

引用格式: 吴昌杰, 马黎华, 王小燕, 梁涛, 陈新平. 外源增碳对坡耕地侵蚀及沉积物 C、N 富集的影响[J]. 山地学报, 2025, 43(5): 657-671.

WU Changjie, MA Lihua, WANG Xiaoyan, LIANG Tao, CHEN Xinping. Effects of exogenous carbon augmentation on erosion and C, N enrichment in sediments of sloping farmland [J]. Mountain Research, 2025, 43(5): 657-671.

外源增碳对坡耕地侵蚀及沉积物 C、N 富集的影响

吴昌杰¹, 马黎华^{1*}, 王小燕¹, 梁涛², 陈新平¹

(1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市农业科学院, 重庆 401329)

摘要: 外源增碳是提升坡耕地作物产量、改良土壤结构、减少水土流失的关键技术, 但不同碳基材料对土壤固碳、结构改良与作物生长的耦合效应及侵蚀-沉积过程中碳氮富集的降雨梯度响应尚缺乏系统认知。本研究以典型玉米坡耕地为对象, 设置单施化肥、有机肥+化肥、有机肥+化肥+生物炭、有机肥+化肥+腐殖酸四种处理, 系统评估增碳措施对作物生长、水土流失及侵蚀-沉积物碳、氮富集的综合影响。结果表明: (1) 增碳措施显著减少坡耕地径流与泥沙, 径流量降低 13.7%~53.2%, 泥沙量降低 32.7%~59.1%; 在不同降雨条件下, 腐殖酸抑流效应略优于生物炭。(2) 降雨强度调控侵蚀-沉积物碳、氮富集。大雨条件下沉积物总氮和有机碳平均浓度高于大暴雨; 总氮与有机碳在大雨时呈正富集, 而大暴雨下转为负富集。(3) 增碳措施显著提高玉米抽雄-成熟期地上、地下生物量及产量, 生物炭增产效果优于腐殖酸; 作物截流减沙效应随生物量增加而增强, 其中地下生物量对径流泥沙的消减贡献高于地上生物量。本研究可为坡耕地增碳技术优化及山地农业绿色高质量发展提供科学依据。

关键词: 增碳; 坡耕地; 生物炭; 腐殖酸; 碳氮富集; 作物生物量

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

坡耕地是中国山区重要的耕地资源, 在保障粮食安全、维护生态功能和推动农业可持续发展方面发挥着不可替代的作用^[1]。然而, 陡峭地形叠加降雨冲刷, 使坡耕地成为水力侵蚀的高风险区。侵蚀导致表土流失, 土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC) 和全氮 (total nitrogen, TN) 含量急剧下降^[2]; 而侵蚀沉积物中 C、N 富集, 扰乱区域碳氮循环^[3]。地表植被状况是决定侵蚀强度和养分流失的关键因素, 作物地上-地下生物量可有效截留径流、固定泥沙, 从而缓解侵蚀^[4]。增碳措施通过提升作物生物量和 SOC 含量, 可为减少水土流失提供新

路径^[5]。

生物炭和腐殖酸是土壤改良与作物增产等方面应用最广的两种碳基材料。生物炭经高温碳化, 孔隙发达、稳定性强, 可显著改善土壤理化性质并降低坡面径流与产沙量 (年均减流 19%~28%, 减沙 11%)^[5-7]。腐殖酸活性高、含碳丰富, 既能提升土壤保水能力, 又能促进作物对氮素的吸收, 从而进一步减少养分流失^[8-12]。增碳措施还能通过提高 SOC 含量增强土壤肥力, 进而提升作物产量: 生物炭可显著提高玉米根茎干重和株高, 腐殖酸则通过提高氮素利用率促进根系发育^[11-12]。秸秆还

收稿日期 (Received date): 2024-12-31; 改回日期 (Accepted date): 2025-09-25

基金项目 (Foundation item): “十四五”国家重点研发计划 (2022YFD1901404) [The 14th Five-Year National Key Research & Development Program of China (2022YFD1901404)]

作者简介 (Biography): 吴昌杰 (1998-), 男, 四川广汉人, 硕士研究生, 主要研究方向: 山地水土保持与土壤增碳。[WU Changjie (1998-), male, born in Guanghan, Sichuan Province, M. Sc. candidate, research on soil and water conservation] E-mail: wuchangjie123@yeah.net

* 通讯作者 (Corresponding author): 马黎华 (1983-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 农业水循环与伴生过程。[MA Lihua (1983-), female, Ph. D., associate professor, research on agricultural water cycle and associated process] E-mail: malh@swu.edu.cn

田、有机肥配施等增碳手段每年可使 SOC 增加 $0.44 \sim 0.88 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ [13], 在坡耕地保育中具有广阔应用前景 [14]。

坡耕地养分流失主要由降雨驱动的水力侵蚀造成。侵蚀-沉积过程中, SOC 和 TN 随泥沙搬运并在坡脚或下游富集, 其富集程度受降雨强度和历时调控 [15-17]。高强度降雨下, 沉积物 TN 富集比可达 132%, 而低强度降雨时富集效应则不显著 [18-19]。矿物结合态有机碳 (mineral-associated organic carbon, MAOC) 比颗粒态有机碳 (particulate organic carbon, POC) 更易被优先搬运并在沉积区富集, 这与土壤粒径的再分级过程密切相关 [19-21]。侵蚀还扰乱了土壤 C-N 耦合关系: 表层富含有机质的细颗粒被冲刷后, 原有平衡被破坏, 侵蚀区 C、N 含量下降, 沉积区 C、N 富集 [22-24]; 随着降雨强度增加, 沉积物 C/N 比显著波动, C-N 耦合减弱, 对生态系统养分循环产生深远影响 [24]。

不同碳基材料因孔隙结构、粒径等差异, 其增碳效率和结构改良效果不尽相同, 进而影响土壤侵蚀和 C、N 流失过程 [25]。现有增碳措施的水土保持研究多集中于生物炭 [25-26], 缺乏自然降雨条件下生物炭与腐殖酸对比研究, 也较少关注增碳促进作物生长后对截流产沙的协同效应。

本研究以玉米坡耕地为例, 设置化肥 (NPK 肥料)、有机肥 + 化肥 (organic manure + NPK, OMNPK)、有机肥 + 化肥 + 生物炭 (organic manure + NPK + biochar, OMNPK + BC)、有机肥 + 化肥 + 腐殖酸 (organic manure + NPK + humic acid, OMNPK + HA) 四种处理, 利用自然降雨观测, 系统探讨增碳措施与降雨共同作用对土壤 C、N 组分, 玉米生长, 侵蚀-沉积及 C、N 富集的影响, 阐明作物生

长与径流泥沙的响应关系。研究结果为坡耕地水土保持、土壤肥力提升以及农业可持续发展提供管理策略。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验布设于重庆市北碚区西南大学国家紫色土肥力与肥料效益监测站 ($29^{\circ}48'36''\text{N}$, $106^{\circ}24'33''\text{E}$)。该试验站位于典型紫色土生态区, 具备完善的定位监测条件与农业管理基础, 平均海拔 266.3 m, 属于亚热带湿润季风气候, 近 30 年平均气温为 18.3°C , 平均降雨量为 1087 mm, 区内大部分降雨集中在 6—8 月, 无霜期约为 330 d, 年平均日照时间为 1293 h [27]。

1.2 试验设计

试验共设置四种处理, 每个处理三次重复, 共 12 个试验小区, 并采用随机布设方式 (图 1)。每个小区长 10.0 m、宽 2.0 m, 设计坡面坡度为 10° , 每个小区出口均安装集水桶 (附桶盖) 收集径流和泥沙样本。四种处理包括单施化肥 (NPK)、化肥 + 有机肥 (OMNPK) 以及化肥 + 有机肥 + 生物炭 (OMNPK + BC) 和化肥 + 有机肥 + 腐殖酸 (OMNPK + HA) 两种增碳措施。除施肥外, 各小区的其他田间管理一致。施肥处理前 (2023 年 4 月) 对各个小区表层土壤 (0 ~ 20 cm) 进行了均一化测定, 其结果见土壤各指标含量 (表 1)。

施肥处理与当地农户施肥习惯一致, 施肥均为基肥, 以穴施方式的一次性施用。各处理的施肥及有机物施用量如表 2 所示。有机肥按化肥磷 (P) 体积分数等量替代 30% 的比例施用, 腐殖酸和生物炭

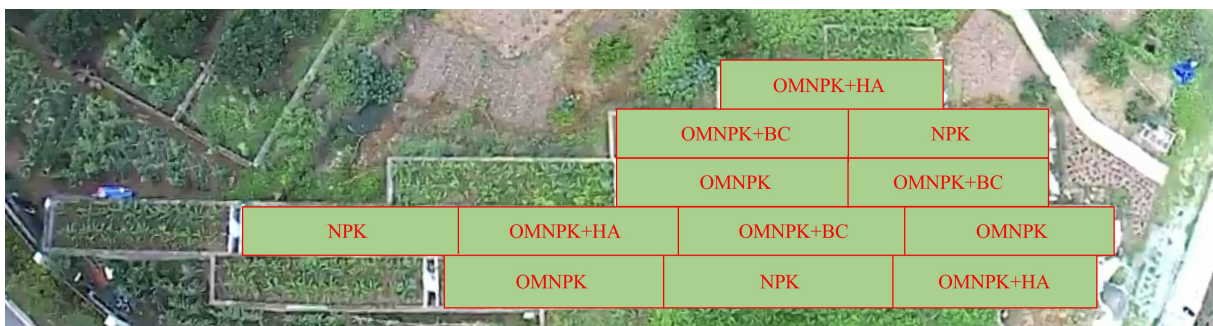


图 1 试验小区分布图

Fig. 1 Distribution of test plots

以等碳量(C)原则进行添加。物料尿素中 N 体积分数为 46% ;过磷酸钙中 P_2O_5 体积分数为 12% ;硫酸钾中 K_2O 体积分数为 52% ;有机肥含有机质 $\geq 55\%$,总养分($N + P_2O_5 + K_2O$) $\geq 12\%$,其中氮、磷、钾配比为 8:3:1,生物炭含碳量 17.4% ,腐殖酸含有机质 50% 。玉米种植参照当地农户习惯,株距和行距分别设置为 50 cm 和 100 cm,一穴两株,每个小区 80 株,于 2023 年 4 月中旬种植,7 月下旬收获。作物生长期四个生长阶段分别为苗期(4 月 22 日—5

月 15 日)、拔节期(5 月 16 日—5 月 30 日)、抽雄期(5 月 31 日—6 月 22 日)、成熟期(6 月 23 日—7 月 20 日)。试验期间利用小区内小型自动气象站(HOBO U30,北京天诺基业科技有限公司)记录气温与降雨数据,玉米生育季共降雨 21 次,其中四次降雨收集到有效径流泥沙样品。观测期内降雨量,温度和对应的玉米生育期如图 2 所示。基于国家标准 GB/T 28592—2012 降雨量等级划分标准,四次降雨事件分别为两次大雨级别和两次大暴雨级别:

表 1 紫色土坡面各处理 0~20 cm 耕层土壤各指标含量

Tab. 1 Contents of soil variables in the 0–20 cm topsoil under different treatments on purple soil slopes

施肥处理方式	pH	有机质/($g \cdot kg^{-1}$)	碱解氮/($mg \cdot kg^{-1}$)	有效磷/($mg \cdot kg^{-1}$)	速效钾/($mg \cdot kg^{-1}$)
NPK	5.31 \pm 0.32 a	17.63 \pm 0.71 a	332.73 \pm 27.45 a	286.76 \pm 44.02 a	370.26 \pm 21.12 a
OMNPK	5.64 \pm 0.30 a	16.42 \pm 1.02 a	343.01 \pm 44.75 a	261.34 \pm 77.62 a	360.73 \pm 64.61 a
OMNPK + BC	5.12 \pm 0.15 a	15.65 \pm 0.92 a	318.07 \pm 2.57 a	239.93 \pm 31.41 a	318.74 \pm 30.24 a
OMNPK + HA	5.41 \pm 0.34 a	16.91 \pm 0.94 a	325.36 \pm 59.13 a	311.31 \pm 33.04 a	345.04 \pm 13.13 a

注:小写字母 a 表示不同处理间的显著差异($p < 0.05$)。下同。

表 2 不同处理施肥及有机物施用量

Tab. 2 Application rates of fertilizers and organic materials under different fertilization treatments (单位:kg)

施肥处理方式	尿素	过磷酸钙	硫酸钾	有机肥	生物炭	腐殖酸
NPK	0.78	1.50	0.42	—	—	—
OMNPK	0.47	1.05	0.38	1.80	—	—
OMNPK + BC	0.47	1.05	0.38	1.80	41.6	—
OMNPK + HA	0.47	1.05	0.38	1.80	—	19.1

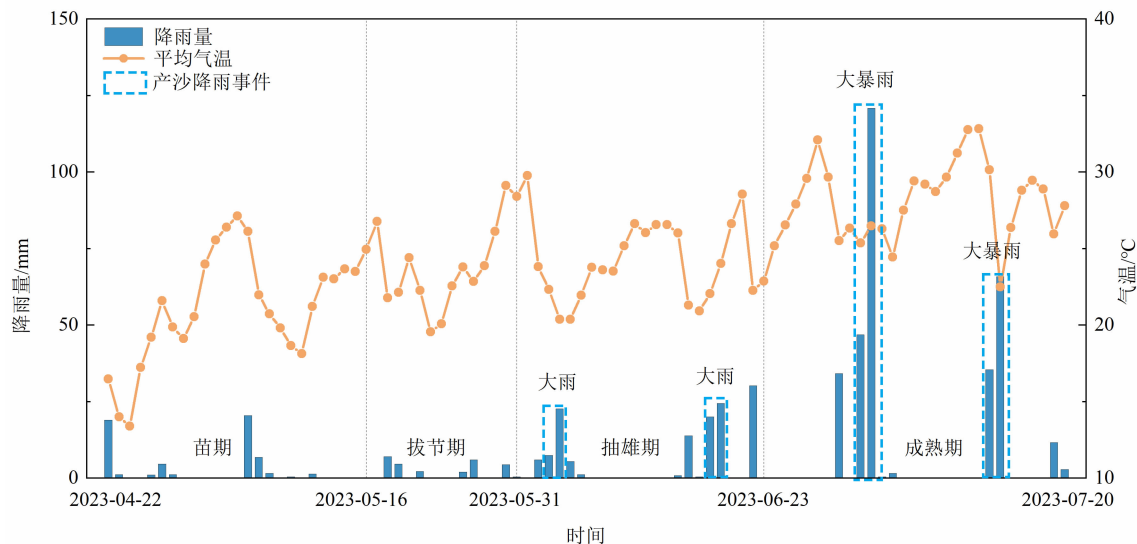


图 2 玉米生育期内降雨量与气温

Fig. 2 Rainfall and temperature during maize growth stages

(1)大雨,6月2日—6月5日,降雨历时33 h,累积降雨量为31.8 mm,为玉米抽雄期;(2)大雨,6月16日—6月18日,降雨历时13 h,累积降雨量为44.41 mm,为玉米抽雄期;(3)大暴雨,7月1日—7月4日,降雨历时15 h,累积降雨量为169.64 mm,为玉米成熟期;(4)大暴雨,7月13日—7月14日,降雨历时11 h,累积降雨量为101.22 mm,为玉米成熟期。

1.3 样品采集

(1)土壤样品

每个玉米生育期内进行一次小区土壤样品的采集。在每个径流小区内采用五点混合采样法,利用直径5 cm的土钻采集0~20 cm表层土壤样品,收集混合土样,剔除杂草后用塑料袋打包带回实验室,一部分鲜土样放入冰柜4℃环境保存,另一部分经风干制备成干土样后测定土壤理化参数。

(2)径流泥沙样品

降雨结束后用体积法测量径流体积,具体为泥沙混合样沉淀后,测定上层清液体积作为径流量。采用称重体积法测定产沙量,具体为收集泥沙混合样并静置24 h后称重,测定上层清液体积后,将沉积物放入烘箱烘干至恒重,最后使用体积法按比例计算得到产沙量^[6]。将采集的水样和泥沙样标记采样日期和类型,保存至温度为4℃的冰箱中,另取一部分泥沙样经风干制备成干土样后待测,每次采集结束后对集水桶进行清洗并放置原位准备下一次采样工作。

(3)玉米植株样品

于玉米拔节期(5月20日)、抽雄期(6月20日)、成熟期(7月20日)在各处理小区中选取长势一致的植株3株,从茎基部切断采集玉米地上部分,随后用铁锹挖土方(直径30 cm,深度30 cm)采集对应根系,利用流动清水将根系土壤冲洗干净,将玉米的地上与地下部分装袋后,放入105℃烘箱内杀青30 min,80℃恒温烘干至恒重(48~72 h,间隔称重误差<1%即为恒重),测定地上生物量与地下生物量。

1.4 测定方法

全氮(TN)含量通过凯式定氮法分析;土壤有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾($K_2Cr_2O_7$)外加氧化法进行测定^[28]。土壤颗粒态有机碳(POC)和矿物结合有机碳(MAOC)测定基于 Rehbein^[29]等的方

法。将30 g过2 mm筛的风干土样置于250 mL烧杯,加入150 mL水并在超声能量 $440 J \cdot mL^{-1}$ 下进行超声分散。超声处理后的悬液通过53 μm手工湿筛分级,筛上组分为颗粒有机质(POM)。筛下部分经离心后,将沉淀取出并置于蒸发皿中,视为矿物结合态有机质(MOM),将POM与MOM于60℃下烘干,经研磨后过150 μm筛,测定其中有机碳含量,POM与MOM中的有机碳(OC)含量即为POC与MAOC含量。

1.5 富集百分率计算

侵蚀沉积物中碳富集计算公式^[30]如下:

$$C_{\text{change}} = \frac{(C_{\text{Sed}} - C_{\text{Soil}})}{C_{\text{Soil}}} \times 100 \quad (1)$$

式中, C_{change} 为侵蚀沉积物的碳富集量(%); C_{Sed} 为侵蚀沉积物中碳含量($g \cdot kg^{-1}$); C_{Soil} 为同期土壤中碳含量($g \cdot kg^{-1}$)。

侵蚀沉积物中氮富集量计算公式^[30]如下:

$$N_{\text{change}} = \frac{(N_{\text{Sed}} - N_{\text{Soil}})}{N_{\text{Soil}}} \times 100 \quad (2)$$

式中, N_{change} 为侵蚀沉积物的氮富集量(%); N_{Sed} 为侵蚀沉积物中氮含量($g \cdot kg^{-1}$); N_{Soil} 为同期土壤中氮含量($g \cdot kg^{-1}$)。

侵蚀沉积物中MAOC富集量计算公式^[30]如下:

$$C_{\text{M-ER}} = \frac{f_{\text{M-Sed}} - f_{\text{M-Soil}}}{f_{\text{M-Soil}}} \quad (3)$$

式中, $C_{\text{M-ER}}$ 为侵蚀沉积物的矿物结合态有机碳富集量(%); $f_{\text{M-Sed}}$ 为侵蚀沉积物中矿物结合态有机碳含量($g \cdot kg^{-1}$); $f_{\text{M-Soil}}$ 为同期土壤中矿物结合态有机碳含量($g \cdot kg^{-1}$)。

侵蚀沉积物中POC富集量计算公式^[30]如下:

$$C_{\text{P-ER}} = \frac{f_{\text{P-Sed}} - f_{\text{P-Soil}}}{f_{\text{P-Soil}}} \quad (4)$$

式中, $C_{\text{P-ER}}$ 为侵蚀沉积物的颗粒态有机碳富集量(%); $f_{\text{P-Sed}}$ 为侵蚀沉积物中颗粒态有机碳含量($g \cdot kg^{-1}$); $f_{\text{P-Soil}}$ 为同期土壤中颗粒态有机碳含量($g \cdot kg^{-1}$)。

1.6 统计分析方法

采用Origin2022、EXCEL 2016和SPSS 23.0软件进行数据处理和图表绘制。在不同的降雨等级下均使用单因素方差分析(one-way ANOVA),比较不同处理间在 $P < 0.05$ 的显著性水平。

2 结果分析

2.1 玉米坡耕地产流产沙量

不同施肥处理下累计降雨量、径流量和泥沙量如图 3 所示。有机肥替代能够有效降低降雨产生的径流和泥沙输出,而生物炭与腐殖酸的添加在此基础上进一步增强了减流减沙效果,其中腐殖酸的作用略优于生物炭。各处理之间存在明显差异,其中 NPK 处理的径流量和泥沙量最大,而增碳处理均表现出显著的抑制效应。与 NPK 处理相比,OMNPK 处理使径流量降低 10.0%~29.0%;OMNPK + BC 处理使径流量降低 13.7%~42.8%;OMNPK + HA 处理则使径流量降低 21.1%~53.2%,并使泥沙量降低 39.2%~46.4%。其中 OMNPK + HA 处理的径流和产沙值最小为 6.51 L 和 377.8 g, NPK 处理的

径流和产沙值最大为 12.5 L 和 655.7 g。

在四次降雨中,径流和泥沙随着降雨量的增大而增大。大雨事件每个小区的平均径流损失分别为 3.46 L 和 3.96 L,平均产沙量为 119.1 g 和 189.7 g。大暴雨事件的每个小区的平均径流损失分别为 9.15 L 和 8.50 L,平均产沙量为 489.9 g 和 434.8 g。

2.2 侵蚀沉积物泥沙 C、N 组分的差异

由降雨产生的泥沙沉积物中 TN、SOC、POC 和 MAOC 含量如图 4 所示。总体来看,玉米抽雄期(大雨事件)沉积物中的 TN 含量普遍高于成熟期(大暴雨事件),表明不同生育期和降雨等级对氮素输出特征具有显著影响。在抽雄期的大雨事件中,第一次大雨条件下,OMNPK 处理的沉积物 TN 含量相较于 NPK 和 OMNPK + HA 处理分别显著提高 19.3% 和 31.6%。在成熟期的大暴雨事件中,第一次大暴雨

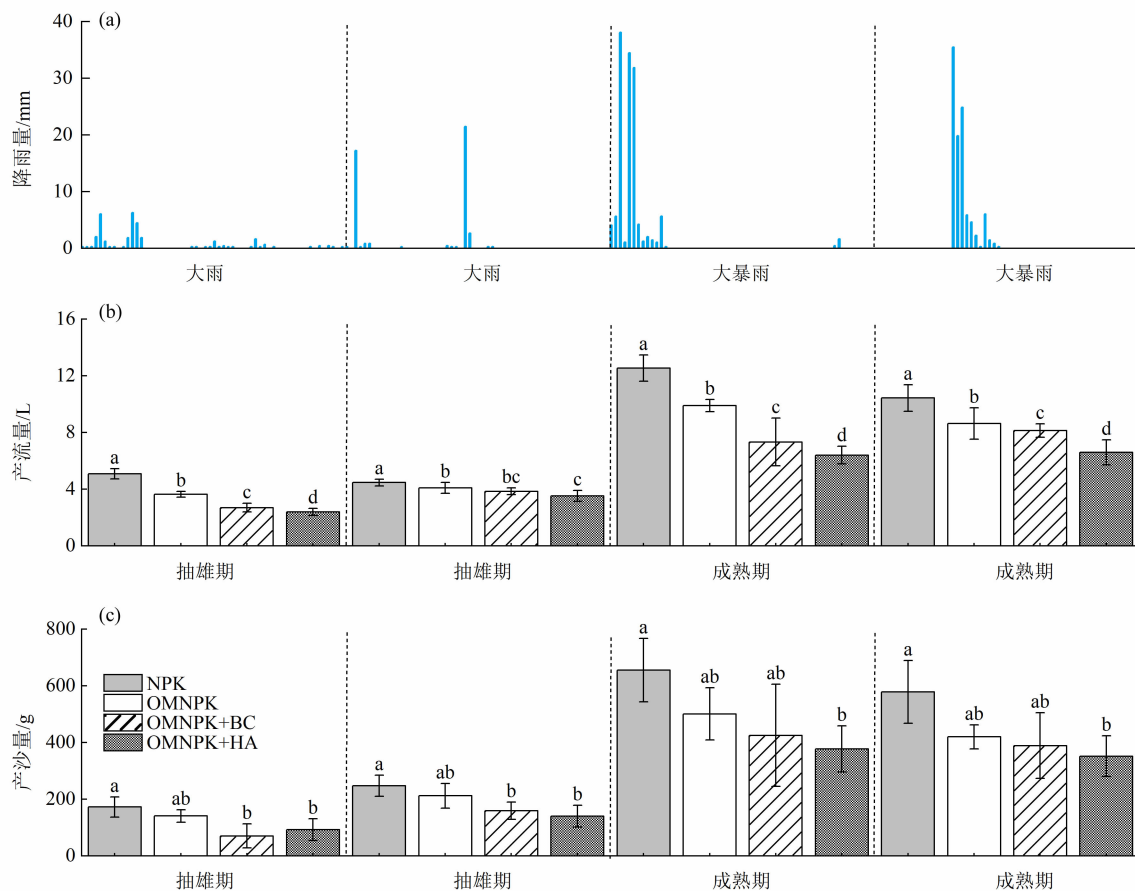
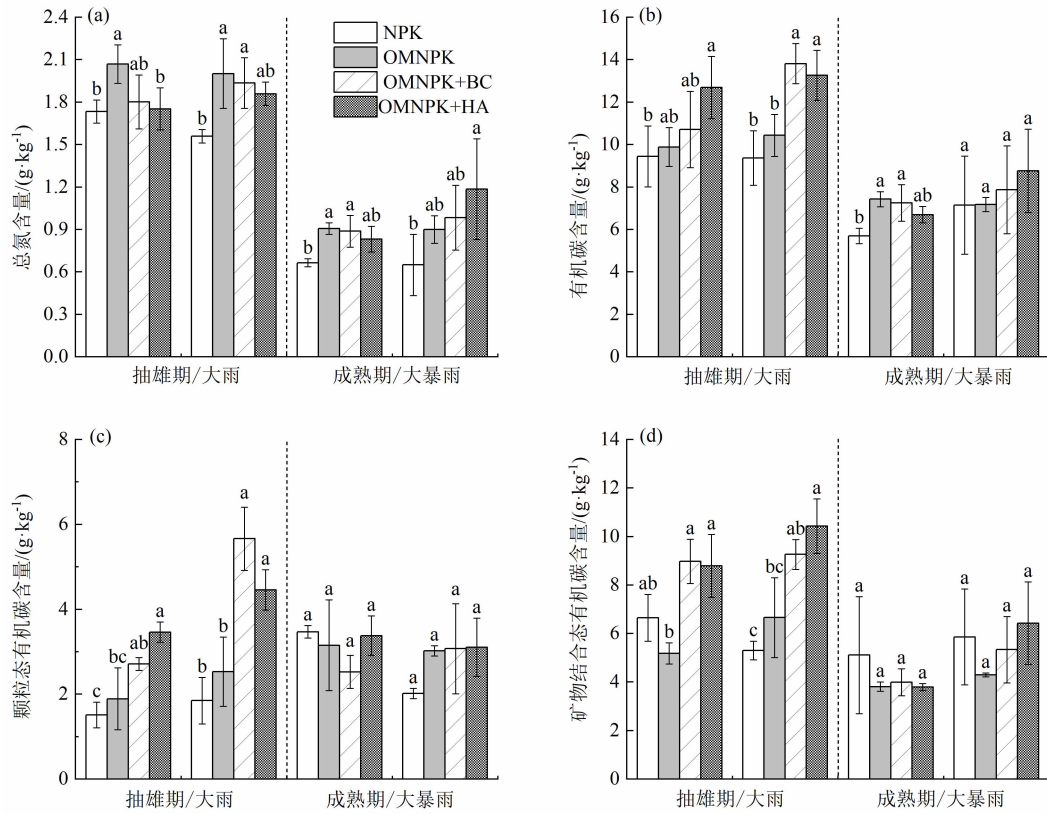


图 3 四次降雨事件中不同施肥处理下产流产沙量:

(a)降雨量;(b)产流量;(c)产沙量

Fig. 3 Runoff and sediment yield under different fertilization treatments during four rainfall events:

(a) rainfall; (b) runoff; (c) sediment yield



说明:图中字母不同表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

图4 四次降雨事件下沉积物C、N含量:

(a) TN; (b) SOC; (c) POC; (d) MAOC

Fig. 4 Carbon and nitrogen contents in sediments under four rainfall events:

(a) TN; (b) SOC; (c) POC; (d) MAOC

中 OMNPK 和 OMNPK + BC 处理的 TN 含量分别比 NPK 处理显著提高 36.4% 和 33.6%; 在第二次大暴雨事件中, OMNPK + HA 处理的沉积物 TN 含量则比 NPK 显著提高 82.3%, 增幅最为明显。

泥沙中的 SOC 含量如图 4b 所示, 在玉米抽雄期大雨事件产生的泥沙中的 SOC 含量普遍高于玉米成熟期大暴雨事件。其中, NPK 处理中泥沙的 SOC 含量最低, BC 和 HA 处理中的泥沙中 SOC 的含量有所增加。具体而言, OMNPK + HA 处理的沉积物 SOC 含量较 NPK 处理显著提高 34%。在第二次大雨事件中, OMNPK + BC 处理的 SOC 含量分别较 NPK 和 OMNPK 处理显著增加 47% 和 32%; 而 OMNPK + HA 处理则分别提高了 41% 和 27%。总体而言, 增碳处理通过强化土壤有机碳库, 使得雨蚀搬运的 SOC 在不同降雨事件中呈现出更高的输出水平。

泥沙中 POC 和 MAOC 含量如图 4c 和 4d 所示, 在玉米抽雄期大雨事件中, 泥沙中的 POC 含量最高的是 OMNPK + BC 处理, 最低的是 NPK 处理; 同期, MAOC 含量则以 OMNPK + HA 处理最高, NPK 处理最低。在第一场大雨事件中, OMNPK + BC 处理和 OMNPK + HA 处理泥沙中的 POC 含量较 NPK 显著增加 79.4% 和 129%, MAOC 含量显著增加 73% 和 69%。在大暴雨事件中, 泥沙中的 POC 含量和 MAOC 含量在各个处理之间差异不显著。

2.3 侵蚀沉积物泥沙 C、N 的富集效应

为分析沉积物泥沙中 C、N 的富集效应, 采用不同生育期内小区土壤的本底 C、N 指标与侵蚀沉积物泥沙中相对应的指标进行比较, 结果如图 5 所示。其中两次大雨事件集中在玉米抽雄期, 两次大暴雨事件集中在玉米成熟期, TN 和 SOC 的富集效应受到了降雨量、生育期的影响, 即大雨事件的富集效应

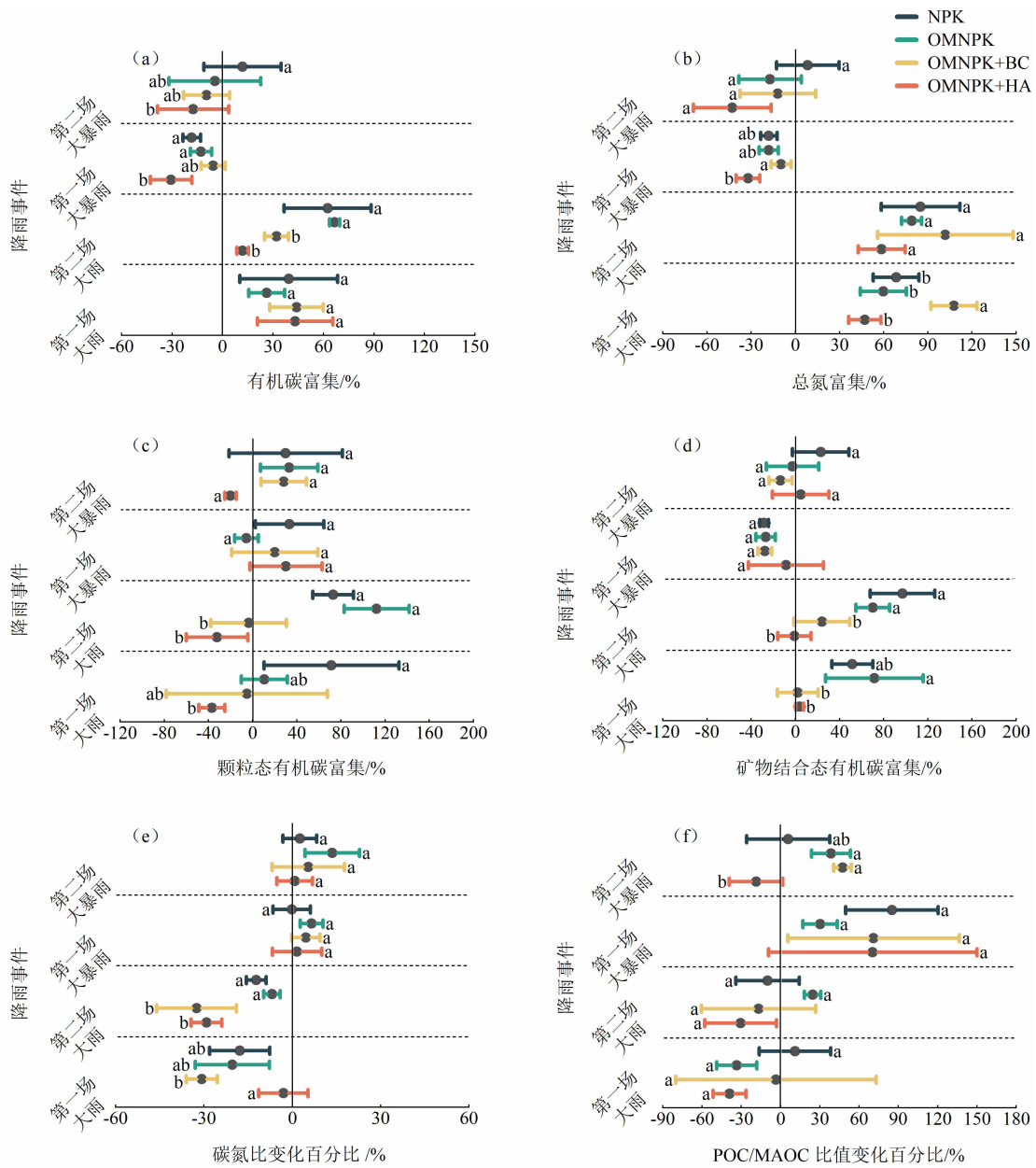


图5 大雨与大暴雨事件下沉积物中 C、N 富集效应对比：

(a) SOC; (b) TN; (c) POC; (d) MAOC; (e) C/N; (f) POC/MAOC

Fig. 5 Comparative enrichment of carbon and nitrogen in sediments under heavy rain and extreme rain events;

(a) SOC; (b) TN; (c) POC; (d) MAOC; (e) C/N; (f) POC/MAOC

大于大暴雨事件,同时在降雨时段上存在明显的差异性;而对于 POC 和 MAOC 则没有这种明显的差异性。

在大雨事件中,SOC 与 TN 富集程度普遍高于大暴雨事件。第二场大雨事件中 OMNPK + BC 和 OMNPK + HA 处理泥沙 SOC 富集程度分别较 NPK 处理显著提高 54.7% 和 50.6%;第一场大暴雨事件均为负富集。第一场大雨事件中 OMNPK 处理泥沙

中的 TN 富集程度最高(107%),NPK 处理富集程度最低(47.1%);第一场大暴雨事件均为负富集。

POC 富集程度在第一场大雨事件中 OMNPK + HA 处理较 NPK 处理显著提高 108.3%,第二场大雨事件中 OMNPK + BC 和 OMNPK + HA 处理较 NPK 处理分别显著提高 144.5% 和 105.1%。MAOC 富集程度在第一场大雨事件中 OMNPK + BC 处理最高,较 NPK 处理显著提高 67.7%;泥沙

MAOC 富集程度在大暴雨事件中各处理之间无显著性差异。

在大雨事件中,泥沙碳氮比变化百分比受施肥处理影响显著。第二场大雨事件中,OMNPK + BC 和 OMNPK + HA 处理较 NPK 分别显著提高 22.2% 和 16.9%。POC 与 MAOC 含量比值在各处理间无显著差异。在大暴雨事件中,碳氮比变化百分比变化程度在各处理间无显著差异。POC 与 MAOC 含量比值的变化百分比的变化程度在第二场大暴雨事件中 OMNPK 和 OMNPK + BC 处理显著高于 NPK, 第一场大暴雨各处理间无显著差异。在雨量较大的大暴雨事件中,POC 呈现正富集效应,而 MAOC 呈现负富集效应,说明在雨量较大侵蚀量较大的时候 POC 比 MAOC 优先搬运。

2.4 玉米产量和地下、地上生物量

不同处理下玉米地下生物量、地上生物量和玉米产量如图 6 所示。NPK 与 OMNPK 处理间玉米地下生物量无显著差异。相较于 NPK, OMNPK + BC 和 OMNPK + HA 处理分别显著提高抽雄期和成熟期地下生物量 11.5% ~ 16.7% 和 17.4% ~ 22.9%; 与 OMNPK 处理相比,抽雄期 OMNPK + BC 和

OMNPK + HA 处理地下生物量分别显著增加 18.9% 和 24.3% (图 6a)。地上生物量方面, OMNPK、OMNPK + BC 和 OMNPK + HA 处理较 NPK 处理分别显著提高 1.6% ~ 14.3%、10.5% ~ 36.6% 和 21.1% ~ 30.7%;成熟期 OMNPK + HA 处理较 OMNPK 显著增加 7.3% (图 6b)。产量方面, OMNPK + BC 和 OMNPK + HA 处理较 NPK 处理分别显著提高 15.9% 和 9.7%,较 OMNPK 处理分别显著提高 12.4% 和 6.3% (图 6c)。

2.5 玉米地下、地上生物量对产流产沙的影响

对不同生育期玉米地上及地下生物量、产流量与产沙量的回归分析表明,产流量和产沙量均随生物量的增加而显著降低,说明玉米地上部分与根系均能有效抑制坡耕地地表径流和泥沙流失(图 7)。在大雨事件中,地上生物量和地下生物量每增加 $1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,可分别减少 1.58 L 和 5.03 L 的地表径流;在大暴雨事件中,每增加 $1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的地上与地下生物量,则可分别减少 1.66 L 和 7.57 L 的径流量。与此对应,在大雨事件中,地上生物量和地下生物量每增加 $1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别可减少 0.10 kg 和 0.32 kg 的产沙量;在大暴雨事件中,每增加 $1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的地上

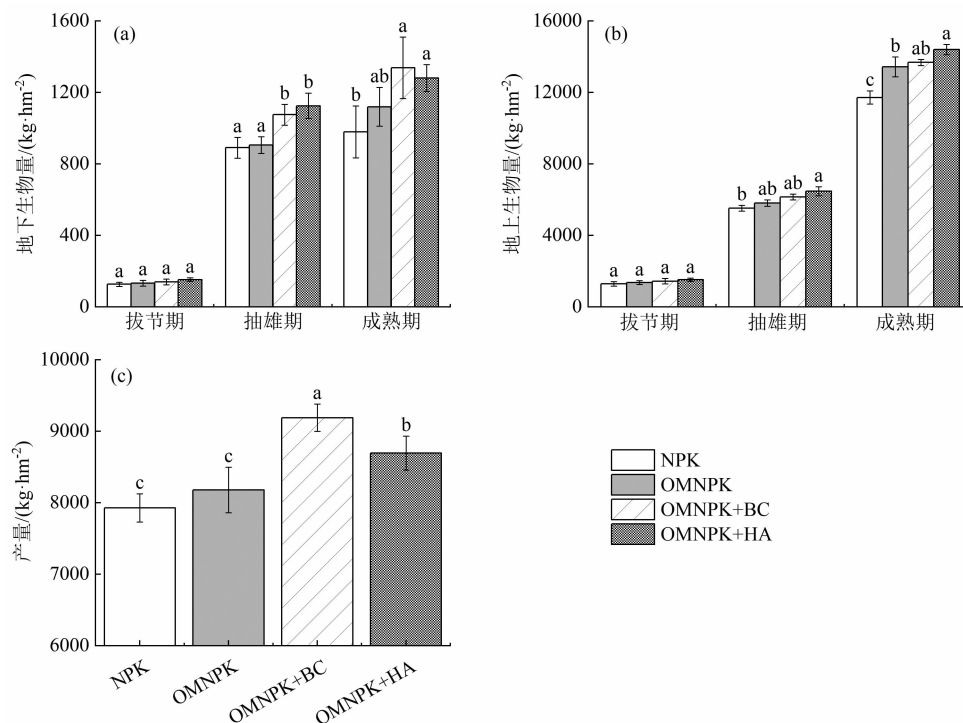


图 6 玉米不同生育期生长指标:(a)地下生物量;(b)地上生物量;(c)玉米产量

Fig. 6 Growth indicators of maize at different developmental stages;

(a) belowground biomass; (b) aboveground biomass; (c) maize yield

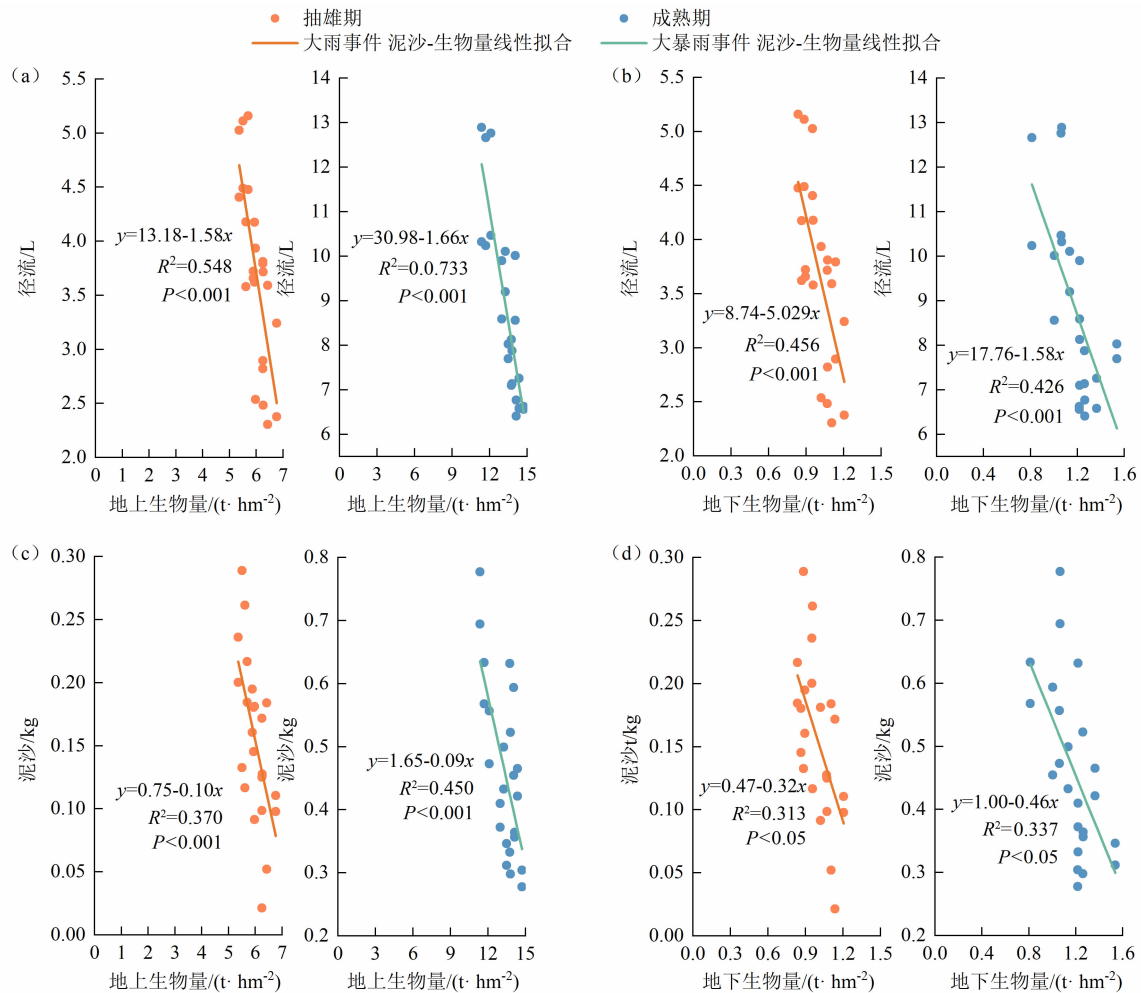


图7 产流量与产沙量随地上生物量与地下生物量的变化:

(a) 产流-地上生物量; (b) 产流-地下生物量; (c) 产沙-地上生物量; (d) 产沙-地下生物量

Fig. 7 Changes in runoff volume and sediment yield with aboveground and belowground biomass:

(a) runoff volume-aboveground biomass; (b) runoff volume-belowground biomass;

(c) sediment yield-aboveground biomass; (d) sediment yield-belowground biomass

与地下生物量,分别可减少0.09 kg 和 0.46 kg 的产沙量。

2.6 产流产沙与沉积物 C、N 的相关分析

降雨量、径流量、产沙量以及沉积物中 TN、SOC、POC、MAOC、C/N 与作物地上、地下生物量的相关性分析如图 8 所示。降雨量与产流量和产沙量均呈显著正相关($P < 0.01$, r 分别为 0.81 和 0.80), 与 TN 呈显著负相关($r = -0.47$), 而与 SOC、POC、MAOC 的相关性均不显著。径流量与产沙量呈极显著正相关($P < 0.01$, $r = 0.92$), 且与 TN 呈显著负相关($r = -0.36$); 产沙量与 TN 之间亦存在显著负相关($r = -0.34$)。

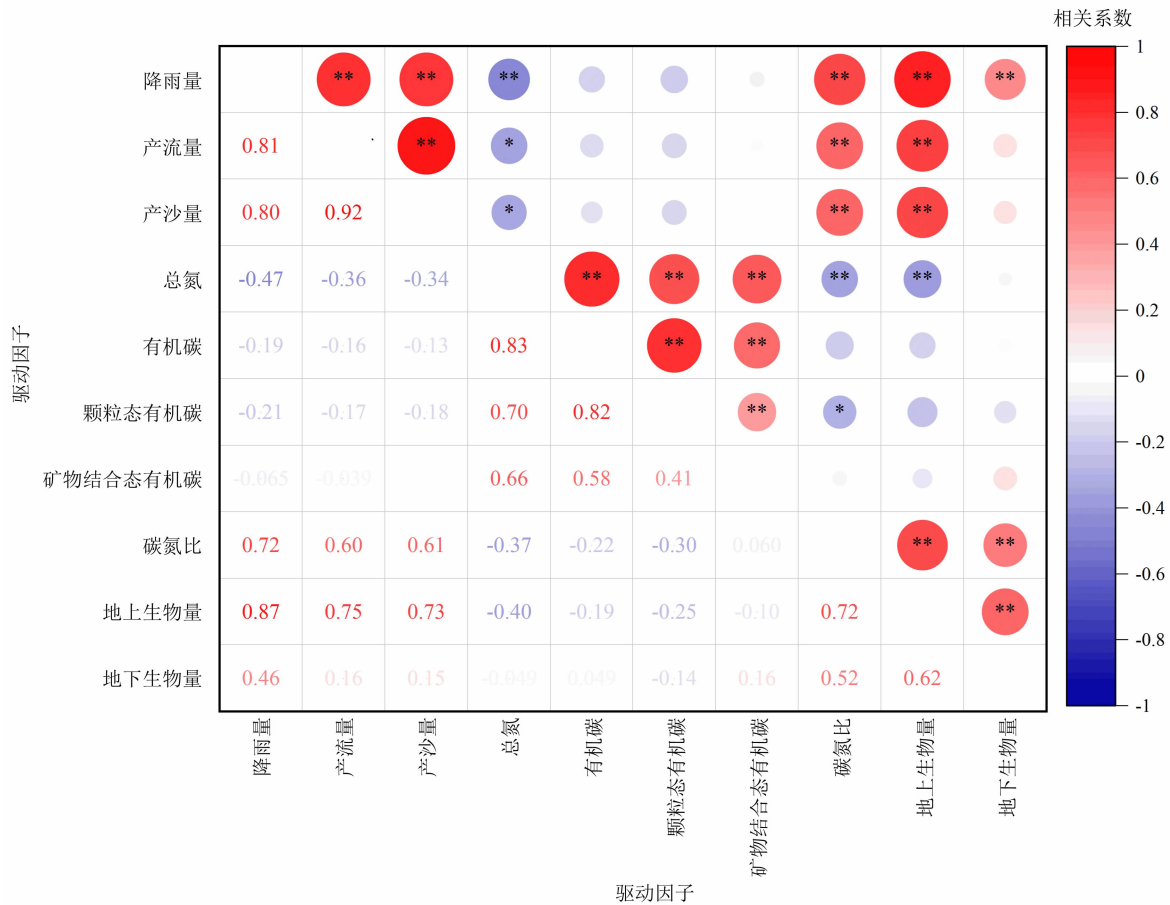
TN 与 SOC、POC、MAOC 均呈显著正相关($P <$

0.01, r 分别为 0.83、0.70 和 0.66)。SOC 与 POC、MAOC 也均呈正相关($P < 0.05$, r 分别为 0.82 和 0.58)。总体来看,降雨量与产流量、产沙量及沉积物 C/N 之间存在较强的相关性 with 显著性,说明降雨量不仅决定坡面产流与产沙过程,也直接影响沉积物的 C/N 特征。此外,地上生物量与产流量、产沙量之间亦存在极显著的相关关系。

3 讨论

3.1 增碳措施对坡面产流产沙的影响

四种施肥处理下的坡面产流量从大到小依次为 NPK、OMNPK、OMNPK + BC、OMNPK + HA, 表明增



说明:图中红色表示正相关,蓝色表示负相关,颜色越深相关性越高;*表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关,**表示在 $P < 0.01$ 水平极显著相关, $n = 48$ 。

图 8 水力侵蚀过程、碳氮组分与作物生物量之间的相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis among hydraulic erosion processes, carbon and nitrogen fractions, and crop biomass

碳措施均能有效降低坡面径流,且改良材料的类型对减流效果存在显著差异。有机肥通过改善土壤结构、增强土壤保水能力,可在一定程度上减少水土流失;在此基础上,生物炭和腐殖酸等碳基材料的加入进一步强化了土壤结构稳定性,使其具备更强的抗侵蚀能力(图 3)^[31]。已有研究证实,生物炭能够提升土壤孔隙度、改善团聚体结构,从而削弱坡面径流对土壤颗粒的剥蚀作用;而腐殖酸通过促进团聚体胶结与结构稳定化,可显著降低土壤被侵蚀的风险^[32-33]。综合本研究的多次降雨观测结果可见,腐殖酸处理在减流减沙效应上略优于生物炭处理,说明其在改善坡面土壤结构、提升抗蚀性能方面具有更强的综合效应(图 3)。降雨强度是驱动坡面侵蚀的主控因子之一。低强度降雨期间,由于雨滴动能较弱、地表径流形成受限,溅蚀及径流冲

刷能力均处于较低水平,因而坡面产流产沙量相对有限^[34]。随着降雨强度增加,雨滴动能和径流剪切力显著增大,坡面土壤颗粒更易被剥离、迁移,从而导致明显增加的产流与泥沙输出^[35-36]。本研究后两次降雨事件为大暴雨,具有较大的雨强和更长的降雨历时,累积能量更高,因此较前两次侵蚀事件产生了显著更高的产流产沙量(图 3)。该现象与 Zhao^[37]等关于降雨强度对坡面侵蚀影响的规律一致,即强降雨是触发坡耕地高强度水土流失的主要因素。

3.2 降雨对侵蚀沉积物泥沙 C、N 富集效应的影响

不同降雨等级下沉积物 C、N 组分的富集特征存在显著差异(图 5)。总体来看,大雨事件中沉积物 SOC 与 TN 表现为正富集,而大暴雨事件中多呈负富集。在大雨事件中,沉积物 SOC 与 TN 均高于

小区土壤本底值,这与降雨强度较低、侵蚀过程以细颗粒剥蚀为主有关。此时期又临近施肥日,土壤 SOC 与 TN 本底值整体较高(图 5a,b),使得被搬运的细颗粒富含有机质,因而沉积物中 SOC 与 TN 呈现正富集。在大暴雨事件中,沉积物 SOC 与 TN 普遍为负富集,表明沉积物中有机质含量低于原始土壤。大暴雨具有更高的雨滴动能和径流剪切力,可同时搬运富含 SOC 和 TN 的细颗粒与低有机质的粗颗粒,导致沉积物整体出现“稀释效应”,SOC 与 TN 浓度降低^[38-39]。本研究进一步发现,就不同类型有机碳而言,大暴雨事件中 POC 呈正富集,MAOC 呈负富集。这说明在雨强大、侵蚀量高的情况下,粒径粗、密度低、与矿物结合弱的 POC 更易被径流优先剥离;而结构稳定、与矿物胶结紧密的 MAOC 不易迁移,因此在沉积物中相对减少。该规律与 Liu^[40]、Wang^[41]等研究结果一致。在雨强较小的大雨事件中,POC 与 MAOC 均随碳基材料的施加表现为正富集,其中 OMNPK + BC 和 OMNPK + HA 处理的富集效应显著高于 OMNPK 和 NPK 处理。生物炭和腐殖酸提升了土壤有机碳库,使易搬运的 POC 和 MAOC 在侵蚀过程中的输出量增加。已有研究也指出,侵蚀会显著削弱土壤中 POC 和 MAOC 的绝对含量,侵蚀越强,损失越大^[42]。

3.3 增碳措施对玉米产量、生物量及产流产沙的影响

在四种施肥处理中可以看出生物炭和腐殖酸显著提高玉米产量(图 6),与 NPK 处理相比,OMNPK + BC 和 OMNPK + HA 处理玉米产量分别增加 15.9% 和 9.7%。生物炭搭配秸秆对土壤肥力和土壤 N 素积累均起到促进作用,达到作物增产的作用^[27];相较于普通复合肥料,腐殖酸肥料能有效减少玉米秃尖的现象,从而提高玉米产量^[43]。当腐殖酸与 N 肥配施时,可增加土壤的 N 含量,并提高玉米产量^[44]。本研究中,与 OMNPK 处理相比,在成熟期时 OMNPK + HA 处理地上生物量显著增加 7.3%,在抽雄期时 OMNPK + BC 与 OMNPK + HA 处理较 OMNPK 处理的地下生物量分别显著提升 18.9% 和 24.3% (图 7)。施加生物炭有利于作物根系的生长,并且对玉米叶面积与生物量促进效果显著^[45]。腐殖酸能促进土壤形成大团聚体来改变土壤含水量与养分有效性,并且能提高玉米的光合作用与生物量^[8]。

在水蚀过程中,植被可以通过冠层截流作用,即地上部分作物的茎和叶所产生的截流作用会改变雨滴大小和时空格局,从而降低雨滴对地表的侵蚀力^[46];同时,根系能通过形成密集根系网络,结合土壤颗粒,从而提高土壤抵抗水蚀的能力^[47]。不同的植物地上部与根系均能对坡面产生影响,其中根系发挥作用更大^[48-49]。本研究结果与前人一致,在紫色土玉米坡耕地系统中,玉米的地上与地下生物量均起到了坡面减少水土流失的效果;地下生物量的水土保持效果要高于地上生物量。地上生物量每增加 $1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,则可以减少 1.58 ~ 1.66 L 的地表径流;玉米的地下生物量每增加 $1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,则可以减少 5.03 ~ 5.57 L 的地表径流。相对应地,地上生物量与地下生物量每增加 $1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,可以减少 0.09 ~ 0.1 kg 和 0.32 ~ 0.46 kg 的地表产沙量。这一发现深化了作物生长与生态系统服务的关联,表明根系对水土保持的作用更显著。

本研究未考虑降雨的连续影响,把每次暴雨和大暴雨时间作为独立事件进行采样分析,仅考虑自然降雨条件,未涵盖不同土壤类型的适用性,但是量化了高强度降雨条件下碳基材料对 C、N 富集的影响,证明了碳基材料与作物根系在抑制水土流失中作用显著,为进一步探索碳基材料在强降雨环境下的适用性奠定了基础,未来可拓展到模拟降雨或不同土壤类型条件下进行,进一步明确碳基材料在水土保持和作物增产中的作用机制,并在实际应用中推广精准施肥和水土保持措施,助力农业可持续发展。

4 结论

(1) 碳基材料对坡耕地径流及泥沙量具有显著的削减作用,不同降雨条件下腐殖酸抑制产流效果略好于生物炭。通过增碳措施处理玉米坡耕地,径流量减少 13.7% ~ 53.2%,而产沙量减少 32.7% ~ 59.1%。

(2) 在不同降雨条件下,C 和 N 在沉积物中的富集特性存在显著差异。研究表明,在大雨条件下,沉积物泥沙中的 SOC 和 TN 均表现出正富集效应,而在大暴雨条件下,则表现为负富集效应。在大暴雨条件下,POC 较 MAOC 更容易被优先搬运。

(3) 碳基材料显著提升了玉米地上和地下生物量以及产量, 其中有机肥与生物炭组合 (OMNPK + BC) 的增产效果略优于有机肥与腐殖酸组合 (OMNPK + HA)。地上生物量每增加 $1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 可减少地表径流 $1.58 \sim 1.66 \text{ L}$ 和消减泥沙 $0.09 \sim 0.10 \text{ kg}$; 地下生物量每增加 $1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 可减少地表径流 $5.03 \sim 5.57 \text{ L}$ 和消减泥沙 $0.32 \sim 0.46 \text{ kg}$ 。

参考文献 (References)

- [1] 罗光杰, 王世杰, 李阳兵, 等. 岩溶地区坡耕地时空动态变化及其生态服务功能评估 [J]. 农业工程学报, 2014, **30** (11): 233 - 243. [LUO Guangjie, WANG Shijie, LI Yangbing, et al. Spatio-temporal dynamics and ecological service function assessment of slope farmland in Karst areas of Guizhou Province, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, **30** (11): 233 - 243] DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.11.029
- [2] 侯宁, 王勇, 赵虎, 等. 耕作侵蚀对不同坡度下紫色土侵蚀产沙的影响 [J]. 山地学报, 2021, **39** (4): 495 - 505. [HOU Ning, WANG Yong, ZHAO Hu, et al. Effects of tillage erosion on sediment yield of purple soil under different slopes [J]. Mountain Research, 2021, **39** (4): 495 - 505] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000614
- [3] LI Haiqiang, ZHU Hansong, LIANG Chenglong, et al. Soil erosion significantly decreases aggregate-associated OC and N in agricultural soils of Northeast China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2022, **323**: 107677. DOI: 10.1016/j.agee.2021.107677
- [4] MU Hongli, YU Xianju, FU Suhua, et al. Effect of stem basal cover on the sediment transport capacity of overland flows [J]. Geoderma, 2019, **337**: 384 - 393. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.09.055
- [5] NOGUES I, MIRITANA V M, PASSATORE L, et al. Biochar soil amendment as carbon farming practice in a Mediterranean environment [J]. Geoderma Regional, 2023, **33**: e00634. DOI: 10.1016/j.geodrs.2023.e00634
- [6] FU Qiang, YAN Jiawen, LI Heng, et al. Effects of biochar amendment on nitrogen mineralization in black soil with different moisture contents under freeze-thaw cycles [J]. Geoderma, 2019, **353**: 459 - 467. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.07.027
- [7] PEAKE L R, REID B J, TANG Xiangyu. Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils [J]. Geoderma, 2014, **235**: 182 - 190. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.07.002
- [8] CHEN Qi, QU Zhaoming, MA Guohua, et al. Humic acid modulates growth, photosynthesis, hormone and osmolytes system of maize under drought conditions [J]. Agricultural Water Management, 2022, **263**: 107447. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.107447
- [9] ZHAO Ying, HAO Yun, CHENG Kui, et al. Artificial humic acid mediated migration of phosphorus in soil: Experiment and modelling [J]. Catena, 2024, **238**: 107896. DOI: 10.1016/j.catena.2024.107896
- [10] ZHAO Yiming, LIN Shan, LIU Yanni, et al. Application of mixed straw and biochar meets plant demand of carbon dioxide and increases soil carbon storage in sunken solar greenhouse vegetable production [J]. Soil Use and Management, 2020, **36** (3): 439 - 448. DOI: 10.1111/sum.12579
- [11] PINNAMANANI S R, LIMA I M, BOONE S A, et al. Effects of pelleted sugarcane biochar applications on growth, yield and economics of rainfed corn (*Zea mays* L.) in the Mississippi Delta [J]. Industrial Crops and Products, 2023, **204**: 117318. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.117318
- [12] AMPONG K, THILAKARANTHNA M S, GORIM L Y. Understanding the role of humic acids on crop performance and soil health [J]. Frontiers in Agronomy, 2022, **4**: 848621. DOI: 10.3389/fagro.2022.848621
- [13] LESSMANN M, ROS G H, YOUNG M D, et al. Global variation in soil carbon sequestration potential through improved cropland management [J]. Global Change Biology, 2022, **28** (3): 1162 - 1177. DOI: 10.1111/gcb.15954
- [14] 肖胜生, 房焕英, 徐佳文, 等. 侵蚀区植被恢复过程中土壤有机碳稳定性的研究进展 [J]. 水土保持学报, 2022, **36** (5): 1 - 8. [XIAO Shengsheng, FANG Huanying, XU Jiawen, et al. Advances of the soil organic carbon stability under vegetation restoration in eroded areas [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, **36** (5): 1 - 8] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2022.05.001
- [15] CUI Linlin, LI Xiao, LIN Jie, et al. The mineralization and sequestration of soil organic carbon in relation to gully erosion [J]. Catena, 2022, **214**: 106218. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106218
- [16] YANG Yang, YE Zhihan, LIU Baoyuan, et al. Nitrogen enrichment in runoff sediments as affected by soil texture in Beijing mountain area [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, **186**: 971 - 978. DOI: 10.1007/s10661-013-3431-9
- [17] WU Xinliang, ZHANG Zhiyong, CAI Chongfa, et al. Soil type regulates the divergent loss characteristics of sediment associated carbon and nitrogen in different size classes during rainfall erosion on cultivated lands [J]. Journal of Environmental Management, 2024, **354**: 120479. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120479
- [18] KOITER A J, OWENS P N, PETTICREW E L, et al. The role of soil surface properties on the particle size and carbon selectivity of interrill erosion in agricultural landscapes [J]. Catena, 2017, **153**: 194 - 206. DOI: 10.1016/j.catena.2017.01.024

- [19] RAMOS M C, LIZAGA I, GASPAR L, et al. Effects of rainfall intensity and slope on sediment, nitrogen and phosphorous losses in soils with different use and soil hydrological properties [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, **226**: 105789. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.105789
- [20] CASTELLANO M J, KAYE J P, LIN H, et al. Linking carbon saturation concepts to nitrogen saturation and retention [J]. *Ecosystems*, 2012, **15**: 175 – 187. DOI: 10.1007/s10021-011-9501-3
- [21] COTRUFO M F, RANALLI M G, HADDIX M L, et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter [J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(12): 989 – 994. DOI: 10.1038/s41561-019-0484-6
- [22] NADEU E, DE VENETE J, MARTÍNEZ-MENA M, et al. Exploring particle size distribution and organic carbon pools mobilized by different erosion processes at the catchment scale [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, **11**: 667 – 678. DOI: 10.1007/s11368-011-0348-1
- [23] BERHE A A, HARDEN J W, TORN M S, et al. Persistence of soil organic matter in eroding versus depositional landform positions [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, **117**: G02019. DOI: 10.1029/2011JG001790
- [24] BOIX-FAYOS C, MARTÍNEZ-MENA M, CUTILLAS P P, et al. Carbon redistribution by erosion processes in an intensively disturbed catchment [J]. *Catena*, 2017, **149**: 799 – 809. DOI: 10.1016/j.catena.2016.08.003
- [25] LI Zhiguo, GU Chiming, ZHANG Runhua, 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. DOI: 10.1016/j.agwat.2017.02.018
- [26] ZHU Xiaomin, CHEN Baoliang, ZHU Lizhong, et al. Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: A review [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **227**: 98 – 115. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.04.032
- [27] 孙宁婷, 王小燕, 周豪, 等. 生物质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. [SUN Ningting, WANG Xiaoyan, ZHOU Hao, et al. Effects of kind and incorporation depth of biochars on water movement and Nitrogen and Phosphorus loss in purple soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, **59**(3): 722 – 732] DOI: 10.11766/trxb202008130360
- [28] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25 – 38. [BAO Shidan. *Soil and agricultural chemistry analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2000: 25 – 38]
- [29] REHBEIN K, SANDHAGE-HOFMANN A, AMELUNG W. Soil carbon accrual in particle-size fractions under *Miscanthus x. giganteus* cultivation [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2015, **78**: 80 – 91. DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.04.006
- [30] HOLZ M, AUGUSTIN J. Erosion effects on soil carbon and nitrogen dynamics on cultivated slopes: A meta-analysis [J]. *Geoderma*, 2021, **397**: 115045. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115045
- [31] LI Yuanyuan, ZHANG Fengbao, YANG Mingyi, et al. Impacts of biochar application rates and particle sizes on runoff and soil loss in small cultivated loess plots under simulated rainfall [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **649**: 1403 – 1413. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.415
- [32] TEJADA M, GONZALEZ J L. Influence of organic amendments on soil structure and soil loss under simulated rain [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, **93**(1): 197 – 205. DOI: 10.1016/j.still.2006.04.002
- [33] YANG Fan, SUI Long, TANG Chunyu, et al. Sustainable advances on phosphorus utilization in soil via addition of biochar and humic substances [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **768**: 145106. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145106
- [34] 张祖莲, 洪斌, 黄英, 等. 降雨作用下红土型坡面径流特性与土壤侵蚀的关系研究[J]. *山地学报*, 2017, **35**(4): 535 – 542. [ZHANG Zulian, HONG Bin, HUANG Ying, et al. Study on relationship between runoff characteristics and soil erosion of laterite slope under rainfall [J]. *Mountain Research*, 2017, **35**(4): 535 – 542] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000251
- [35] 黄鑫, 郑江坤, 任雨之, 等. 川中丘陵区紫色土坡耕地植物篱措施对土壤抗蚀性的影响[J]. *山地学报*, 2024, **42**(1): 27 – 36. [HUANG Xin, ZHENG Jiangkun, REN Yuzhi, et al. Effect of hedgerow on anti-erodibility of sloping farmlands consisted of purple soil in the hilly area of central Sichuan Basin [J]. *Mountain Research*, 2024, **42**(1): 27 – 36] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000801
- [36] 佟亚宁, 王彬, 王文刚, 等. 东北典型黑土区土壤侵蚀对有机碳时空变化特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, **38**(5): 59 – 70. [TONG Yaning, WANG Bin, WANG Wengang, et al. Impact of soil erosion on the temporal and spatial dynamics of organic carbon in the typical black soil region of Northeast China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, **38**(5): 59 – 70] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.011
- [37] ZHAO Longshan, FANG Qian, HOU Rui, et al. Effect of rainfall intensity and duration on soil erosion on slopes with different microrelief patterns [J]. *Geoderma*, 2021, **396**: 115085. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115085
- [38] MAHMOODABADI M, ZAMANI S, YAZDANPANAH N. Enrichment of soil organic carbon in the eroded sediments due to the simultaneous occurrence of rain and wind [J]. *Geoderma*, 2021, **386**: 114926. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114926

- [39] KIANI-HARCHEGANI M, SADEGHI S H, SINGH V P, et al. Effect of rainfall intensity and slope on sediment particle size distribution during erosion using partial eta squared [J]. *Catena*, 2019, **176**: 65 – 72. DOI: 10.1016/j.catena.2019.01.006
- [40] LIU Futing, QIN Shuqi, FANG Kai, et al. Divergent changes in particulate and mineral-associated organic carbon upon permafrost thaw [J]. *Nature Communications*, 2022, **13**(1): 5073. DOI: 10.1038/s41467-022-32681-7
- [41] WANG Xiang, CAMMERAAT E L H, ROMEIJN P, et al. Soil organic carbon redistribution by water erosion – the role of CO₂ emissions for the carbon budget [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(5): e96299. DOI: 10.1371/journal.pone.0096299
- [42] HE Yanxing, ZHANG Fengbao, YANG Mingyi, et al. Insights from size fractions to interpret the erosion-driven variations in soil organic carbon on black soil sloping farmland, Northeast China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2023, **343**: 108283. DOI: 10.1016/j.agee.2022.108283
- [43] GUMUS I, SEKER C. Influence of humic acid applications on modulus of rupture, aggregate stability, electrical conductivity, carbon and nitrogen content of a crusting problem soil [J]. *Solid Earth*, 2015, **6**(4): 1231 – 1236. DOI: 10.5194/se-6-1231-2015
- [44] 庄振东, 李絮花. 腐植酸氮肥对玉米产量、氮肥利用及氮肥损失的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, **22**(5): 1232 – 1239. [ZHUANG Zhendong, LI Xuhua. Effects of humic acid nitrogen fertilization on corn yield, nitrogen utilization and nitrogen loss [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, **22**(5): 1232 – 1239] DOI: 10.11674/zwyf.15512
- [45] 程效义, 孟军, 黄玉威, 等. 生物炭对玉米根系生长和氮素吸收及产量的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2016, **47**(2): 218 – 223. [CHENG Xiaoyi, MENG Jun, HUANG Yuwei, et al. Effect of biochar on root growth, absorption of nitrogen and maize yield [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2016, **47**(2): 218 – 223] DOI: 10.3969/j.issn.1000-1700.2016.02.015
- [46] NEARING M A, YIN Shuiqing, BORRELLI P, et al. Rainfall erosivity: An historical review [J]. *Catena*, 2017, **157**: 357 – 362. DOI: 10.1016/j.catena.2017.06.004
- [47] WANG Bing, ZHANG Guanghui. Quantifying the binding and bonding effects of plant roots on soil detachment by overland flow in 10 typical grasslands on the Loess Plateau [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, **81**(6): 1567 – 1576. DOI: 10.2136/sssaj2017.07.0249
- [48] 赵炯昌, 卫伟, 段兴武. 模拟降雨下黄土坡面水沙过程对3种灌草植被垂直结构变化的响应[J]. *生态学报*, 2021, **41**(21): 8602 – 8611. [ZHAO Jiongchang, WEI Wei, DUAN Xingwei. Response of the runoff and sediment process on loess slope to the vertical structure changes of three shrub and grass vegetations under simulated rainfall [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(21): 8602 – 8611] DOI: 10.5846/stxb202012313330
- [49] KOKUTSE N K, TEMGOUA A G T, KAVAZOVIC Z. Slope stability and vegetation: Conceptual and numerical investigation of mechanical effects [J]. *Ecological Engineering*, 2016, **86**: 146 – 153. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.11.005

Effects of Exogenous Carbon Augmentation on Erosion and C, N Enrichment in Sediments of Sloping Farmland

WU Changjie¹, MA Lihua^{1*}, WANG Xiaoyan¹, LIANG Tao², CHEN Xinpings¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329, China)

Abstract: Exogenous carbon addition is increasingly regarded as a pivotal and promising technique for enhancing crop yield, improving soil structural stability, and reducing soil-water losses on sloping farmland. Despite its widespread application potential, a systematic and integrative understanding of how different types of carbon-based materials jointly influence soil carbon sequestration, soil structural enhancement, and crop growth remains insufficient. In particular, the mechanisms through which carbon amendments interact with rainfall gradients to regulate carbon and nitrogen enrichment during erosion-deposition processes are still poorly clarified, limiting the development of targeted and optimized carbon-addition practices for erosion-prone agricultural landscapes.

In this study, it took a typical maize-cultivated sloping-farmland as the study object, and four treatments were established: ①chemical fertilizer (NPK), ②organic manure + chemical fertilizer, ③organic manure + chemical fertilizer + biochar, and ④organic manure + chemical fertilizer + humic acid. The integrated effects of carbon addition on crop growth, runoff and sediment loss, and sediment carbon & nitrogen enrichment were evaluated.

(1) The results showed that: carbon addition significantly reduced runoff and sediment on slope farmland; runoff decreased by 13.7% – 53.2% and sediment by 32.7% – 59.1%. Under varying rainfall conditions, humic acid had a slightly better runoff-reduction effect than biochar did.

(2) Rainfall intensity regulated carbon & nitrogen enrichment in eroded sediment: under heavy-rain conditions the mean concentrations of total nitrogen and soil organic carbon in deposited sediment were higher than those under rainstorms; nitrogen and soil organic carbon showed positive enrichment in heavy rain but negative enrichment in rainstorms.

(3) Carbon addition significantly increased above/below-ground biomass and maize yield at the tasselling and maturity stages, with biochar outperforming humic acid in yield promotion. The crop-induced reduction in runoff and sediment increased with biomass; below-ground biomass contributed more to runoff and sediment reduction than above-ground biomass.

This study provides a scientific basis for optimizing carbon-addition technologies and for the green, high-quality development of mountainous agriculture.

Key words: carbon addition; sloping-farmland; biochar; humic acid; carbon & nitrogen enrichment; crop biomass

(责任编辑 钟雨倩)