

东北黑土区坡面侵蚀—沉积过程对土壤有机碳组分的影响

周笑¹, 王彬^{1,2}, 樊华³, 王文刚¹, 佟亚宁¹, 王俊¹, 李力国¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测
研究站, 北京 100083; 3. 黑龙江省水利科学研究院黑龙江省水土保持重点实验室, 哈尔滨 150080)

摘要: [目的] 旨在探讨土壤侵蚀-沉积过程对土壤有机碳组分的影响及其相互作用机制, 以加深对东北黑土区耕地碳库管理策略及土壤有机碳响应机制的理解。[方法] 以东北薄层黑土区(宾县)和厚层黑土区(克山县)典型坡耕地为对象, 采用¹³⁷Cs示踪技术定量评估土壤侵蚀强度, 明晰不同土壤侵蚀强度对坡面土壤有机碳组分特征的差异及其变化趋势, 揭示土壤侵蚀对土壤有机碳组分的影响机制。[结果] 薄层黑土区年平均土壤侵蚀模数为 2 822.99 t/(km²·a), 厚层黑土区年平均土壤侵蚀模数为 2 174.74 t/(km²·a)。土壤侵蚀—沉积速率是驱动土壤有机碳组分变化的主要因素, 随着土壤侵蚀速率的增加, 土壤有机碳组分显著减少, 且二者呈显著负相关。不同有机碳组分流失速率依次为 EOC>POC>MBC>DOC。[结论] 总氮(TN)是影响土壤有机碳及组分分布的关键因子, 而 C/N 比值、黏粒和砂粒质量分数对有机碳组分的分布具有显著影响。

关键词: 土壤侵蚀; ¹³⁷Cs核素示踪; 有机碳; 活性有机碳组分; 黑土

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

Impacts of Slope Erosion-Deposition Processes on Soil Organic Carbon Fractions in Black Soil Region of Northeast China

ZHOU Xiao¹, WANG Bin^{1,2}, FAN Hua³, WANG Wengang¹, TONG Yaning¹, WANG Jun¹, LI Liguol¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Jinyun Mountain Three-Gorges Reservoir Area (Chongqing) Forest Ecosystem Research Station, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Heilongjiang Province Key Laboratory of Soil and Water Conservation, Heilongjiang Province Hydraulic Research Institute, Harbin 150080, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the impacts of soil erosion-deposition processes on soil organic carbon (SOC) fractions and their interaction mechanisms, to enhance understanding of carbon stock management strategies and SOC response mechanisms in the cultivated black soil region of Northeast China [Methods] The research focused on typical sloping cultivated land in Bin County (thin-layer black soil) and Keshan County (thick-layer black soil). The ¹³⁷Cs tracing technique was employed to quantitatively assess soil erosion intensity, identify differences and trends in slope SOC fractions under different erosion intensities, and elucidate the mechanisms by which soil erosion affects SOC fractions. [Results] The annual average soil erosion modulus was 2 822.99 t/(km²·a) in the thin-layer black soil area and 2 174.74 t/(km²·a) in the thick-layer black soil area. Soil erosion-deposition rates were found to be the primary drivers of changes in SOC fractions. SOC fractions decreased significantly with increasing soil erosion rates, exhibiting a significant negative correlation. The loss rates of different SOC fractions were ranked as follows: EOC>POC>MBC>DOC. [Conclusion] Total nitrogen (TN) is identified as a key factor influencing the distribution of SOC and its

收稿日期: 2025-02-17

修回日期: 2025-03-31

录用日期: 2025-04-11

资助项目: 国家自然科学基金项目(42477338)

第一作者: 周笑(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zhouxiao@bjfu.edu.cn

通信作者: 王彬(1983—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。Email: wangbin1836@bjfu.edu.cn

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

fractions, while the C/N ratio, clay content, and sand content also have significant effects on the distribution of SOC fractions.

Keywords: soil erosion; ^{137}Cs tracing; organic carbon; active organic carbon fractions; black soil

Received: 2025-02-17

Revised: 2025-03-31

Accepted: 2025-04-11

有机碳是土壤主要的肥力成分,是影响土壤理化性质和作物产量的关键因素^[1]。作为全球碳循环的重要组成部分,土壤碳库的变化已成为全球气候变化的关键因素之一^[2]。土壤活性有机碳直接参与土壤碳循环,并作为微生物和植物养分供应的重要部分,其对环境变化的响应通常比土壤总有机碳更为敏感^[3]。土壤活性有机碳常用颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)、易氧化性有机碳(easily oxidizable carbon, EOC)、可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)和微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)表征^[4]。现有研究^[5]表明,不同有机碳组分之间相互作用,共同调控土壤碳库的平衡,是反映土壤质量与碳库变化的重要因子。

土壤侵蚀与土壤有机碳流失密切相关。土壤剥离、搬运、沉积等过程不仅伴随土壤团聚体破碎,而且导致有机碳的释放^[6]。在坡面侵蚀过程中,由于轻质土壤颗粒密度较小且比表面积较大,能够富集更多有机碳,这些土壤颗粒随着侵蚀过程被优先迁移;而粗重土壤颗粒所吸附的有机碳较少,并且容易沉积^[7]。这种分选作用通过改变土壤有机碳在地表的水平分布和剖面的垂直分布特征,进而影响有机碳的再分布过程,导致不同有机碳组分出现显著的差异性流失^[8]。近年来,许多研究探讨土壤侵蚀沉积过程对有机碳及其组分变化的影响,指出土壤侵蚀显著影响坡面土壤有机碳组分的空间分布特征。有研究^[9]发现,红壤表层沉积部位的DOC质量分数平均约为侵蚀部位的2倍。土壤侵蚀显著降低坡耕地表层土壤MBC,其中黑土、紫色土和红壤的MBC分别降低22.0%、25.5%和28.9%;随着侵蚀强度的增加,MBC逐渐下降^[10]。东北黑土区坡耕地土壤侵蚀导致土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)质量分数下降13.58%,其中MBC和POC分别下降7.52%和40.49%;土壤侵蚀速率与POC呈极显著负相关^[11]。土壤侵蚀—沉积过程不仅改变土壤有机碳组分的再分布,还显示不同有机碳组分对侵蚀的响应具有明显的土壤类型依赖性。然而,目前研究大多集中于侵蚀区和沉积区的有机碳组分变化,较少量化侵蚀速率对不同有机碳组分的影响,土壤有机碳组分在侵蚀—沉积环境下的动态变

化机制仍不清晰。作为一种放射性同位素, ^{137}Cs 已被广泛应用于土壤侵蚀研究,尤其在定量估算土壤侵蚀速率及揭示土壤侵蚀强度空间分异方面具有显著优势^[12]。通过 ^{137}Cs 示踪技术,可以量化土壤侵蚀与不同有机碳组分之间的关系,并明确这些组分在侵蚀—沉积过程中的迁移与累积规律,为揭示农业耕作条件下土壤侵蚀驱动的有机碳变化机制提供科学依据^[13]。

随着东北黑土区水土流失的加剧,土壤退化问题日益严重,主要表现为耕层厚度减少、有机质质量分数降低、土壤结构劣化等现象^[14]。土壤侵蚀引起的土壤退化不仅显著改变土壤理化性质,还扰动土壤有机碳组分的动态平衡^[15]。土壤侵蚀与有机碳组分之间的关系受到多种因素的共同作用,深入研究这些因素的相互作用机制对于理解和预测土壤有机碳对土壤侵蚀强度及环境变化的响应具有重要意义。为此,本研究以薄层黑土区(宾县)与厚层黑土区(克山县)坡耕地为研究对象,采用 ^{137}Cs 示踪技术定量评估2个区域的土壤侵蚀强度。通过分析坡面土壤侵蚀强度和土壤有机碳组分的关系,明确不同区域土壤侵蚀强度对土壤有机碳组分特征及其影响因素的差异。研究结果对于提高耕地土壤有机碳固存能力具有重要意义,并为解决黑土层“变薄变瘦”问题提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省哈尔滨市宾县东山沟小流域和齐齐哈尔市克山县英民小流域(图1)。宾县东山沟小流域($45^{\circ}43'13''\sim 45^{\circ}46'37''\text{N}$, $127^{\circ}31'04''\sim 127^{\circ}34'02''\text{E}$)属松嫩平原东部边缘的典型薄层黑土区,平均海拔约185 m,平均坡度约 3° ,年平均气温 4.8°C ,多年平均降水量约620 mm,黑土层平均厚度约20~40 cm,土壤平均侵蚀速率为 $2\,087\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,平均沉积速率为 $-1\,428.7\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,有机碳平均质量分数为 20.6 g/kg ^[16]。克山县英民小流域($48^{\circ}08'28''\sim 48^{\circ}06'22''\text{N}$, $125^{\circ}35'38''\sim 125^{\circ}38'31''\text{E}$)属于典型厚层黑土区,平均海拔约280 m,平均坡度 5° ,年平均气温 2.4°C ,多年平均降水量约499 mm,黑土层平均厚度约70~80 cm,土壤平均侵蚀速率为 $2\,122.5\text{ t}/$

($\text{km}^2 \cdot \text{a}$), 平均沉积速率为 $-1\ 185.6\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 有机碳平均质量分数为 $35.8\ \text{g}/\text{kg}$ [16]。2 个小流域研究区属寒温带大陆型季风区, 雨季降水集中在 6—9 月, 土壤类型以东北典型黑土为主, 地势平坦, 坡长 250~500 m, 土壤有机质质量分数较高, 水肥充足。研究流域的土地利用方式主要为耕地, 耕作方式均为垄作, 主要作物为玉米和大豆轮作。

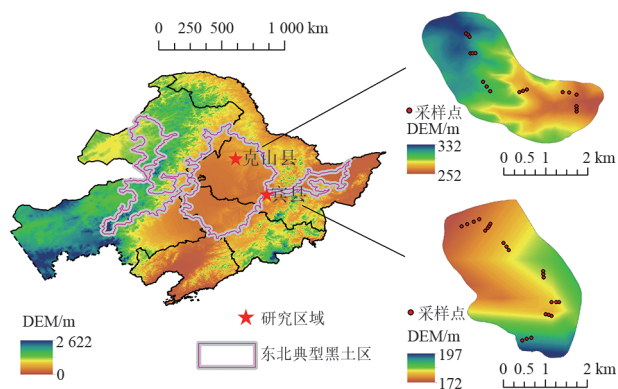


图1 研究区示意

Fig. 1 Schematic diagram of study area

1.2 土壤样品采集

于 2023 年 7 月开展野外调查与采样, 后续在水土保持国家林业和草原局重点实验室进行各项指标的测定。根据地形部位、表土层厚度和土壤侵蚀空间分布特征, 分别在东北薄层黑土区(宾县东山沟小流域)和厚层黑土区(克山县英民小流域)典型小流域的上、中、下游内分别选取 2~3 个典型坡面; 依据地形与侵蚀特征空间分布规律, 沿各典型坡面主坡向, 每隔 50~80 m 设置 1 个采样点, 在 2 个典型小流域分别选取采样点 23、18 个, 覆盖研究流域典型侵蚀-沉积部分。每样点按 0~20、20~40 cm 分层采集土壤剖面样品, 并用 $100\ \text{cm}^3$ 环刀采集各土层原状土壤, 分别对每个土层重复采样 3 次。参考研究区 ^{137}Cs 垂向分布深度约 35 cm 的研究 [12] 结果, 在各采样点使用自制环刀采集 0~40 cm 土壤样品, 以确保 ^{137}Cs 样品采集的完整性。同时以近百年来未扰动的坡顶林地作为 ^{137}Cs 背景值采样点。

采集的扰动土壤样品通过四分法均匀混合, 并选用 2 份样品用于不同分析。其中, 一部分存放于 $4\ ^\circ\text{C}$ 恒温冰箱中, 用于微生物生物量碳(MBC)、可溶性有机碳(DOC)的测定; 另一部分自然风干, 去除植物根系和石砾后, 通过 2 mm 筛网, 用于土壤理化性质、颗粒有机碳(POC)和易氧化有机碳(EOC)的测定。

1.3 样品处理与测定

^{137}Cs 样品处理与测定: 土壤样品风干后, 研磨过 2 mm 土壤筛后均匀混合, 取 320 g 装入特制样品盒

中, 使用 γ 能谱分析仪(美国 ORTEC, GEM-C55P4-RB)在 661.6 keV 处进行 ^{137}Cs 全峰面积的测定。单次样品测试时间约为 43 200 s, 测试误差为 $\pm 5\%$ 。

土壤理化性质测定: 土壤密度(bulk density, BD)采用环刀法测定; 土壤 pH 采用 pH 计测定, 土水比为 1:2.5; 土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾-外加热法测定; 土壤全氮(total nitrogen, TN)采用全自动化学分析仪 Smart Chem200(AMS-Westco)测定; 土壤全磷(total phosphorus, TP)采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 法测定。

土壤有机碳组分测定: 土壤颗粒有机碳(POC)采用六偏磷酸钠分离法测定; 土壤易氧化有机碳(EOC)采用高锰酸钾氧化法测定; 土壤可溶性有机碳(DOC)采用硫酸钾溶液浸提法测定; 土壤微生物生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 浸提法测定, 浸提液中的有机碳使用总有机碳分析仪 Elementar VARIO TOC CUBE 测定。

1.4 数据处理

基于测试得到样品 ^{137}Cs 质量活度, ^{137}Cs 面积活度采用 WALLING 法 [17] 计算:

$$\text{CPI} = \sum_{i=1}^n 1\ 000 \times C_i \times B_i \times D_i \quad (1)$$

式中: CPI(^{137}Cs point inventory)为采样点的 ^{137}Cs 面积活度, Bq/m^2 ; i 为采样层的层序号; n 为采样层数; C_i 为第 i 层的 ^{137}Cs 质量活度, Bq/kg ; B_i 为第 i 层的土壤密度, g/cm^3 ; D_i 为第 i 层的采样深度, m。

土壤侵蚀量采用张信宝等 [18] 提出的修正质量平衡模型计算:

$$A_{(t)} = A_{\text{ref}} \left(1 - \frac{h}{H} \right)^{N-1963} \quad (2)$$

式中: $A_{(t)}$ 为土壤剖面 ^{137}Cs 面积活度, Bq/m^2 ; A_{ref} 为 ^{137}Cs 的背景值, Bq/m^2 , 经测定本研究的背景值为 $2\ 440\ \text{Bq}/\text{m}^2$, 与 AN 等 [12] 和何彦星等 [11] 同在黑土区测定的背景值结果 $2\ 378$ 、 $2\ 500\ \text{Bq}/\text{m}^2$ 接近; H 为耕作层厚度, cm; h 为年均土壤流失厚度, cm/a; N 为取样年份。

土壤侵蚀模数可表示为:

$$E = 10^4 \rho h \quad (3)$$

式中: E 为土壤侵蚀模数, $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$; ρ 为土壤密度, g/cm^3 ; 10^4 为单位转换系数。

本研究采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和多重比较(least significant difference, LSD)分析不同侵蚀强度对土壤理化性质及土壤碳组分的影响, 显著水平为 $\alpha=0.05$ 。同时, 采用回归分析探讨土壤侵蚀、沉积速率与有机碳组分之间的关系。为精准评估模型拟合效果, 使用修正决定系数(R^2)衡量模型对数据的解释程度, 避免因自变量数量的差异对

决定系数产生潜在干扰。采用 Pearson 相关性分析探讨不同土层的土壤理化性质、有机碳组分等数据之间的相关性。通过冗余分析(RDA)探讨土壤理化性质对土壤有机碳组分的影响及解释贡献率。数据整理与分析采用 Excel 2019、SPSS 26.0、Canoco 5 软件进行,采用 ArcGis 10.8、Origin Pro 2021 软件进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 典型薄层和厚层黑土区土壤侵蚀沉积速率基本特征

^{137}Cs 示踪结果表明,薄层黑土区(宾县)与厚层黑土区(克山)的土壤侵蚀、沉积速率存在显著差异($p < 0.05$)。薄层黑土区侵蚀速率为 $343.69 \sim 11\,433.3 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,平均侵蚀速率为 $4\,118.35 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;沉积速率为

$-1\,225.16 \sim -269.55 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,平均沉积速率为 $-1\,325.41 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。厚层黑土区侵蚀速率为 $349.41 \sim 6\,917.10 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,平均侵蚀速率为 $2\,944.38 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;沉积速率为 $-655.48 \sim -373.81 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,平均沉积速率为 $-518.98 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (表 1)。薄层黑土区年平均土壤侵蚀模数为 $2\,822.99 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,而厚层黑土区年平均土壤侵蚀模数为 $2\,174.74 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。根据水利部颁布的土壤侵蚀分级分类标准(SL 190—2007),薄层黑土区属于中度侵蚀,厚层黑土区属于轻度侵蚀,均超过东北黑土区容许流失量 T 值 $200 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,与 XIE 等^[19]基于 CSLE 模型估算的东北黑土区侵蚀速率空间分布范围一致,进一步验证研究区域土壤侵蚀特征的可靠性。

表 1 典型薄层和厚层黑土区坡面侵蚀—沉积速率

Table 1 Soil erosion-deposition rates on typical thin-layer and thick-layer black soil slopes

土壤类型	侵蚀/沉积强度等级	范围/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	样本量	土壤侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)			变异系数	
				最小值	最大值	平均值±标准差		
薄层黑土(宾县)	沉积	DS	<0	6	—1 225.16	—269.55	—847.19±370.39	—0.44
	轻度	LE	200~2 500	7	594.13	1 752.88	1 038.99±356.19	0.34
	中度	ME	2 500~5 000	4	3 152.76	4 826.19	4 031.34±605.39	0.15
	强烈	IE	5 000~8 000	3	5 632.33	6 203.48	5 999.07±259.89	0.04
	极强烈	SE	8 000~15 000	3	8 513.44	11 433.35	9 538.82±1 341.15	0.14
厚层黑土(克山)	沉积	DS	<0	4	—655.48	—373.81	—518.98±127.27	—0.25
	轻度	LE	200~2 500	7	349.41	2 103.28	1 295.55±511.10	0.42
	中度	ME	2 500~5 000	4	3 354.89	4 001.69	3 500.12±456.74	0.13
	强烈	IE	5 000~8 000	3	5 627.88	6 917.10	6 185.84±540.40	0.09

注:正值(+)表示侵蚀,负值(-)表示沉积。下同。

2.2 不同侵蚀强度下的土壤理化性质特征

薄层黑土(宾县)与厚层黑土(克山)的 SOC、TN、TP、BD、pH、C/N 比、黏粒、粉粒、砂粒质量分数均存在极显著差异($p < 0.01$)(图 2)。薄层黑土 SOC、TN、TP、C/N 比分别为 $3.76 \sim 20.4 \text{ g}/\text{kg}$ 、 $0.43 \sim 1.63 \text{ g}/\text{kg}$ 、 $0.32 \sim 1.1 \text{ g}/\text{kg}$ 、 $5.95 \sim 17.15$,厚层黑土 SOC、TN、TP、C/N 比分别为 $16.95 \sim 33.57 \text{ g}/\text{kg}$ 、 $1.48 \sim 2.55 \text{ g}/\text{kg}$ 、 $0.60 \sim 1.14 \text{ g}/\text{kg}$ 、 $10.53 \sim 14.35$ 。厚层黑土的土壤养分显著高于薄层黑土($p < 0.01$),其 SOC、TN、TP 质量分数分别是薄层黑土的 1.96、1.83、1.35 倍。不同侵蚀强度下,薄层黑土和厚层黑土 SOC、TN 质量分数均表现为 $\text{DS} > \text{LE} > \text{ME} > \text{IE}(\text{SE})$ 的趋势。土壤 C/N 比在沉积环境达到最大值,而在侵蚀环境下随侵蚀强度的增大呈先减小后增大趋势。土壤质地分析结果表明,薄层黑土的黏粒比厚层黑土低 21.32%,粉粒和砂粒则分别高出 10.01% 和 3.41%。不同侵蚀强度下,薄层黑土黏粒表现为 $\text{LE} > \text{DS} > \text{ME} > \text{IE} > \text{SE}$,而厚层黑土

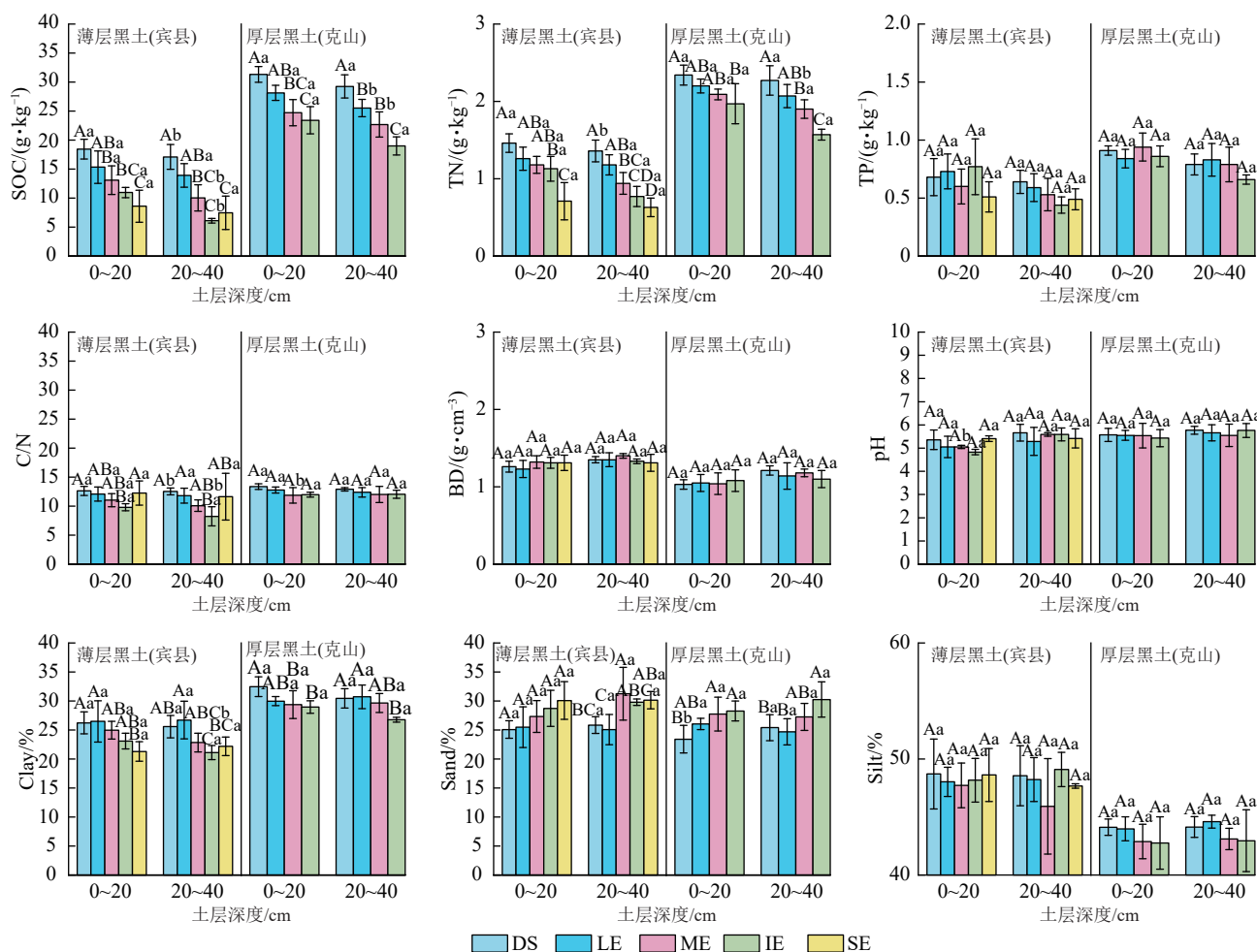
的黏粒则为 $\text{DS} > \text{LE} > \text{ME} > \text{IE}$ 。土壤砂粒随土壤侵蚀强度的增大而显著增大。薄层黑土 BD 为 $1.06 \sim 1.49 \text{ g}/\text{cm}^3$,厚层黑土 BD 为 $0.81 \sim 1.32 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。2 个区域 BD 在不同侵蚀强度下未表现出显著差异($p > 0.05$)。随着土层深度的增加,2 个区域黑土的 BD 和 pH 在侵蚀和沉积部位均有上升趋势,而 SOC、TN、TP 则呈下降趋势。对于不同土层的土壤黏粒、粉粒、砂粒,不同侵蚀强度下未发现显著差异($p > 0.05$)。综上所述,土壤侵蚀强度显著影响薄层与厚层黑土的 SOC、TN 及其分布,同时改变土壤的 C/N 比和质地组成。

2.3 土壤有机碳组分分布对侵蚀强度的响应

侵蚀强度对研究区土壤有机碳组分分布有显著影响($p < 0.05$)(图 3)。与轻度侵蚀相比,中度、强烈、极强烈侵蚀强度下,土壤 POC 的平均降幅分别为 23.79%、30.27%、71.12%;EOC 平均降幅分别为 13.86%、23.00%、62.79%;DOC 的平均降幅分别为 6.81%、14.49%、33.02%;而 MBC 的平均降幅为

12.02%、18.54%、70.69%。表明土壤侵蚀显著加剧土壤有机碳的流失,并且随着侵蚀强度的增大,各有机碳组分的流失速率呈递增趋势。在沉积与侵蚀部位,POC的分布与其他有机碳组分存在明显差异。2个研究区的POC在不同的侵蚀强度下表现为 $LE > DS > ME > IE(SE)$ 。与坡面沉积部位相比,薄层黑土区和厚层黑土的POC均在轻度侵蚀部位呈现累积现象,分别增大12.7%和7.56%。薄层黑土和厚层黑土EOC在沉积部位的质量分数分别为侵蚀部位的1.37、1.21倍,MBC分别为侵蚀部位的1.66、1.19倍,DOC分别为侵蚀部位的1.89、1.48倍。EOC、POC和MBC均在侵蚀部位表现出随侵蚀强度增加而减少的趋势;而在同一侵蚀强度下,随着土

层深度的增加,这些组分普遍下降。与表层土壤相比,下层土壤各有机碳组分的降幅为 $MBC(21.03\%) > DOC(20.42\%) > EOC(20.1\%) > POC(17.98\%)$ 。其中,土壤MBC在极强烈侵蚀条件下的下降幅度远大于其他有机碳组分。土壤有机碳组分的变异系数为31.93~64.40,其变异程度由大到小依次为 $POC > DOC > EOC > MBC$ 。在极强烈侵蚀条件下,POC、EOC和MBC的变异系数显著高于其他侵蚀强度等级。综上所述,土壤侵蚀强度的增加显著加剧土壤有机碳组分流失,并且各组分对土壤侵蚀强度的响应程度随着侵蚀强度的增大而增强。尤其在极强烈侵蚀条件下,土壤有机碳组分的变化最为显著。



注:不同大写字母表示相同土层深度不同侵蚀强度间差异显著($p < 0.05$);不同小写字母表示相同侵蚀强度不同土层深度间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图2 不同侵蚀强度下的土壤理化性质特征

Fig. 2 Soil physicochemical characteristics under different erosion intensities

研究区土壤侵蚀速率与土壤各有机碳组分之间存在显著的线性负相关(图4),即土壤有机碳组分均随土壤侵蚀速率的增加而降低。对于表层土壤(0~20 cm),薄层黑土区坡面侵蚀速率与POC、DOC、EOC、MBC的修正决定系数分别为0.29、

0.30、0.67、0.50;而厚层黑土区的侵蚀速率与POC、DOC、EOC、MBC的修正决定系数分别为0.18、0.27、0.45、0.35,表明土壤侵蚀和沉积速率对不同有机碳组分的影响存在差异,其中EOC和MBC受影响最大,且薄层黑土区的影响较厚层黑土区更为显

著。不同侵蚀强度下,土壤有机碳组分的流失速率排序为 $EOC > POC > MBC > DOC$ 。具体来说,厚层黑土区土壤侵蚀导致的 POC、DOC、EOC 的流失速率均高于薄层黑土,而 MBC 的流失速率则低于薄层黑土。厚层黑土区 POC、DOC、EOC 的流失速率分别为薄层黑土的 2.51、1.39、1.59 倍,而薄层黑土的 MBC 流失速率是厚层黑土的 1.62 倍。表明不同区域的土壤有机碳流失速率存在明显差异。在不同土层深度上,表层土壤的 POC、EOC 和 MBC 的下降速率均高于下层土壤,而 DOC 的下降速率则表现为下层土壤大于表

层土壤。是因为表层土壤是侵蚀-沉积过程活跃区,且受耕作等农田管理活动的频繁扰动,导致表层土壤中 POC、EOC、MBC 等物质以颗粒态形式随土壤颗粒迁移快速流失。而土壤 DOC 主要以溶解态形式存在,随着水分入渗,DOC 随剖面入渗发生迁移^[20]。由于下层土壤的水分保持能力较强,因此 DOC 在下层土壤的流失速率更为明显。综上所述,有机碳组分对土壤侵蚀的响应存在差异,其中 EOC 的流失速率相对较大。同时,土壤侵蚀对有机碳组分的影响受到区域环境条件和土壤垂直结构的共同作用。

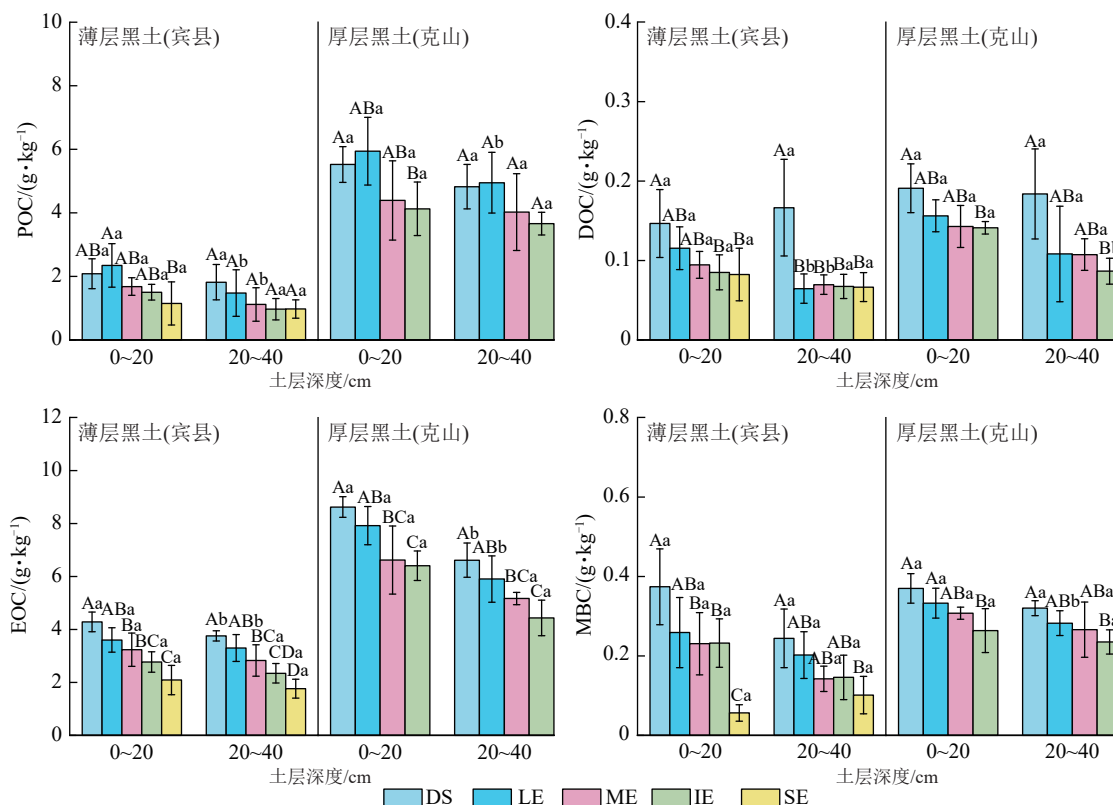


图 3 不同侵蚀—沉积强度下的土壤有机碳组分特征

Fig. 3 Characteristics of soil organic carbon fractions under different erosion-deposition intensities

2.4 侵蚀—沉积环境下土壤理化性质与土壤有机碳组分的关系

2 个研究流域均表现出 SOC、TN、C/N、TP 与土壤有机碳组分之间的极显著正相关 ($p < 0.01$) (图 5)。具体而言, SOC 与 POC、EOC、MBC、DOC 呈显著正相关,表明有机碳组分之间的相互作用关系密切,共同影响土壤有机碳的周转过程。pH 与 EOC、MBC 之间也呈显著正相关 ($p < 0.05$)。土壤黏粒与 POC、EOC、MBC 之间表现出极显著正相关 ($p < 0.01$),同时与 DOC 也表现出显著正相关 ($p < 0.05$)。相对而言,土壤密度和砂粒与土壤有机碳及各组分之间呈显著负相关 ($p < 0.05$)。与砂粒相比,土壤黏粒与土壤有机碳之间的相关性更为紧密。表明土壤质地,尤其是黏粒,对土壤有机

碳组分分布和积累发挥着重要作用。进一步通过冗余分析 (RDA),以土壤理化性质为解释变量,以有机碳及其组分为响应变量进行分析。结果表明, Axis-1 和 Axis-2 分别解释土壤有机碳组分的 65.06% 和 2.84%,总体解释率为 69.82% (图 6)。不同土壤理化性质对有机碳及其组分的影响存在差异。经 Monte Carlo 置换检验发现, TN 和 C/N 是影响土壤有机碳及其组分的关键因子,解释率分别为 63.0% 和 2.5% ($p = 0.002$)。黏粒和砂粒对土壤有机碳组分的影响也达到显著水平 ($p < 0.05$),其解释率分别为 1.9% 和 1.4%。表明 TN 是影响薄层和厚层黑土区土壤有机碳组分的关键环境因子,而 C/N 比、黏粒和砂粒对土壤碳的动态具有显著影响。

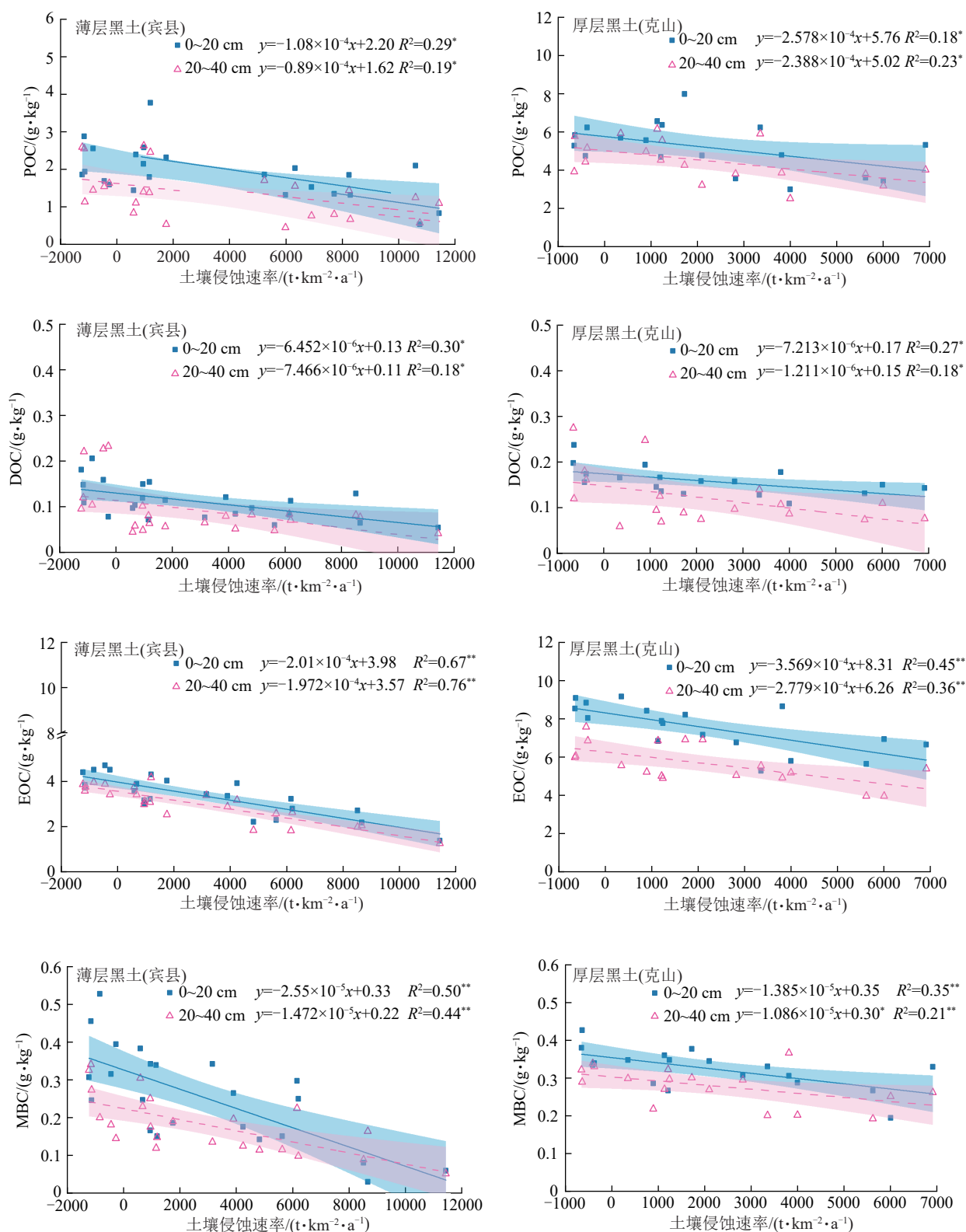


图4 土壤有机碳组分与土壤侵蚀-沉积速率的关系

Fig. 4 Relationship between soil organic carbon fractions and soil erosion-deposition rates

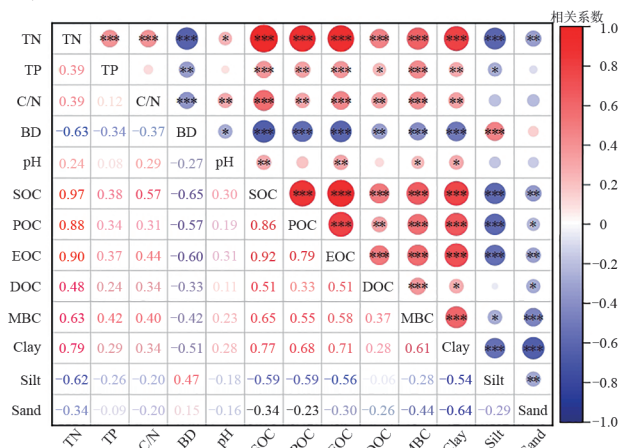
3 讨论

3.1 土壤侵蚀强度对不同有机碳组分流失的作用

土壤活性有机碳组分是反映土壤碳库动态变化的关键指标,在东北黑土区土壤侵蚀防治中具有重要的指示作用。本研究结果表明,不同土壤侵蚀强度下,土

壤有机碳组分的流失和分布表现出显著差异。随着侵蚀强度的增加,东北薄层黑土区和厚层黑土区典型坡面侵蚀部位的有机碳组分呈下降趋势。极强烈侵蚀条件下,有机碳组分的变异系数明显高于其他侵蚀强度等级,表明极强烈侵蚀下土壤有机碳受侵蚀作用的波

动性更大。与轻度侵蚀相比,极强烈侵蚀条件下的 POC、EOC、DOC、MBC 的平均降幅分别为 71.12%、62.79%、33.02% 和 70.69%。表明极强烈侵蚀作用下,土壤有机碳的损失更加显著且不稳定。



注: *表示 $p \leq 0.05$; **表示 $p \leq 0.01$; ***表示 $p \leq 0.001$ 。

图 5 土壤有机碳组分与土壤理化性质的相关关系

Fig. 5 Correlation between soil organic carbon fractions and soil physicochemical properties

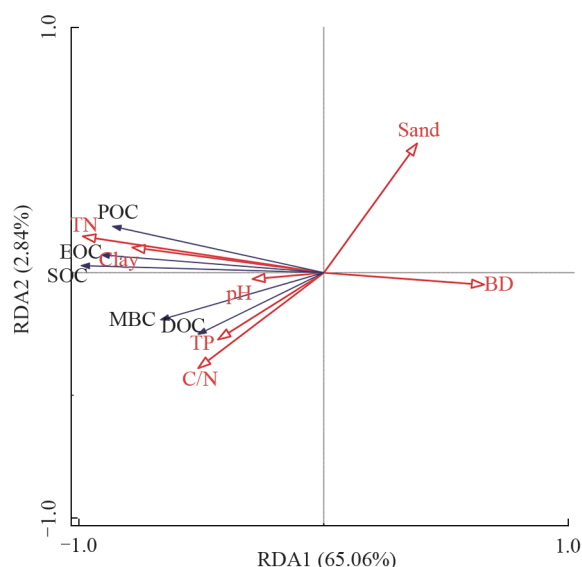


图 6 土壤理化性质对土壤有机碳组分影响的冗余分析

Fig. 6 Redundancy analysis of effects of soil physicochemical properties on soil organic carbon fractions

土壤侵蚀不仅直接影响土壤的物理结构,破坏土壤团聚体,增加有机碳组分随径流流失的潜力,而且导致土壤养分的流失,尤其是在极强烈侵蚀下,土壤 MBC 的降幅显著增大。一方面,土壤侵蚀对土壤理化性质的影响,如土壤透气性、温度、水分异质性等,均改变土壤微生物活性^[21];另一方面,土壤侵蚀伴随着表层土壤养分的显著降低,减少土壤微生物可利用的养分,进一步抑制微生物的生长和繁殖^[22]。本研究表明, SOC 和 TN 在侵蚀过程中发生迁移,直接导致侵蚀部位土壤养分的下降,验证了上述推测。特别是

在极强烈侵蚀作用下,土壤 C/N 显著增大,进一步限制土壤微生物的活动。已有研究^[23]指出,土壤有机碳组分在侵蚀作用下发生显著变化,尤其是泥沙流失的过程中土壤微生物的活动环境发生改变,进而影响土壤有机碳的分布。本研究发现,随着土壤侵蚀强度的增大,土壤有机碳组分的流失加剧,尤其是 EOC 和 MBC 的流失更加明显。在沉积部位,土壤有机碳组分的分布与侵蚀部位有显著差异,特别是在表层土壤的 POC 未表现出累积现象,而 DOC、EOC、MBC 则在沉积部位表现出更高的水平。与何彦星等^[11]通过 ¹³⁷Cs 示踪方法获得的研究结果存在差异,可能与本研究区坡面形态特征的差异有关。本研究区均选择为直形坡面,而凸形坡因其复杂的地形特征,促进土壤颗粒的沉积和再侵蚀,从而使有机碳组分在沉积部位的体积分数较高^[24]。POC 在随着径流和土壤颗粒迁移的过程中,容易被土壤微生物利用分解,因此在沉积部位较难累积^[25]。沉积部位中 DOC、EOC、MBC 较侵蚀部位高的现象可能与土壤颗粒经过径流和泥沙搬运后,在沉积部位发生聚集和再团聚作用有关。此物理过程有助于形成更稳定的土壤结构,从而保护土壤中的有机碳组分^[26]。表明土壤侵蚀对有机碳组分的变化有显著影响,尤其是 EOC 和 MBC,在侵蚀过程中更易发生迁移,并在沉积部位累积。

3.2 土壤侵蚀与沉积速率对有机碳流失的驱动作用

土壤侵蚀和沉积速率是驱动土壤有机碳组分变化的 2 个重要因素。不同土壤有机碳组分的流失速率存在差异。EOC 和 MBC 易受土壤微生物的分解和矿化作用影响,本研究发现,土壤侵蚀速率对 EOC 和 MBC 的影响较为显著。土壤 EOC 作为生物化学循环的直接参与者,显著影响土壤养分的有效性^[5]。本研究中, EOC 与 SOC 变化趋势一致且相关系数最大,表明土壤侵蚀导致的土壤有机碳流失主要表现为 EOC 的下降。相比之下, POC 与土壤颗粒紧密结合,容易随土壤颗粒迁移而流失,但其流失量可以通过作物残体的新碳输入得到一定弥补,导致土壤侵蚀-沉积速率对 POC 的影响程度减小^[27]。DOC 则以溶解态存在于土壤水分中,尽管受到侵蚀作用影响,但其迁移和流失速率通常较慢。因此,土壤有机碳组分的流失速率从大到小依次为 EOC > POC > MBC > DOC,与已有研究一致,表明土壤有机碳的流失包含随径流或泥沙流失的 2 种方式,其中随泥沙流失的有机碳占主导地位^[28]。本研究还发现, DOC 的流失速率远低于其他有机碳组分,而 POC 的流失速率约为 DOC 的 23 倍。揭示在土壤侵蚀过程中,颗粒态有机碳具有更高的迁移活性,易随侵蚀作用被搬运转运;而溶解态有机碳则表现出较低的流失倾

向,具有较强的稳定性。

土壤侵蚀速率与土壤有机碳组分之间呈极显著线性关系,与前期基于¹³⁷Cs示踪法^[11,21]或控制条件模拟试验^[28-29]开展的土壤侵蚀与有机碳关系的研究结果一致。根据中国水土保持公报^[30]统计,东北黑土区水土流失面积为208 857 km²,其中轻度、中度、强烈及以上水土流失面积分别占比79.9%、12.36%和7.74%。结合本研究土壤侵蚀速率与土壤有机碳组分之间的线性关系(表2),

可以估算2023年东北黑土区因土壤侵蚀造成的土壤有机碳流失量为5.46×10⁵ t,其中POC、EOC、DOC和MBC流失量分别为8.12×10⁴、1.21×10⁵、3.5×10³、8.37×10³t。大规模的土壤有机碳流失不仅严重影响东北黑土区生态系统的碳平衡,还对全球气候变化构成潜在风险。因此,实施有效的土壤侵蚀保护措施,减缓土壤有机碳流失,防止黑土层“变薄、变瘦、变硬”,对提升土地生产力、增强生态系统固碳能力具有重要意义。

表 2 土壤有机碳组分与土壤侵蚀速率的回归方程

Table 2 Regression equations of soil organic carbon fractions and soil erosion rates				
指标	类型区	回归方程	修正决定系数(R ²)	相关系数(r)
SOC	薄层黑土区(宾县)	$y = -1.00 \times 10^{-3}x + 16.09$	0.64	-0.804**
	厚层黑土区(克山)	$y = -1.28 \times 10^{-3}x + 28.75$	0.58	-0.772**
	黑土区	$y = -1.28 \times 10^{-3}x + 22.09$	0.26	-0.518**
POC	薄层黑土区(宾县)	$y = -0.99 \times 10^{-4}x + 1.91$	0.22	-0.485**
	厚层黑土区(克山)	$y = -2.48 \times 10^{-4}x + 5.39$	0.20	-0.473**
	黑土区	$y = -1.90 \times 10^{-4}x + 3.53$	0.08	-0.311**
EOC	薄层黑土区(宾县)	$y = -1.99 \times 10^{-4}x + 3.77$	0.68	-0.828**
	厚层黑土区(克山)	$y = -3.17 \times 10^{-4}x + 7.29$	0.23	-0.504**
	黑土区	$y = -2.83 \times 10^{-4}x + 5.42$	0.17	-0.426**
DOC	薄层黑土区(宾县)	$y = -6.96 \times 10^{-6}x + 0.12$	0.23	-0.508**
	厚层黑土区(克山)	$y = -9.66 \times 10^{-6}x + 0.16$	0.17	-0.446**
	黑土区	$y = -8.20 \times 10^{-6}x + 0.14$	0.21	-0.473**
MBC	薄层黑土区(宾县)	$y = -2.01 \times 10^{-5}x + 0.28$	0.41	-0.651**
	厚层黑土区(克山)	$y = -1.24 \times 10^{-5}x + 0.33$	0.25	-0.542**
	黑土区	$y = -1.96 \times 10^{-5}x + 0.30$	0.35	-0.603**

3.3 土壤侵蚀影响下的有机碳组分分布差异及其作用机制

薄层黑土区和厚层黑土区土壤有机碳组分分布存在显著差异,且土壤侵蚀对土壤有机碳组分的影响显著。本研究结果表明,有机碳组分的变化主要源于土壤侵蚀过程对其破坏与搬运,而非区域土壤性质的固有差异。随着土壤侵蚀强度的增加,2个区域的土壤有机碳组分均表现出减少趋势,但其影响程度有所不同。特别是在薄层黑土区,有机碳组分与土壤侵蚀速率的相关性显著高于厚层黑土,表明薄层黑土对土壤侵蚀的响应更敏感,且在侵蚀过程中有机碳及其组分更易流失。同时发现,土壤有机碳组分与土壤理化性质关系密切。土壤侵蚀引发土壤理化性质的显著变化,如土壤颗粒的重新分布、养分流失及土壤结构的破坏,进一步影响土壤有机碳组分的分布,导致其不同区域表现出侵蚀响应差异。例如,TN和C/N比对土壤有机碳组分的影响最大。TN作为植物生长的重要营养元素,促进植物根系生长和土壤微生物的活性,增强土壤团聚体的稳定性^[31]。然而,薄层黑土中较低的TN影响作物生长,降低植物的氮利用率和根系生长,进一步抑制土

壤有机碳的积累。根系分泌物中有机碳是土壤微生物的重要碳源,对土壤有机碳的形成和积累起到关键作用^[4]。因此,土壤侵蚀在薄层黑土区不仅一定程度上限制作物的生长,还抑制土壤有机碳的积累。同时,高C/N对土壤微生物活性有一定限制^[32],使得厚层黑土区的有机碳组分更不易被微生物分解。在厚层黑土区,较高的C/N有助于抑制有机碳的矿化,维持较高的有机碳。同时,土壤黏粒和砂粒对土壤有机碳组分的影响也具有显著作用($p < 0.05$)。土壤黏粒由于其较大的比表面积和高电荷密度,能够吸附土壤中的有机物质,形成有机-无机复合体,通过物理保护机制降低微生物对土壤有机质的分解速率,有助于土壤有机碳的稳定和积累^[33]。在黏粒较高的厚层黑土区,这种物理保护作用较薄层黑土更为显著,导致土壤侵蚀对厚层黑土有机碳组分的影响相对较小。综上所述,土壤有机碳组分受多种土壤性质的显著影响。土壤侵蚀导致表层土壤养分流失,薄层黑土区表现出更为明显的有机碳积累限制现象。相比之下,厚层黑土区由于较高的TN促进植物根际环境改善,增强微生物群落活性,从而提升土壤团聚体稳定性,减少有机碳损失。在东北黑土区,随

着土壤侵蚀速率的增加,土壤退化和土层变薄导致的有机碳组分流失的风险加剧^[34]。因此,土壤侵蚀对有机碳组分的影响机制应受到高度关注,特别是TN、C/N、黏粒等因素在这一过程中发挥的重要作用。深入研究这些因素的作用机制,有助于制定更加精准的黑土资源保护策略,减缓侵蚀对有机碳流失的影响,保障黑土区土壤质量的稳定,进而推动可持续农业与生态保护实践。

4 结 论

1)¹³⁷Cs示踪分析表明,典型薄层黑土区和厚层黑土区土壤侵蚀模数存在显著差异。薄层黑土区的年平均土壤侵蚀模数为2 822.99 t/(km²·a),显著高于厚层黑土区的2 174.74 t/(km²·a)。

2)土壤侵蚀强度对薄层黑土和厚层黑土的SOC、TN及其分布具有显著影响。厚层黑土的土壤养分显著高于薄层黑土,其中SOC、TN、TP分别为薄层黑土的1.96、1.83、1.35倍。随着土壤侵蚀强度的增加,研究区的SOC、TN均显著下降,表现为DS>LE>ME>IE>SE。TN是影响研究区土壤有机碳及其组分分布的关键因子,而C/N、黏粒和砂粒对有机碳组分的分布也起着显著作用。

3)土壤侵蚀—沉积速率是土壤有机碳组分变化的主要驱动因素。随着土壤侵蚀强度的增加,EOC、POC和MBC等有机碳组分显著减少。在极强烈侵蚀条件下,POC、EOC、DOC和MBC的平均降幅分别为71.12%、62.79%、33.02%、70.69%,变化幅度显著高于轻度侵蚀。土壤有机碳组分的流失速率排序为EOC>POC>MBC>DOC,且土壤侵蚀速率与土壤各有机碳组分之间存在显著的负线性关系。

参考文献:

- [1] LAL R, NEGASSA W, LORENZ K. Carbon sequestration in soil[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2015, 15: 79-86.
- [2] 王磊, 高阳, 沈振. 气候变化背景下农田土壤碳储量评估方法研究进展[J]. 农业工程学报, 2024, 40(16): 1-11.
WANG L, GAO Y, SHEN Z. Research progress on the assessment methods for agricultural soil carbon storage under climate change [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(16): 1-11.
- [3] ZORNOZA R, ACOSTA J A, BASTIDA F, et al. Identification of sensitive indicators to assess the interrelationship between soil quality, management practices and human health[J]. Soil, 2015, 1(1): 173-185.
- [4] 史登林, 王小利, 段建军, 等. 氮肥减量配施生物炭对黄壤稻田土壤有机碳活性组分和矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4117-4124.
SHI D L, WANG X L, DUAN J J, et al. Effects of chemical N fertilizer reduction combined with biochar application on soil organic carbon active components and mineralization in paddy fields of yellow soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(12): 4117-4124.
- [5] 王斐, 马锐豪, 夏开, 等. 森林转换对土壤活性有机碳组分的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 233-240.
WANG F, MA R H, XIA K, et al. Response of soil labile organic carbon fractions to forest conversions [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 233-240.
- [6] HE Y X, ZHANG F B, YANG M Y, 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: e108283.
- [7] 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.
- [8] BALONTAYOVÁ E, PETLUŠOVÁ V, PETLUŠ P, et al. Soil organic carbon and its labile fractions in the conditions of water erosion on arable land of Chernozems area [J]. Soil and Water Research, 2024, 19(2): 90-99.
- [9] ZHANG X Q, LI Z W, NIE X D, et al. The role of dissolved organic matter in soil organic carbon stability under water erosion [J]. Ecological Indicators, 2019, 102: 724-733.
- [10] LI Y, WEI S Z, WANG H N, et al. Responses of soil microbial biomass carbon and microbial entropy to soil properties in typical sloping croplands of China under erosion conditions [J]. European Journal of Soil Biology, 2024, 122: e103660.
- [11] 何彦星, 张凤宝, 杨明义. ¹³⁷Cs示踪分析东北黑土坡耕地土壤侵蚀对有机碳组分的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(14): 60-68.
HE Y X, ZHANG F B, YANG M Y. Effects of soil erosion on organic carbon fractions in black soils in sloping farmland of northeast China by using ¹³⁷Cs tracer measurements [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(14): 60-68.
- [12] AN J, ZHENG F L, WANG B. Using ¹³⁷Cs technique to investigate the spatial distribution of erosion and deposition regimes for a small catchment in the black soil region, northeast China [J]. Catena, 2014, 123: 243-251.
- [13] ZHOU S X, LI P, ZHANG Y. Factors influencing and changes in the organic carbon pattern on slope surfaces induced by soil erosion [J]. Soil and Tillage Research, 2024, 238: e106001.
- [14] FANG H Y, SUN L Y, QI D L, et al. Using ¹³⁷Cs technique to quantify soil erosion and deposition rates in an agricultural catchment in the black soil region, north-

- east China[J]. *Geomorphology*, 2012, 169: 142-150.
- [15] VAN OOST K, SIX J. Reconciling the paradox of soil organic carbon erosion by water [J]. *Biogeosciences*, 2023, 20(3): 635-646.
- [16] WANG Y F, AN X B, ZHENG F L, et al. Effects of soil erosion-deposition on corn yields in the Chinese mollisol region[J]. *Catena*, 2024, 240: e108001.
- [17] WALLING D E, HE Q, BLAKE W. Use of ^{7}Be and ^{137}Cs measurements to document short- and medium-term rates of water-induced soil erosion on agricultural land[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(12): 3865-3874.
- [18] ZHANG X B, WALLING D E, HE Q. Simplified mass balance models for assessing soil erosion rates on cultivated land using caesium-137 measurements [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1999, 44(1): 33-45.
- [19] XIE Y, LIN H H, YE Y, et al. Changes in soil erosion in cropland in northeastern China over the past 300 years[J]. *Catena*, 2019, 176: 410-418.
- [20] 肖胜生, 房焕英, 余小芳, 等. 壤中流驱动下可溶性有机碳迁移的研究进展[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(3): 155-161.
- XIAO S S, FANG H Y, YU X F, et al. Advances of the migration of dissolved organic carbon driven by inter-flow [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(3): 155-161.
- [21] 冯志珍, 郑粉莉, 易祯. 薄层黑土微生物生物量碳氮对土壤侵蚀—沉积的响应[J]. *土壤学报*, 2017, 54(6): 1332-1344.
- FENG Z Z, ZHENG F L, YI Y. Responses of microbial biomass carbon and nitrogen to erosion and deposition in black soil thin in depth[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6): 1332-1344.
- [22] 李威闻, 黄金权, 齐瑜洁, 等. 土壤侵蚀条件下土壤微生物生物量碳含量变化及其影响因素的Meta分析[J]. *生态环境学报*, 2023, 32(1): 47-55.
- LI W W, HUANG J Q, QI Y J, et al. Meta-analysis of soil microbial biomass carbon content and its influencing factors under soil erosion[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, 32(1): 47-55.
- [23] QIU L P, ZHANG Q, ZHU H S, et al. Erosion reduces soil microbial diversity, network complexity and multifunctionality Open Access [J]. *The ISME Journal*, 2021, 15(8): 2474-2489.
- [24] 隗晓琪, 吴松柏. 坡形对坡面侵蚀过程的影响机制研究[J]. *中国农村水利水电*, 2023(7): 117-123.
- WEI X Q, WU S B. Research on the effects of the slope shape on the soil erosion process on the sloping surface [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023(7): 117-123.
- [25] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 东北黑土区坡耕地表层土壤颗粒有机碳和团聚体结合碳的空间分布[J]. *生态学报*, 2006, 26(9): 2847-2854.
- FANG H J, YANG X M, ZHANG X P, et al. Spatial distribution of particulate organic carbon and aggregate associated carbon in topsoil of a sloping farmland in the Black Soil region, northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 2847-2854.
- [26] SMITH S V, RENWICK W H, BUDDEMEIER R W, et al. Budgets of soil erosion and deposition for sediments and sedimentary organic carbon across the conterminous United States [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(3): 697-707.
- [27] CHENG S L, FANG H J, ZHU T H, et al. Effects of soil erosion and deposition on soil organic carbon dynamics at a sloping field in black soil region, northeast China [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 56(4): 521-529.
- [28] 郭太龙, 谢金波, 孔朝晖, 等. 华南典型侵蚀区土壤有机碳流失机制模拟研究[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(8): 1266-1273.
- GUO T L, XIE J B, KONG C H, et al. Experimental study on soil organic carbon loss in red soil erosion under different simulated rainfall intensity and slope gradient [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(8): 1266-1273.
- [29] 贾松伟, 贺秀斌, 陈云明, 等. 黄土丘陵区土壤侵蚀对土壤有机碳流失的影响研究[J]. *水土保持研究*, 2004, 11(4): 88-90.
- JIA S W, HE X B, CHEN Y M, et al. Effect of soil erosion on soil organic carbon loss on the loess hilly areas [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(4): 88-90.
- [30] 中华人民共和国水利部. 中国水土保持公报(2023年) [R/OL]. [2024-03-31]. http://swcc.mwr.gov.cn/gonggao/202501/t20250107_1789002.htm.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China (2023) [R/OL]. [2024-03-31]. http://swcc.mwr.gov.cn/gonggao/202501/t20250107_1789002.htm.
- [31] YANG R Z, YANG S L, CHEN L L, et al. Effect of vegetation restoration on soil erosion control and soil carbon and nitrogen dynamics: A meta-analysis [J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 230: e105705.
- [32] 王强, 耿增超, 许晨阳, 等. 施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响[J]. *环境科学*, 2020, 41(5): 2425-2433.
- WANG Q, GENG Z C, XU C Y, et al. Effects of bio-char application on soil microbial nutrient limitations and carbon use efficiency in Lou soil [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(5): 2425-2433.
- [33] SONG H Z, LIU Z F, LIN B Z, et al. Clay mineral nano-structures regulate sequestration of organic carbon in typical fluvial sediments [J]. *Heliyon*, 2024, 10(3): e25825.
- [34] 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 Y N, WANG B, WANG W G, 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.