砂壤,砂粒占 80.69%,粉粒占 17.46%,黏粒占 1.85%。抗侵蚀能力弱。0~20 cm 土层土壤有机碳、全氮、全磷、有效磷、速效钾质量分数分别为(7.43±0.27)、(1.06±0.13)、(0.92±0.08)、(3.03±0.55)、(0.21±0.03) g/kg,pH 为(8.19±0.11),体积质量为(1.58±0.04) g/cm³。

1.2 试验设计

各径流小区平行排列,投影面积为 16 m²(3.2 m×5 m),底面及四周均为混凝土修筑,出水口出设置汇流沟,各小区外均安装地表径流集水桶,集流桶旁设计添加分流桶,具体装置见图 1。种植模式为冬油菜-夏玉米轮作,玉米品种为“仲玉 3 号”,油菜品种为“德新油 49”,试验于玉米生长季进行,2023 年 5 月 17 日种

植,2023 年 9 月 20 日收获。试验各处理添加不同碳源有机肥和土壤改良材料,共设不施肥(CK)、化肥+秸秆粉碎还田(T1)、化肥+秸秆生物炭(T2)、化肥+牛粪有机肥(T3)、化肥+有机改土基质(T4)、化肥+生物炭牛粪菇渣堆肥(T5)6 个处理,每个处理 3 个重复,坡度为 10°。玉米季氮肥分 2 次施入,第 1 次在玉米种植时作为基肥施用(施用量是玉米季氮肥施用总量的 70%),第 2 次 7 月上旬作为追肥施用,磷肥和钾肥作为基肥 1 次性施用,有机肥均在玉米种植前均匀覆盖在地表,用翻耕机翻施进 0~20 cm 表层土壤,同一处理各小区施肥量和管理均相同。具体试验处理施肥量见表 1。

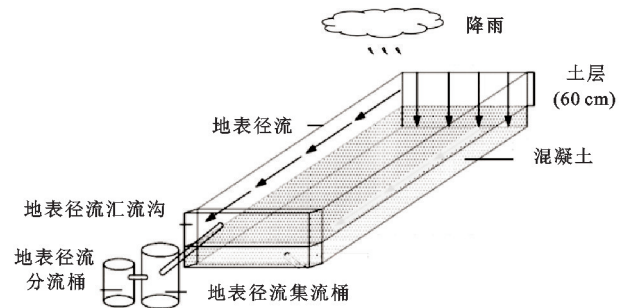


图 1 径流小区示意

Fig.1 Schematic diagram of the runoff plot

表 1 不同处理施肥量

Table 1 The amount of fertilizer applied in each treatment

作物	处理	有机肥/ (kg·hm ⁻²)	秸秆/生物炭/ (kg·hm ⁻²)	N/ (kg·hm ⁻²)	P ₂ O ₅ / (kg·hm ⁻²)	K ₂ O/ (kg·hm ⁻²)	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	说明	
玉米	T1	—	5 853.7	192	60	90	229.70	秸秆源(秸秆替代 20%化肥 N)	
	T2	—	6 611.6	192	60	90	216.93		
	T3	8 674.7	—	168	60	90	123.90		牛粪源(有机肥代 30%化肥 N)
	T4	7 128.7	—	168	60	90	200.06		植物源(有机肥代 30%化肥 N)
	T5	4 615.4	—	168	60	90	243.62		牛粪源+秸秆源(有机肥代 30%化肥 N)

注:牛粪肥含氮、P₂O₅、K₂O 分别为 0.83%、0.18%、0.55%;有机改土基质含氮、P₂O₅、K₂O 分别为 1.01%、1.21%、1.72%;生物炭基肥含氮、P₂O₅、K₂O 分别为 1.56%、2.16%、1.41%;生物炭含氮、P₂O₅、K₂O 分别为 0.73%、1.29%、2.08%;秸秆为部分还田,油菜秸秆含氮、P₂O₅、K₂O 分别为 0.82%、0.32%、2.24%;玉米秸秆含氮、P₂O₅、K₂O 分别为 0.96%、0.30%、2.69%。化肥采用单质肥料,尿素(美丰尿素 46%)、过磷酸钙(万福磷肥 12%)、钾肥(加拿大或俄罗斯红粒钾肥 60%)。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土样采集测定 玉米种植前进行基础土样采集,监测期内玉米生育期有机碳质量分数变化大,通过采集玉米各生育期 0~20 cm 土层土壤为代表性土壤,作为该月的土壤有机碳质量分数背景值,玉米收获后取样。采用梅花形多点取样法取 0~20 cm 表层土,四分法混合装入自封袋,带回实验室。土壤样品自然风干,按分析要求研磨过 20 目和 100 目筛,用于测定土壤有机碳(SOC)质量分数和基本理化性质。SOC 采用干烧法(multiN/C2 100 S)测定,土壤基本理化指标的测定方法见《土壤农化分析与环境监测》。

1.3.2 水样和泥沙样采集测定 每次降雨对雨水进

行收集,降雨产流后进行采样。采样时,测定各处理集流桶和分流桶水位,计算地表径流产流量。径流桶中水样与泥沙搅拌均匀,装入 500 mL 聚乙烯瓶。径流桶中泥沙沉淀后采样用于 SOC 测定。水样过 0.45 μm 滤膜,用总有机碳分析仪(liquiTOCII,德国)测定可溶性总碳(DTC)、可溶性有机碳(DOC)、可溶性无机碳(DIC)。滤膜放入铝盒内烘干称重,计算泥沙量。

1.4 数据处理与分析

径流小区碳湿沉降通量计算公式^[17]为:

$$F = \frac{P \times c}{10^6} \quad (1)$$

式中:F 为沉降通量,mg/m²;P 为降雨量,mm;c 为

雨水中各碳组分浓度, mg/L。

径流样品中测定的碳组分质量浓度及迁移通量均为 3 个小区平均值, 迁移通量计算公式^[18]为:

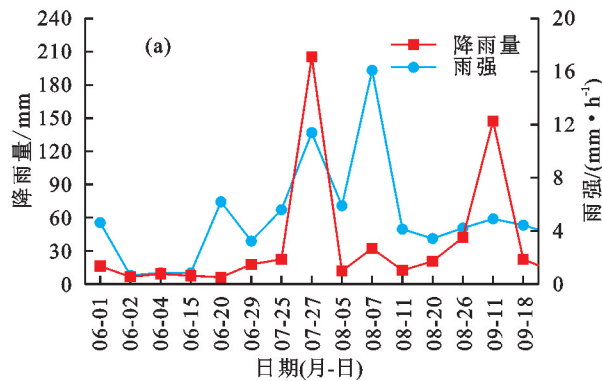
$$Q = C_i \times q \quad (2)$$

式中: Q 为次降雨事件产流中各形态碳迁移通量, mg/m^2 ; C_i 为径流碳 DIC、DOC、DTC 浓度, mg/L ; q 为径流单位面积径流量, L/m^2 。

泥沙中有机碳富集比。监测期间, 每月表层土 SOC 质量分数作为该月 SOC 质量分数背景值。降雨产流后泥沙中有机碳质量分数除以 SOC 质量分数背景值为泥沙有机碳富集比^[19]。

碳流失模数。各小区有机碳流失总量(径流中有机碳+泥沙中有机碳)除以小区面积转换为单位面积有机碳流失量, 为碳流失模数^[17], g/m^2 。

采用 SPSS 25.0、Origin 2022 和 Excel 2016 软件进行数据处理和图表绘制。结果用 3 次测定平均值表示。不同处理间的多重比较采用 LSD 最小显著差数法 ($p < 0.05$), 采用偏最小二乘法路径模型(PLS-PM)来模拟降雨特征、土壤理化性质、碳流失通量和碳储量间的关系, 模型



中的路径系数和 R^2 由 R4.2.2 的 PLS-PM 软件包计算。

2 结果与分析

2.1 自然降雨下多碳源添加的产流产沙特征

2.1.1 降雨特征与碳沉降通量 由图 2 可知, 研究区玉米生长季共产生 15 场降雨, 其中, 11 场降雨在降雨量 25 mm 以下(中雨以下级别), 均未产流。降雨量在 30 mm 以上的 4 场降雨分别为 7 月 27 日、8 月 7 日、8 月 26 日和 9 月 11 日, 均产生地表径流。4 场降雨最大降雨事件发生在 7 月 27 日, 降雨量 205.2 mm, 降雨历时达 1 080 min, 雨强 11.4 mm/h, 最小降雨事件为 8 月 7 日, 降雨量 32.2 mm, 降雨历时仅 120 min, 雨强达 16.1 mm/h。8 月 26 日和 9 月 11 日 2 场均为长历时弱降雨事件, 降雨量和雨强依次为 42.2、147.4 mm 和 4.22、4.91 mm/h。参考气象部门降水强度等级划分, 大雨以上(30 mm)或雨强(16.1 mm/h)在短时间内达到一定级别均可产流。4 场降雨 DIC、DOC、DTC 浓度分别为 1.87~2.04、1.73~2.28、3.65~4.32 mg/L 。DIC、DOC、DTC 碳沉降总通量分别为 823.19、812.62、1 635.80 mg/m^2 , 均随降雨量的增加而增加。

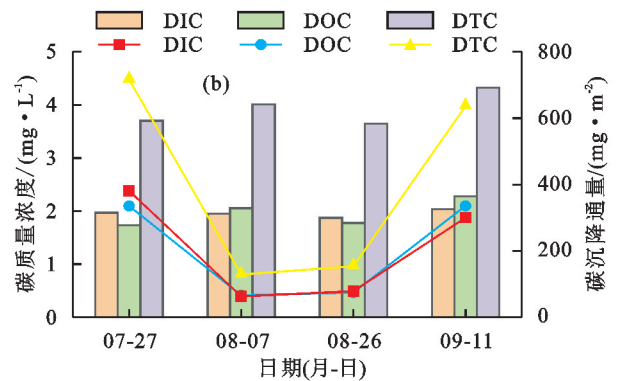


图 2 降雨特征和碳沉降变化

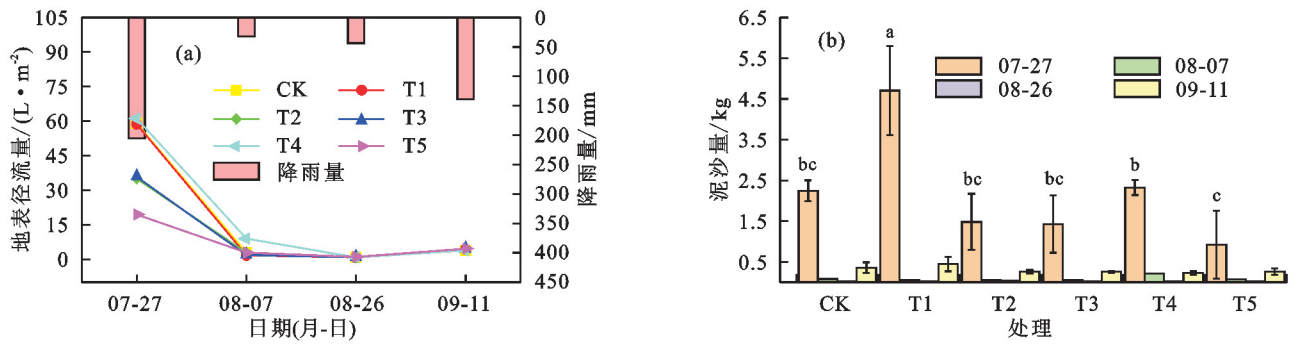
Fig.2 Rainfall characteristics and changes of carbon deposition

2.1.2 多碳源添加处理产流产沙特征 由图 3 可知, 监测期间共产生 4 次地表径流, 1 次大暴雨, 1 次暴雨, 2 次大雨。在同一碳源处理下, 总径流量随降雨量的增大而增加。施加有机肥可明显减少地表径流量, 与 CK 相比, T3、T2、T5 减流效益分别达到 38.61%、38.64%、62.95%, 不同处理径流量大小为 $T4 > CK > T1 > T3 > T2 > T5$ 。泥沙流失量表现为降雨量和雨强越大, 泥沙流失量越多。不同处理产沙量大小为 $T1 > T4 > CK > T2 > T3 > T5$, 各施肥处理产沙量均显著低于 T1 ($p < 0.05$), 其中, T5 处理坡地产沙量最少, 减沙效益较 CK 降低 58.99%。

2.2 多碳源添加碳的迁移特征

各处理碳组分迁移通量均在 7 月 27 日达到峰值, 除 T5 处理外, 7 月 27 日碳迁移通量均与另外 3 次降雨差异显著 ($p < 0.05$)。由图 4a 表明, 不同处理历次产

流事件中地表径流 DOC 平均浓度为 $(2.31 \pm 0.87) \sim (4.06 \pm 2.45) \text{ mg}/\text{L}$ 。T5 处理 DOC 迁移通量显著低于其他处理, 较 CK 减少 70.88%。由图 4b 可知, T4 处理 DIC 平均浓度最大, 为 $(10.90 \pm 6.95) \text{ mg}/\text{L}$, 且显著高于 CK ($p < 0.05$)。DIC 迁移通量表现为 $T5 < T2 < CK < T3 < T4 < T1$, T1 处理显著高于其他处理 ($p < 0.05$), T5 迁移通量最小, 相较于 CK 减少 70.92%。各处理 DTC 平均流失浓度为 $(8.35 \pm 1.82) \sim (10.50 \pm 2.71) \text{ mg}/\text{L}$, 处理间无显著性差异。T1 处理迁移通量最大, 为 613.18 mg/m^2 , 与其他处理差异性显著 ($p < 0.05$) (图 4c)。与 T1 相比, T2、T5 处理分别减少 54.55%、84.61%, 较 CK 分别减少 7.5%、37.52%。图 4d 为泥沙有机碳迁移变化, 迁移通量表现为 $T5 < T2 < T3 < CK < T4 < T1$, T1 与其他处理呈显著性差异 ($p < 0.05$), T5 处理流迁移通量最少, 较 CK 处理减少 60.07%。



注:不同小写字母表示同一场降雨下泥沙流失量差异显著($p < 0.05$)。

图 3 不同处理地表径流产流产沙量变化

Fig.3 Changes in sediment production from surface runoff under different treatments

2.3 多碳源添加对固碳的影响因素

2.3.1 多碳源添加对土壤有机碳和体积质量的影响

由图 5a 可知,从播种前到苗期,受碳源输入影响,除 T1 外土壤有机碳均得到提升,从大喇叭口到吐丝期,受雨季影响,碳流失导致有机碳质量分数下降,为 6.34~9.05 g/kg。收获期,T1、T4、T5 较 CK 处理土壤有机碳质量分数分别提升 18.48%、11.31%、15.45%。由图 5b 可以看出,碳源输入可对 0~20 cm 土层土壤体积质量产生明显影响。从播种前到苗期,受翻耕影响,土壤体积质量迅速下降,T2、T5 处理下降率为 5.77%~7.73%,低于 CK 的 9.59%,T4 下降 12.86%。到玉米吐丝期,受雨季影响,土壤体积质量上升,此时除 T2 处理,其他处理体积质量较 CK 下降 3.69%~9.36%。到收获期,除 CK,T1 处理外,其他处理土壤体积质量均产生下降。

2.3.2 多碳源添加对碳形态的影响 由图 6a 可知,不同降雨条件下泥沙有机碳富集比变化趋势呈较大差异,CK、T1、T2、T3、T4、T5 沙有机碳富集比依次为 0.88~1.59、1.05~1.67、0.77~1.95、1.13~1.43、0.68~1.80、0.76~1.71,大雨强下(7 月 27 日)有机碳富集比排序为 T3>T1>CK>T2>T5>T4。由图 6b 可知,土壤有机碳流失主要以泥沙有机碳为主,各处理占比均在 65%以上,T1 处理与 T2、T3、T5 处理差异显著($p < 0.05$),其中 T5 处理有机碳损失总量最小,仅为 0.7 g/m²。

2.3.3 多碳源添加下碳储量的影响因素 PLS-PM 分析进一步探究不同碳源添加下降雨、土壤特性、碳迁移与碳储量间的作用关系(图 7)。CK、T1、T4、T5 处理泥沙碳迁移受降雨量影响显著($p < 0.001$),雨强仅对 CK、T5 径流碳影响显著($p < 0.05$)。碳源添加后,雨强均产生显著的负向影响($p < 0.01$)。同时各处理体积质量对碳迁移产生负向影响,其中,T1 处理径流碳迁移影响显著($p < 0.01$)。从碳储量来看,仅 T3 处理雨强呈显著负向影响($p < 0.05$)。各处理体积质量对碳储量均为正向影响,T2($p < 0.05$)、T3、T4、T5 影响显著($p < 0.01$)。

除 T2、T4 处理,各处理泥沙有机碳通量对碳储量呈负影响,T5 处理影响显著($p < 0.01$)。各处理径流碳通量均对碳储量呈正向影响。综上,降雨特征是碳迁移的主要驱动因子;碳源添加后,降雨特征、土壤特性、碳流失形态形成多因子共同驱动碳储量的变化。

3 讨论

3.1 自然降雨对土壤固碳的影响机制

监测期间共发生 15 场降雨,产生 4 次地表径流,均为大雨以上级别,表明降雨量和雨强对地表径流有显著影响^[20]。次降雨量不低于 24 mm 时,出现明显径流现象^[21],与本文研究结果相符。降雨量、雨强等降雨特征通过影响坡面产流、产沙,继而影响坡面土壤有机碳的迁移^[22]。7 月 27 日受台风“杜苏芮”影响,次降雨大且强,强降雨产生大量地表径流,土壤颗粒迁移导致泥沙量急剧增加^[23],径流和泥沙碳迁移通量达到峰值。雨水从表层土壤中淋溶吸附储存的 DOC,使得地表径流中 DOC 质量分数增加,7 月 27 日降雨又属高强度、长历时降雨,雨水稀释和土壤有机质的快速消耗使得有机碳质量分数降低^[15],各处理有机碳流失量达到峰值。另外,降雨持续,高雨强将进一步破碎次表层土壤结构,导致径流垂向迁移,使得地表径流中可溶性有机碳质量分数降低^[15]。而 9 月 11 日降雨雨量大,降雨历时长,雨强小,使得土壤团聚体分散程度较小,同时径流量小,冲刷能力低,径流和泥沙碳迁移量较小^[24]。土壤有机碳的选择性迁移与雨强相关,低雨强(8 月 26 日、9 月 11 日)表现出雨强、径流量越小,富集比越大的特点^[15]。因为形成的径流搬运富含有机碳的表层土壤颗粒,泥沙富集比变高。而在高雨强(8 月 7 日)的条件下,有机碳质量分数较低的深层粗质颗粒将被进一步破碎并搬运,影响侵蚀泥沙中有机碳的富集,使得泥沙有机碳富集比变低。同时,径流量和泥沙量常被认为是降雨强度的直接反映^[16],各处理泥沙有机碳富集比表明径流量和泥沙量的增加能够降低土壤有机碳迁移的选择性。安龙龙等^[25]对黄土研究表明,降雨强度越小,泥沙富集比越大,因

为相比强降雨,低强度的降雨对有机碳的选择性分解迁移更加明显,导致泥沙中有机碳的富集较大。除 CK、T1 和 T3 外,各碳组分质量浓度与降雨特征、径流量、泥沙量均呈负相关,可能是由于径流量增大后,

细颗粒土壤大部分已流失,粗颗粒沉积于土壤表面^[26],可供溶解的碳减少,导致径流量增大,质量浓度反而减小。综上,径流和泥沙碳迁移流失与降雨量、雨强、径流量、泥沙量等^[15-16]密切影响。

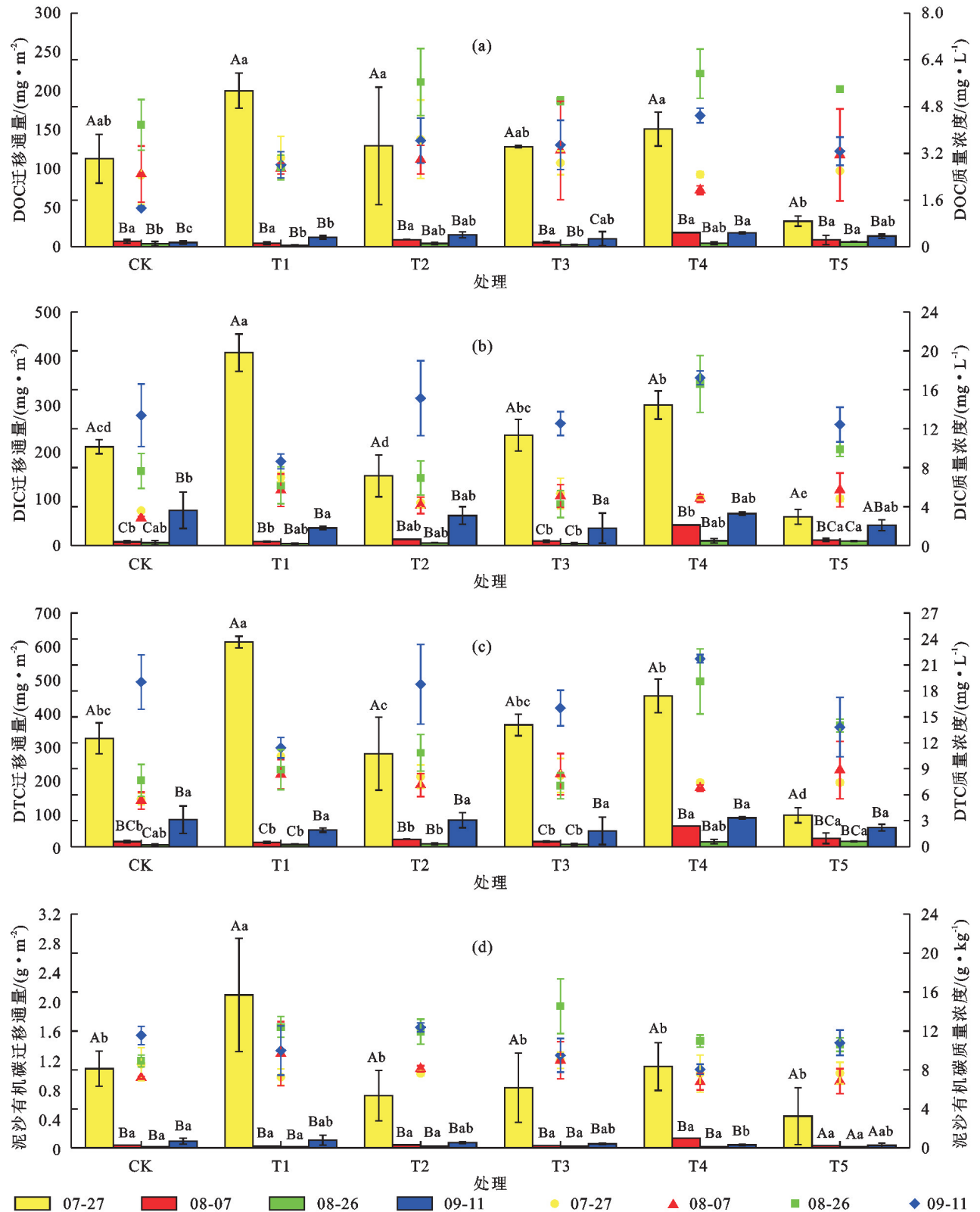


图 4 不同处理地表径流碳组分迁移浓度及通量

Fig.4 Concentration and flux of each carbon component transported in the surface runoff under different treatments

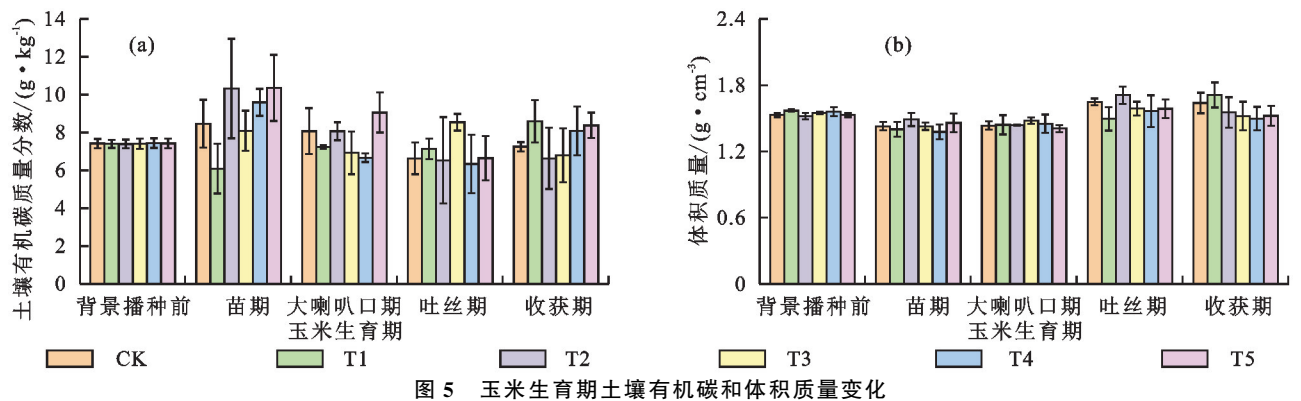
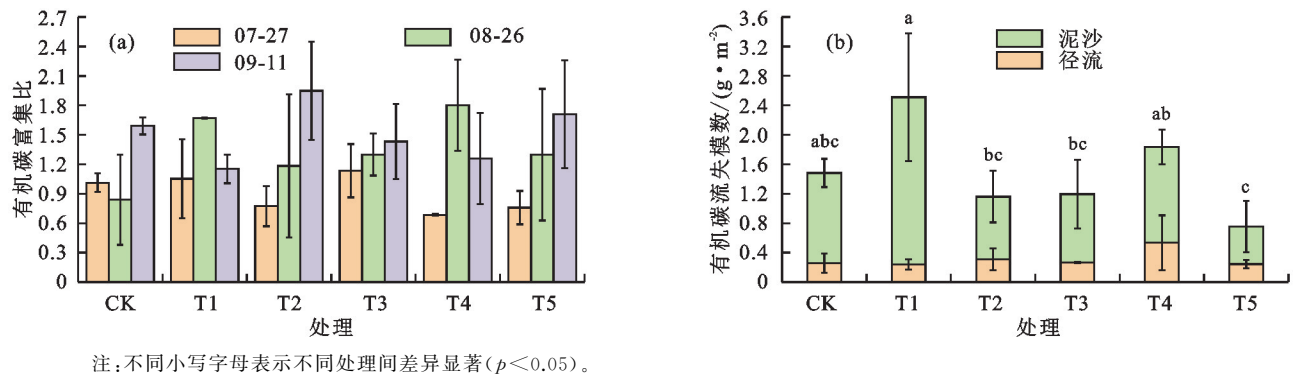


图 5 玉米生育期土壤有机碳和体积质量变化

Fig.5 Changes of soil organic carbon and bulk density during the growth period of maize



注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。

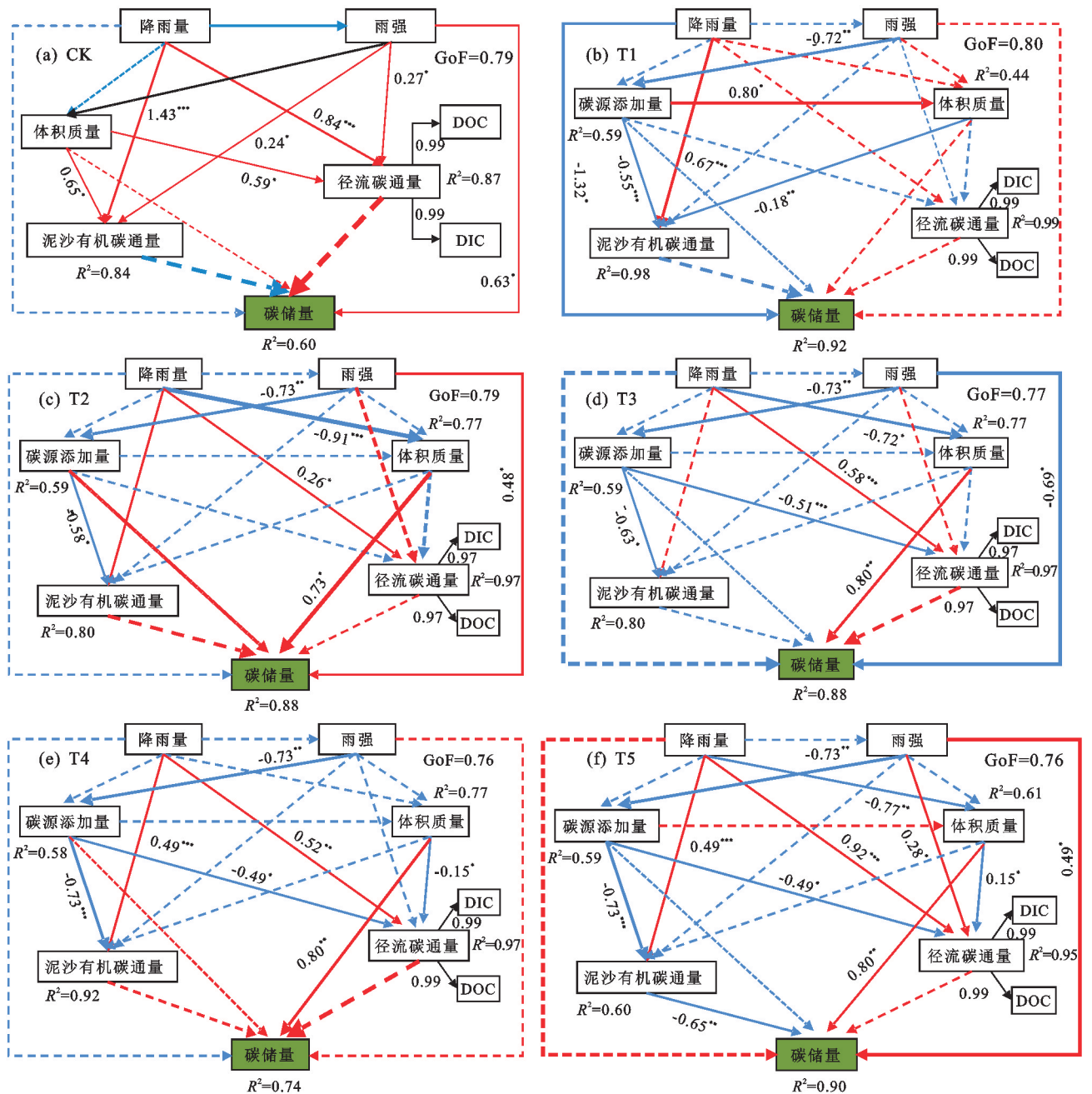
图 6 不同处理径流泥沙有机碳富集比和有机碳损失总量的差异

Fig.6 Differences in organic carbon enrichment ratio and total organic carbon loss in surface runoff and sediment among different treatments

3.2 多碳源添加处理对土壤固碳的影响机制

土壤有机碳是反映土壤肥力、土壤结构和减少水土流失的重要指标^[13]。土壤碳以泥沙结合态和径流溶解态 2 种形式流失,不同碳源添加间碳流失模数(有机碳损失总量)存在差异。地表径流有机碳流失主要以泥沙有机碳为主,占比为 67.47%~90.43%。胡婵娟等^[26]研究表明,泥沙有机碳损失量占有有机碳总损失量 84%以上,最高达 97.6%。T2、T3、T5 处理较 CK 处理有机碳损失总量减少 21.74%、19.40%、49.28%。是因为生物炭比表面积大、吸附性能强,可增加土壤孔隙度促进雨水入渗,使得地表径流减少,通过吸附减少碳的流失^[27-28]。碳源的添加能提高土壤团聚体稳定性及土壤的抗侵蚀能力,从而减少径流泥沙碳的迁移流失^[22]。T5 处理 DOC、DIC、DTC、泥沙有机碳迁移通量较 CK 分别减少 70.88%、29.51%、37.52%、60.07%,表明施用碳源后,使得表层土壤质地疏松,一定程度上阻止径流在地表横向流动,降低碳素随地表径流流失风险^[7]。此外,施用碳源可为微生物提供良好环境,提高其活性,增加土壤有机质(SOM)质量分数^[10]。SOM 的增加为 DOC 提供更多的疏水性吸附点位,促进土壤碳的吸附固持^[13]。表明 T2 和 T3 可有效减少地表径流各碳组分的流失,二者配施后的 T5 处理更加显著。

长期施用有机肥料可有效降低土壤体积质量,提高土壤有机碳储量^[11]。本研究中,多碳源添加对 0~20 cm 土层土壤体积质量产生明显影响。化肥配施有机肥能增大土壤孔隙度,不同碳源添加后,各处理体积质量均有所下降。收获期,T4、T5 较 CK 处理土壤有机碳质量分数分别提升 11.31%、15.45%,说明有机肥配施化肥可改善土壤结构,提高土壤孔隙度,降低土壤体积质量,从而促进有机碳固存^[15]。T1 处理其土壤有机碳固存量在提升,为 362.25 g/m²。分析其原因为玉米生长后期秸秆被土壤中微生物分解,产生激发效应,加速其生长代谢,促进有机碳矿化及作物残体分解,使土壤有机碳更多地转化为活性有机碳组分^[9]。T2 和 T3 减少地表径流各碳组分的流失,但其有机碳固存量分别减少 296.86、286.18 g/m²,可能是生物炭具有丰富的孔隙结构、降雨造成有机碳下渗,入渗的水分流动汇集形成壤中流,导致更多可溶性有机碳随壤中流流失^[12]。T5 处理有机碳迁移损失最少,有机碳固存量提升,为 194.36 g/m²,表明多种碳源(秸秆源+动物源)配施化肥可有效提升有机碳质量分数,减少有机碳的流失。综上,碳源添加后可有效提升碳储量,但土壤固碳是个长期的过程,需要长期试验来验证。



注: $GoF > 0.60$ 表示模型具有较好的拟合度; 红色箭头表示有正向影响, 蓝色箭头表示有负向影响; 箭头线粗细表示模型中路径系数的大小, 虚线代表无显著影响; 黑色箭头表示荷载值; * 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$, *** 表示 $p < 0.001$ 。

图 7 不同处理碳储量与降雨、碳流失、土壤特性的偏最小二乘路径模型 (PLS-PM) 分析

Fig.7 Partial least squares path model (PLS-PM) analysis of carbon sequestration and rainfall, carbon loss, and soil characteristics under different treatments

4 结论

1) 降雨量和雨强显著影响地表径流的产生, 强降雨导致泥沙量和有机碳的迁移流失显著增加, 尤其在高强度、长历时降雨(7月27日、8月7日)后, 土壤有机碳质量分数下降, 其中 T1 处理 DOC 迁移流失最大, T5 处理显著低于其他处理 ($p < 0.05$), 较 CK 减少 70.88%。有机碳选择性迁移与雨强相关, 低雨强时, 泥沙中有机碳的富集比增加, 因形成的径流主要搬运富含有机碳的表层土壤; 高雨强则导致深层粗颗

粒的破碎和搬运, 降低泥沙中有机碳的富集程度, 高雨强下(7月27日)有机碳富集比排序为 $T3 > T1 > CK > T2 > T5 > T4$ 。

2) 碳源添加显著提升土壤有机碳储量。施用多种碳源(如秸秆和动物源)能有效改善土壤结构, 增加孔隙度, 从而提升土壤有机碳质量分数并减少流失, 特别是在 T5 处理上表现最为显著 ($p < 0.05$), 添加后 DOC、泥沙有机碳迁移通量较 CK 减少 70.88%、60.07%, 有机碳固存量提升, 为 194.36 g/m^2 。

3) 降雨特征是碳迁移的主要驱动因子, CK、T1、T4、

T5 处理泥沙碳迁移受降雨量影响显著 ($p < 0.001$) 碳源添加后,降雨量、雨强和土壤特性共同影响碳储量的变化,尤其是体积质量和泥沙有机碳通量对碳储量产生负向影响,而径流碳通量则对碳储量呈正向影响。说明土壤有机碳流失主要以泥沙有机碳为主,且各处理占比均在 65% 以上。

参考文献:

- [1] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [2] 熊子怡,郑杰炳,王丹,等.不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征[J].*环境科学*, 2021, 42(2): 967-976.
- XIONG Z Y, ZHENG J B, WANG D, et al. Characteristics of dissolved organic carbon loss in purple soil sloping fields with different fertilization treatments[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(2): 967-976.
- [3] ZHANG W X, WANG X J, LU T P, et al. Influences of soil properties and hydrological processes on soil carbon dynamics in the cropland of North China Plain[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 295: e106886.
- [4] 何淑勤,宫渊波,武万华,等.不同坡度下玉米生长期紫色土坡面径流及其可溶性有机碳流失特征[J].*水土保持学报*, 2019, 33(1): 91-97.
- HE S Q, GONG Y B, WU W H, et al. Characteristics of runoff and dissolved organic carbon loss in purple soil with different slope gradients during maize growth stages[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(1): 91-97.
- [5] PARK S I, YANG H I, PARK H J, et al. Rice straw cover decreases soil erosion and sediment-bound C, N, and P losses but increases dissolved organic C export from upland maize fields as evidenced by $\delta^{13}C$ [J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 753: e142053.
- [6] 武万华,何淑勤,宫渊波,等.玉米季横垄坡面径流及可溶性有机碳流失特征[J].*中国水土保持科学*, 2017, 15(5): 31-38.
- WU W H, HE S Q, GONG Y B, et al. Characteristics of runoff and dissolved organic carbon loss in slope farmland with contour ridges during maize growth stages[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15(5): 31-38.
- [7] 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.
- SU Z A, XIONG D H, ZHANG J H, et al. Research progress on soil erosion and its control measures in sloping farmland of purple soil[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2018(2): 42-47.
- [8] VAN OOST K, QUINE T A, GOVERS G, et al. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle[J]. *Science*, 2007, 318(5850): 626-629.
- [9] 马子钰,马文林.施肥对中国农田土壤固碳影响效应研究[J].*土壤*, 2022, 54(5): 905-911.
- MA Z Y, MA W L. Effects of fertilization on soil organic carbon in cropland of China[J]. *Soils*, 2022, 54(5): 905-911.
- [10] 聂小东,李忠武,王晓燕,等.雨强对红壤坡耕地泥沙流失及有机碳富集的影响规律研究[J].*土壤学报*, 2013, 50(5): 900-908.
- NIE X D, LI Z W, WANG X Y, et al. Effect of rainfall intensity on soil loss from slope farmland of red soil and organic carbon enrichment in sediment[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5): 900-908.
- [11] 黄东风,王利民,李卫华,等.培肥措施培肥土壤的效果与机理研究进展[J].*中国生态农业学报*, 2014, 22(2): 127-135.
- HUANG D F, WANG L M, LI W H, et al. Research progress on the effect and mechanism of fertilization measure on soil fertility[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(2): 127-135.
- [12] PROSDOCIMI M, JORDÁN A, TAROLLI P, et al. The immediate effectiveness of barley straw mulch in reducing soil erodibility and surface runoff generation in Mediterranean vineyards[J]. *The Science of the Total Environment*, 2016, 547: 323-330.
- [13] 范亚琳,刘贤赵,高磊,等.不同培肥措施对红壤坡耕地土壤有机碳流失的影响[J].*土壤学报*, 2019, 56(3): 638-649.
- FAN Y L, LIU X Z, GAO L, et al. Effects of fertility-building practices on soil organic carbon loss with sediment in sloping cropland of red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(3): 638-649.
- [14] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].*水土保持学报*, 2011, 25(3): 40-43.
- ZHANG H R, ZHENG F L. Effect of slope gradients on erosion from a red soil hillslope under different rainfall intensity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3): 40-43.
- [15] 肖胜生,汤崇军,王凌云,等.自然降雨条件下红壤坡面有机碳的选择性迁移[J].*土壤学报*, 2017, 54(4): 874-884.
- XIAO S S, TANG C J, WANG L Y, et al. Soil erosion-induced selective transfer of organic carbon in red soil slope field under natural rainfall[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(4): 874-884.
- [16] 何淑勤,宫渊波,郑子成,等.降雨强度和坡度对中国紫色土区玉米苗期氮素流失的影响[J].*农业工程技术*, 2022, 42(36): e104.
- HE S Q, GONG Y B, ZHENG Z C, et al. Effects of rainfall intensity and slope on nitrogen loss of maize seedlings in purple soil region of China[J]. *Agricultural*

- Engineering Technology, 2022, 42(36): e104.
- [17] 鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 等. 黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例[J]. 环境科学, 2017, 38(8): 3264-3272.
E X H, WANG Y F, GAO Y, et al. Characteristics of carbon transportation under rainfall events and associated carbon loss evaluation in Loess Plateau, China: A case study of Yangjuangou Dam watershed[J]. Environmental Science, 2017, 38(8): 3264-3272.
- [18] 宁嘉丽, 黄艳荟, 李桂芳, 等. 自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征[J]. 环境科学, 2023, 44(1): 293-302.
NING J L, HUANG Y H, LI G F, et al. Characteristics of soil erosion and nitrogen loss in vegetable field under natural rainfall[J]. Environmental Science, 2023, 44(1): 293-302.
- [19] 郭凯. 不同条件下坡面侵蚀泥沙中有机碳的变化研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
GUO K. Study on organic carbon in different conditions [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [20] 王婧, 李龙, 张鹏, 等. 植被格局对砒砂岩坡地降雨侵蚀的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(9): 3934-3947.
WANG J, LI L, ZHANG P, et al. Effects of vegetation pattern on rainfall erosion on Pisha sandstone slope land [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(9): 3934-3947.
- [21] 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 等. 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5330-5339.
CAO R X, LIU J, DENG K K, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses and runoff in a typical purple soil watershed in the Three Gorges Reservoir area [J]. Environmental Science, 2019, 40(12): 5330-5339.
- [22] 白力鑫, 何丙辉, 李天阳, 等. 长期施肥与耕作对紫色土坡耕地产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 31-39.
BAI L X, HE B H, LI T Y, et al. Effects of long-term fertilization and tillage on the production of runoff and sediment on purple soil slope cropland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 31-39.
- [23] 刘晓路, 徐文玉, 王可, 等. 红壤和紫色土坡面产流产沙特征对比[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(8): 1866-1872.
LIU X L, XU W Y, WANG K, et al. Comparison of runoffs and sediment yields on slope surfaces between red soil and purple soil[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(8): 1866-1872.
- [24] 费凯, 张丽萍, 邓龙洲, 等. 极端暴雨下裸地坡面径流及壤中流中碳素输移特征[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 623-635.
FEI K, ZHANG L P, DENG L Z, et al. Characteristics of carbon transport in bare slope runoff and soil medium flow under extreme rainstorm[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(3): 623-635.
- [25] 安龙龙, 郑子成, 王永东, 等. 耕作措施对玉米生长期黄壤坡耕地径流及可溶性有机碳流失的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(5): 75-81.
AN L L, ZHENG Z C, WANG Y D, et al. Effect of tillage measures on farmland runoff and dissolved organic carbon loss[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 75-81.
- [26] 胡婵娟, 鄢创, 郭雷, 等. 极端降雨条件下淹水对农田土壤有机碳、可溶性有机碳的影响[J/OL]. 中国生态农业学报(中英文): 2024, 1-11. DOI: 10.12357/cjea.20230657.
HU C J, WU C, GUO L, et al. Effect of flooding on organic carbon and dissolved organic carbon in farmland soil under extreme rainfall conditions [J/OL]. Chinese Journal of Eco-Agriculture: 2024, 1-11. DOI: 10.12357/cjea.20230657.
- [27] LI Z W, PENG H, XIE B G, et al. Dissolved organic matter in surface runoff in the Loess Plateau of China: The role of rainfall events and land-use[J]. Hydrological Processes, 2020, 34(6): 1446-1459.
- [28] 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 W, ZENG F L, ZOU Y X, 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.