

王久懿, 顾萌, 周传芳, 等. 东北黑土区坡耕地土壤有机碳组分对侵蚀的响应——以黑龙江尚志地区为例[J]. 地球科学与环境学报, 2026, 48(1): 92-102.

WANG Jiu-yi, GU Meng, ZHOU Chuan-fang, et al. Response of Soil Organic Carbon Fractions to Erosion on Sloping Farmlands in the Black Soil Region of Northeast China—Taking Shangzhi Area of Heilongjiang as an Example[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2026, 48(1): 92-102.

DOI: 10.19814/j.jese.2025.09031

东北黑土区坡耕地土壤有机碳组分对侵蚀的响应 ——以黑龙江尚志地区为例

王久懿^{1,2,3*}, 顾萌⁴, 周传芳^{1,2,3†}, 高晓琦^{1,2,3}

(1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150081; 2. 中国地质调查局东北地质科技创新中心, 辽宁 沈阳 110034; 3. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150081; 4. 黑龙江省农垦科学院, 黑龙江 哈尔滨 150038)

摘要: 分析东北黑土区坡耕地土壤侵蚀与土壤有机碳(SOC)组分空间分布和变化, 可为评价土壤有机碳组分变化机制和土壤侵蚀对其影响提供科学依据。以典型黑土区——黑龙江省尚志市一处直型坡耕地为研究对象, 基于系统的样品采集与分析测定, 结合¹³⁷Cs示踪技术定量分析土壤侵蚀空间分布特征及其与土壤有机碳组分的变化关系。结果表明: ①坡耕地土壤侵蚀速率平均值为 $4\ 096.39\ \text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$, 属中度侵蚀级别, 侵蚀区主要发育在坡中部, 沉积区主要分布在坡顶和坡脚的西侧; ②土壤有机碳含量自开垦后下降23.38%, 其中矿物结合态有机碳(MOC)含量下降20.36%, 颗粒态有机碳(POC)含量下降28.58%。颗粒态有机碳中的粗颗粒态有机碳(CPOC)含量下降47.78%, 细颗粒态有机碳(FPOC)含量下降19.87%; ③土壤侵蚀速率与SOC含量成极显著负相关关系, 与POC含量、MOC含量、FPOC含量成显著负相关关系, 且在空间分布上具有一致性, 但与CPOC含量的相关性不显著。综上所述, 土壤侵蚀是导致土壤有机碳、颗粒态有机碳、矿物结合态有机碳和细颗粒态有机碳在坡面流失与重新分配的主要原因, 而粗颗粒态有机碳的显著损耗则主要归因于耕作扰动破坏团聚体后增强的微生物分解作用。

关键词: 土壤侵蚀; ¹³⁷Cs示踪技术; 土壤有机碳; 坡耕地; 黑土; 空间分布; 黑龙江

中图分类号: S157 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2026)01-0092-11

Response of Soil Organic Carbon Fractions to Erosion on Sloping Farmlands in the Black Soil Region of Northeast China

—Taking Shangzhi Area of Heilongjiang as an Example

WANG Jiu-yi^{1,2,3*}, GU Meng⁴, ZHOU Chuan-fang^{1,2,3†}, GAO Xiao-qi^{1,2,3}

(1. Harbin Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological Survey, Harbin 150081, Heilongjiang, China; 2. Northeast Geological S&T Innovation Center, China Geological Survey, Shenyang

收稿日期: 2025-09-27; 修回日期: 2026-01-03 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 东北地质科技区域创新联合发展基金项目(QCJJ2023-33, QCJJ2024-13),

中国地质调查局地质调查项目(DD20251300222, DD20230701014)

* 通信作者: 王久懿(1993-), 男, 黑龙江伊春人, 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心工程师,

E-mail: jywangcugb@163.com.

† 通信作者: 周传芳(1985-), 男, 黑龙江绥化人, 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心正高级工程师,

E-mail: 546011015@qq.com.

110034, Liaoning, China; 3. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources, Harbin 150081, Heilongjiang, China; 4. Heilongjiang Academy of Land Reclamation Sciences, Harbin 150038, Heilongjiang, China)

Abstract: Analyzing the spatial distribution and dynamics of soil erosion and soil organic carbon (SOC) components in sloping farmland within the black soil region of Northeast China is essential for elucidating the mechanisms underlying SOC component changes and the influence of soil erosion. A straight-slope farmland in a typical black soil area of Shangzhi city, Heilongjiang province was investigated; through systematic soil sampling, laboratory analysis, and the ^{137}Cs tracing technique, the spatial distribution of soil erosion and its relationship with SOC component variations were quantitatively examined. The results show that: ① the average soil erosion rate on the sloping farmland is $4\ 096.39\ \text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, corresponding to a moderate erosion intensity; erosion primarily occurs at the mid-slope position, while deposition areas are mainly distributed on the west side of the slope top and at the slope bottom. ② Cultivation leads to a 23.38% decrease in SOC content, with mineral-associated organic carbon (MOC) content declining by 20.36% and particulate organic carbon (POC) content declining by 28.58%; within the POC content, coarse particulate organic carbon (CPOC) content decreases by 47.78%, and fine particulate organic carbon (FPOC) content decreases by 19.87%. ③ Soil erosion rate shows significant negative correlations with SOC, POC, MOC, and FPOC contents (with the negative correlation to SOC content being highly significant), and their spatial distributions are consistent; however, no significant correlation is found between soil erosion rate and CPOC content. The study demonstrates that soil erosion is the primary factor driving the loss and redistribution of SOC, POC, MOC, and FPOC along the slope; in contrast, the marked loss in CPOC is mainly attributed to enhanced microbial decomposition following the disruption of soil aggregates by tillage practices.

Key words: soil erosion; ^{137}Cs tracer technique; soil organic carbon; sloping farmland; black soil; spatial distribution; Heilongjiang

0 引 言

土壤侵蚀是我国重要的环境问题之一,其会破坏土地资源和生态系统,降低农业生产力,造成土壤肥力下降、土地退化、耕地面积减少,导致泥沙淤积河床、水库和湖泊,降低蓄水能力,加剧自然灾害,严重威胁国家粮食安全和社会经济发展。据《中国水土保持公报(2024年)》统计结果,2024年全国水土流失总面积为 $260.19 \times 10^4\ \text{km}^2$ (占全国土地总面积的27.10%),其中水力侵蚀面积为 $105.10 \times 10^4\ \text{km}^2$,风力侵蚀面积为 $155.09 \times 10^4\ \text{km}^2$ ^[1]。东北黑土区作为全国水土保持一级区划和水土流失重点关注区域之一,2024年水土流失面积为 $20.61 \times 10^4\ \text{km}^2$,占区域土地总面积($108.76 \times 10^4\ \text{km}^2$)的18.95%,其中水力侵蚀面积为 $13.12 \times 10^4\ \text{km}^2$,风力侵蚀面积为 $7.49 \times 10^4\ \text{km}^2$ ^[1]。东北黑土区坡耕地具有坡缓而长的特殊地貌类型,种植方式多为顺

坡垄作和斜坡垄作,水土流失现象明显,水土流失和侵蚀沟导致全年粮食减产高达14.1%^[2]。

^{137}Cs 是20世纪50年代至70年代核试验及核泄漏的产物,具有强放射性(γ 射线能量为662 keV)和较长的半衰期(30.17年),主要以干湿沉降方式进入地表,并迅速被土壤细颗粒中的黏土矿物和有机质吸附,基本不被植物吸收,也不会发生淋溶流失,仅随土壤颗粒发生机械迁移^[3-4]。基于这些特性, ^{137}Cs 示踪技术已成为土壤侵蚀研究中一种见效快、可量化且精度高的方法,适用于较长时间尺度的侵蚀定量评估^[5-6]。史沅玺等研究认为,坡面水土流失是导致坡耕地土壤质量退化和生产力下降^[7]、造成不同坡位土壤性质变异^[8]的重要原因。坡耕地土壤养分迁移与流失是一个复杂的物理化学过程,受径流量、土壤质地、地形地貌、坡位、坡度等各种因素综合作用的影响^[9-13]。土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)是土壤养分的重要组成部分,而土壤侵蚀

是造成其迁移、流失的主要因素^[14-18],进而引起土地产能降低。目前,关于土壤侵蚀对土壤有机碳的影响研究主要集中在流域或耕地尺度内沉积区和侵蚀区的对比^[16-17,19]、不同地貌部位定点的对比^[20-21]、不同坡度和植被覆盖度的对比^[18]以及沿不同坡型和坡长变化的对比^[22],且研究通常将土壤有机碳视为单一实体,而关于土壤有机碳组分随坡面土壤侵蚀强度空间变化的系统研究相对缺乏。基于此,本文选取黑龙江省尚志市一处直型坡为研究对象,采用¹³⁷Cs示踪技术定量分析坡面土壤侵蚀特征及其与土壤有机碳组分含量的关系,旨在揭示土壤侵蚀对土壤有机碳组分迁移分布的影响,为保护和提升黑土地产能提供理论基础。

1 研究区概况

黑龙江省尚志市地处松嫩平原东南部与张广才岭西部过渡带,纬度范围为 $44^{\circ}29'N\sim 45^{\circ}34'N$,经度范围为 $127^{\circ}17'E\sim 129^{\circ}12'E$,中部相对平坦,西北部、南部、东部山岭连绵,山脉多为NE—SW向,海拔为165~1 658 m,大体呈“八山、半水、分半田”格局[图1(a)]。研究区属中温带大陆性季风气候,区内全年平均降水量为655 mm,集中在6月至8月(约占全年降水量的60%),年平均风速大部分在 $3\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,年平均气温为 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。研究区耕地总面积为 $2\ 616.02\text{ km}^2$,其中坡耕地面积约为 560.10 km^2 ,占耕地总面积的21.37%,黑土层平均厚度为45.17 cm。本次研究具体采样位置为黑龙江省尚志市黑龙宫镇幸福沟水库北侧一处典型直型坡耕地,其耕作深度约为30 cm,坡长约为250 m,已开垦35年,坡脚发育有沟道,多年耕作方式为横坡垄作,主要种植作物为玉米,土壤类型为黑土,土壤质地为粉土-粉壤土(国际制)。

2 材料与方法

2.1 样品采集

土壤样品采集时间为2024年4月,采用土钻竖直打入坡面采集。在坡耕地设置3条平行剖面,剖面间隔为30 m,每条剖面内自坡顶至坡脚每间隔20 m采集土壤样品,采样深度为40 cm,共采集土壤样品39件[图1(b)]。本文选取尚志市西北部黑龙宫自然保护区核心区的一处平坦天然林地作为背景值采样点,采样点间隔大于1 m,采样深度为40 cm,随机采集土壤样品9件。

2.2 分析方法

土壤样品¹³⁷Cs和土壤有机碳测试分别在中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所和中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心完成。¹³⁷Cs含量测定流程为:首先对样品进行杂质去除、风干、研磨、称重,然后通过2 mm筛网过筛;随后选取约300 g分选后的土壤样品装入样品盒中,在美国ORTEC伽马能谱仪上进行¹³⁷Cs比活度测试;最后在能量为661.6 keV的 γ 射线下进行检测(分辨率低于5%,探测效率为30%,脉冲为16 000道,平均测试时间为49 445 s)。土壤有机碳组分分析流程为:首先,称取20 g通过2 mm筛网的土壤样品放入塑料瓶中,加入100 mL浓度为 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的六偏磷酸盐溶液,在往复式振动筛(振动频率为 $90\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)上振动18 h;接着,将分散的土壤混合物分别置于53和250 μm 的筛网上,并用去离子水冲洗,直到水流清澈、没有细土颗粒残留;然后,根据筛网大小,将土壤有机碳分为粗颗粒态有机碳(Coarse Particulate Organic Carbon, CPOC;粒径为250~2 000 μm)、细颗粒态有机碳(Fine Particulate Organic Carbon, FPOC;粒径为53~250 μm)和矿物结合态有机碳(Mineral-associated Organic Carbon, MOC;粒径低于53 μm),其中粗颗粒态有机碳和细颗粒态有机碳统称为颗粒态有机碳(Particulate Organic Carbon, POC);将收集到的组分经沉淀后倒掉上清液,在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下干燥、称重,并研磨过150 μm 筛网;最后,采用重铬酸钾容量法测试不同粒级土壤有机碳含量。

2.3 数据处理

本文基于质量平衡模型估算土壤侵蚀速率^[23]。其计算公式为

$$R_e = \frac{10 \times D_i \times B}{P} \left[1 - \left(1 - \frac{X}{100} \right)^{\frac{1}{t-1963}} \right] \quad (1)$$

式中: R_e 为土壤侵蚀速率,正值表示侵蚀,负值表示沉积; D_i 为耕层深度; B 为容重; P 为土壤粒径校正系数; X 为¹³⁷Cs含量减少的百分比, $X = (A_e - A) / A_e \times 100$,其中 A 为土壤¹³⁷Cs的面积活度, A_e 为土壤¹³⁷Cs含量有效背景值($A_e = A_0(1-R)$,其中 A_0 为土壤¹³⁷Cs含量背景值, R 为地表径流系数); t 为采样时的年份;根据测量结果,研究区实测土壤¹³⁷Cs含量有效背景值为 $2\ 017\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

本文采用Excel 2016软件对实验数据进行预处理;利用SPSS 25.0软件的独立样本 t 检验(t -test)和单因素方差分析(One-way ANOVA)开展显

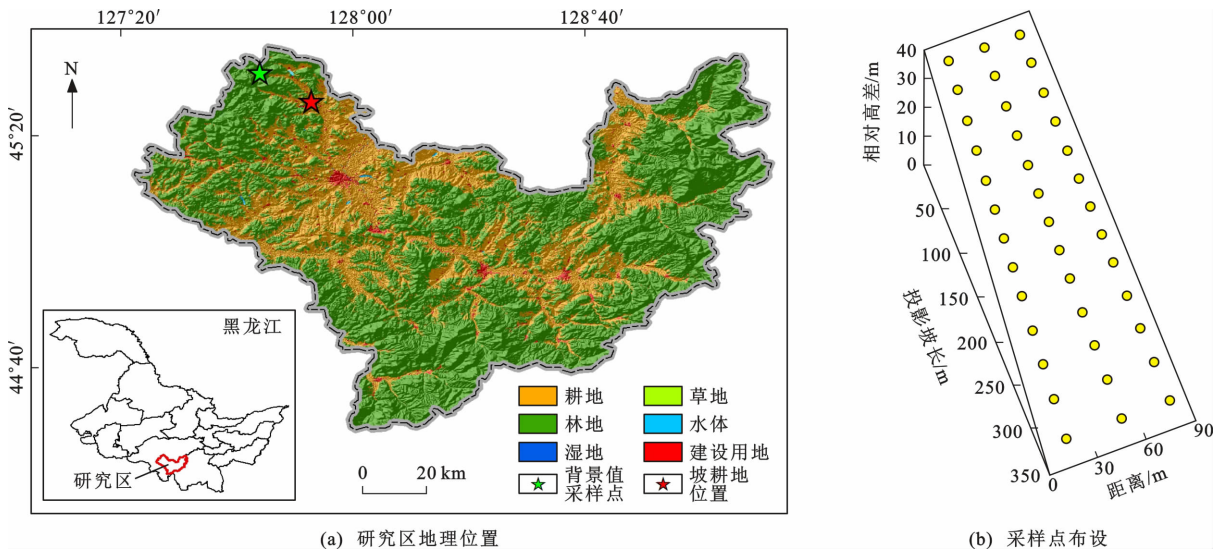


图 1 黑龙江省尚志市地理位置与采样点布设

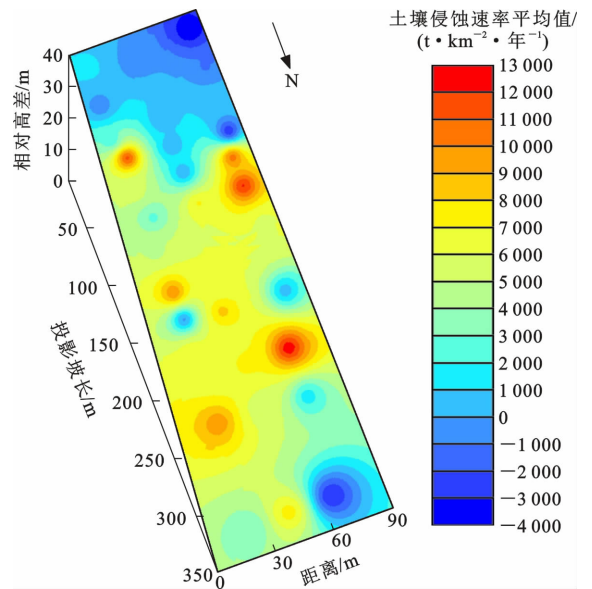
Fig. 1 Location of Shangzhi City, Heilongjiang Province and Distribution of Sampling Points

著性检验;采用 Pearson 相关性分析和回归分析研究坡面土壤有机碳组分含量与土壤侵蚀速率的关系。土壤有机碳组分含量和土壤侵蚀速率空间分布图采用反距离权重(Inverse Distance Weight, IDW)插值法通过 ArcGIS 10.8 软件制作,其他图件采用 Origin 2022 软件制作。

3 结果分析

3.1 土壤侵蚀强度特征

基于¹³⁷Cs 示踪技术的坡耕地土壤侵蚀速率和沉积速率统计结果见表 1。坡耕地采样点中沉积点占比 20%,土壤侵蚀速率为 -3 676.32~ -68.52 t · km⁻² · 年⁻¹ (平均值为 -1 660.32 t · km⁻² · 年⁻¹),具有强变异特征(变异系数为 0.84,远大于强变异与中等变异的界定阈值(0.35))。坡耕地采样点中侵蚀点占比 80%,土壤侵蚀速率为 54.54~12 572.67 t · km⁻² · 年⁻¹ (平均值为 5 535.57 t · km⁻² · 年⁻¹),也具有强变异特征(变异系数为 0.70,远大于强变异与中等变异的界定阈值(0.35))。依据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007)^[24],将土壤侵蚀划分为微度/轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈/剧烈侵蚀等 4 个级别。坡耕地采样点中,上述 4 个侵蚀级别占比分别为 22.86%、8.57%、28.57%、20.00%。土壤侵蚀速率空间分布(图 2)显示:沉积区主要分布在坡顶和坡脚,且有向西侧倾斜的趋势;侵蚀区主要发育在坡中部,在距离山顶约 60 和 220 m 处达到极强烈/剧烈侵蚀,土壤侵蚀速率整体上呈放射状向周围逐渐减



土壤侵蚀速率为负值的区域为沉积区;土壤侵蚀速率为 0~2 500 t · km⁻² · 年⁻¹ 的区域为微度/轻度侵蚀区;土壤侵蚀速率为 2 500~5 000 t · km⁻² · 年⁻¹ 的区域为中度侵蚀区;土壤侵蚀速率为 5 000~8 000 t · km⁻² · 年⁻¹ 的区域为强烈侵蚀区;土壤侵蚀速率高于 8 000 t · km⁻² · 年⁻¹ 的区域为极强烈/剧烈侵蚀区

图 2 坡面土壤侵蚀速率空间分布

Fig. 2 Spatial Distribution of Soil Erosion Rate on Slope

少;研究区整体表现出坡中部侵蚀强度大于坡脚和坡顶,土壤侵蚀速率平均值为 4 096.39 t · km⁻² · 年⁻¹ (属中度侵蚀级别),是东北黑土区容许土壤流失量(200 t · km⁻² · 年⁻¹)的 20 倍。

3.2 土壤有机碳组分含量特征

坡耕地和未开垦地土壤有机碳及其各组分含量特征见表 2。坡耕地整体表现为 MOC 含量最高, FPOC 含量次之, CPOC 含量最小,且细颗粒态有机

表1 基于¹³⁷Cs示踪技术的坡耕地土壤侵蚀速率统计结果Table 1 Statistical Results of Soil Erosion Rate of Sloping Farmland Based on ¹³⁷Cs Tracer Technique

参数	不同区域土壤侵蚀速率				
	沉积区	微度/轻度侵蚀区	中度侵蚀区	强烈侵蚀区	极强烈/剧烈侵蚀区
最小值/(t·km ⁻² ·年 ⁻¹)	-3 676.32	54.54	2 817.06	5 112.86	8 293.82
最大值/(t·km ⁻² ·年 ⁻¹)	-68.52	2 454.94	4 845.90	7 361.61	12 572.67
平均值/(t·km ⁻² ·年 ⁻¹)	-1 660.32	793.40	3 609.37	6 401.30	10 543.96
变异系数	0.84	1.10	0.30	0.12	0.14
样本量	7	8	3	10	7

表2 坡耕地和未开垦地土壤有机碳及其各组分平均含量

Table 2 Average Contents of SOC and Its Components Between Sloping Farmland and Unexploited Land

参数	土壤有机碳	矿物结合态有机碳	颗粒态有机碳	细颗粒态有机碳	粗颗粒态有机碳
坡耕地含量/10 ⁻³	20.92±10.87	13.74±8.64	7.18±5.49	5.63±4.32	1.58±1.41
未开垦地含量/10 ⁻³	27.31±10.67	17.26±9.64	10.05±5.67	7.02±4.15	3.03±2.04
含量变化率	-23.38% ^{ns}	-20.36% ^{ns}	-28.58% ^{ns}	-19.87% ^{ns}	-47.78% [*]

注:含量是指质量分数;含量变化率是未开垦地与坡耕地含量的差值和未开垦地含量的比值;*表示在0.05水平下显著相关;ns表示无显著相关性。

碳、粗颗粒态有机碳较矿物结合态有机碳在坡耕地中分布更离散。对比未开垦地与坡耕地(表2和图3)可以看出:坡耕地SOC含量以 0.182×10^{-3} 的年均损失速率下降了 6.39×10^{-3} ,损失率为23.38%;坡耕地土壤有机碳各组分含量均有下降,其中CPOC含量下降程度最大(损失率达47.78%),粒径较小的FPOC含量、MOC含量下降相对较小(损失率分别为19.87%和20.36%)。坡耕地沉积区SOC含量、MOC含量、POC含量和FPOC含量分别增加18.27%、27.29%、2.79%和17.59%,仅CPOC含量下降31.54%;而坡耕地侵蚀区SOC含量、MOC含量、POC含量、FPOC含量和CPOC含量分别下降27.54%、26.25%、29.75%、20.94%和50.20%。

坡耕地土壤有机碳及其各组分含量空间分布(图4)显示:土壤有机碳及其各组分在空间上分布具有显著的不均匀性,并在近坡顶处富集明显。此外,土壤有机碳和矿物结合态有机碳还在坡中部和坡脚局部呈斑点状富集,但颗粒态有机碳、细颗粒态有机碳和粗颗粒态有机碳在坡脚无明显富集,仅在坡中部和坡顶局部呈斑点状富集。结合土壤侵蚀速率空间分布(图2)可以看出,土壤有机碳及其各组分的空间分布与土壤侵蚀速率具有一定的相关性,即在沉积区和微度/轻度侵蚀区的土壤有机碳及其各组分含量高于强烈侵蚀区,其中SOC含量梯度、MOC含量梯度与土壤侵蚀速率向西迁移的格局一致。

3.3 土壤有机碳组分含量对侵蚀的响应

沉积区和侵蚀区土壤有机碳及其各组分含量

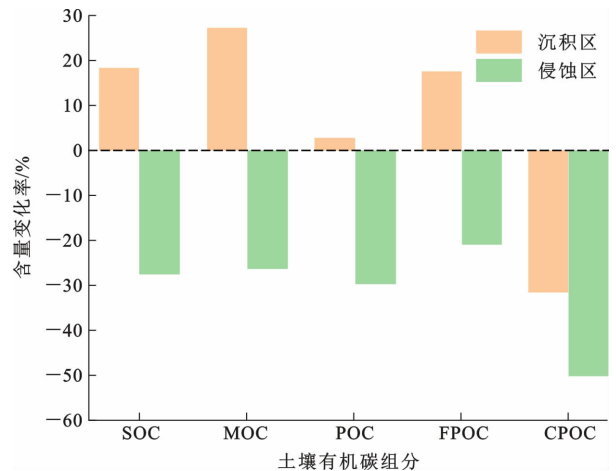


图3 坡耕地土壤有机碳及其各组分含量较未开垦地的相对变化

Fig. 3 Relative Changes in Contents of SOC and Its Components in the Sloping Farmland Compared to the Uncultivated Land

立样本 t 检验结果(图5)表明: SOC含量和MOC含量在沉积区与侵蚀区存在极显著性差异($P < 0.01$),而POC含量、FPOC含量和CPOC含量无显著性差异($P > 0.05$)。不同侵蚀程度的土壤有机碳及其各组分含量的单因素方差分析结果表明:土壤有机碳和矿物结合态有机碳仅在沉积区和极强烈/剧烈侵蚀区存在显著性差异($P < 0.05$),在微度/轻度、中度、强烈侵蚀区无显著性差异($P > 0.05$)。POC含量、FPOC含量和CPOC含量在沉积区和侵蚀区均无显著性差异($P > 0.05$),表明不同侵蚀度对这3种土壤有机碳组分含量没有显著性影响。

土壤有机碳及其各组分含量与土壤侵蚀速率的

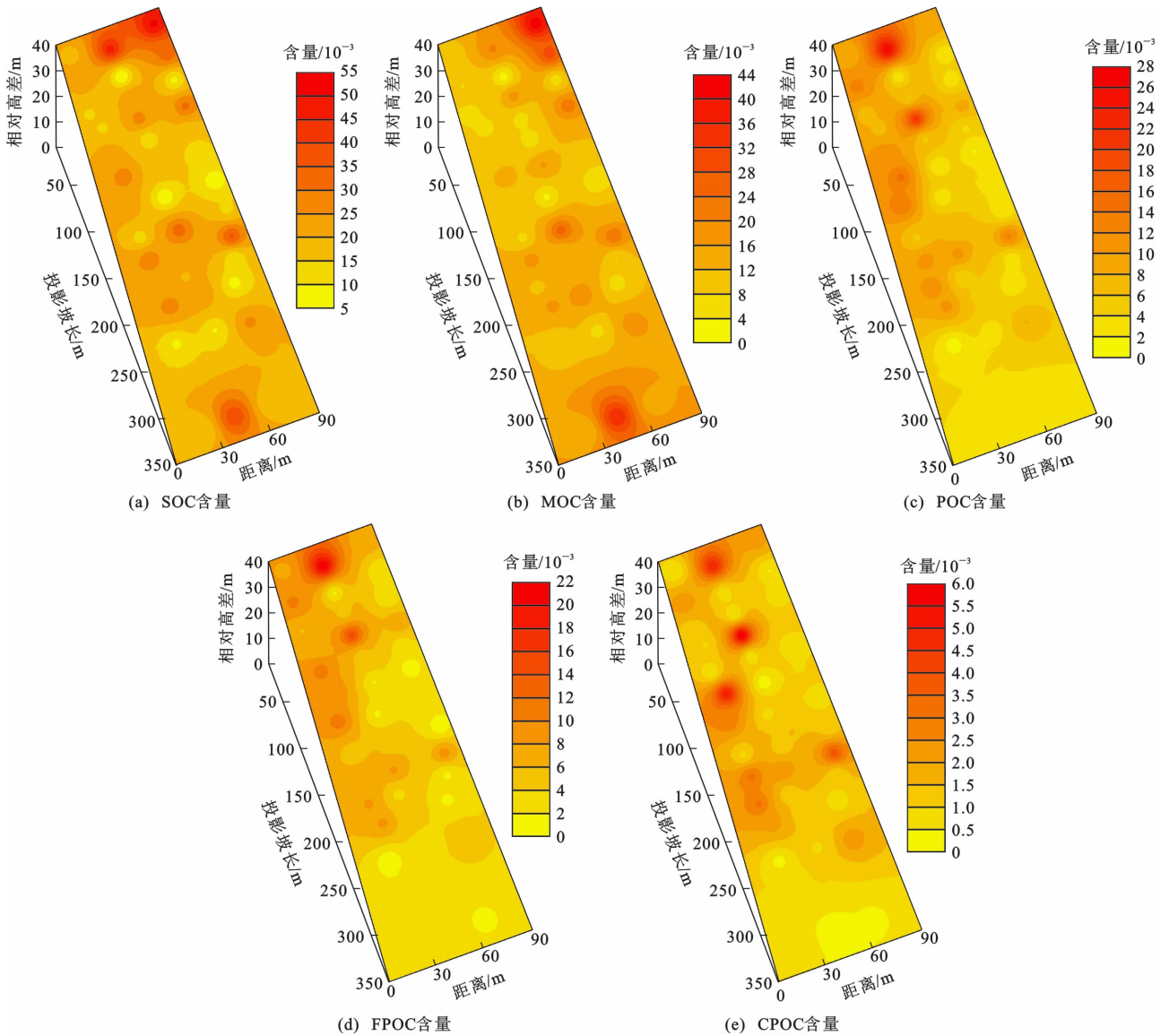


图 4 坡耕地土壤有机碳及其各组分含量空间分布

Fig. 4 Spatial Distributions of Contents of SOC and Its Components in the Sloping Farmland

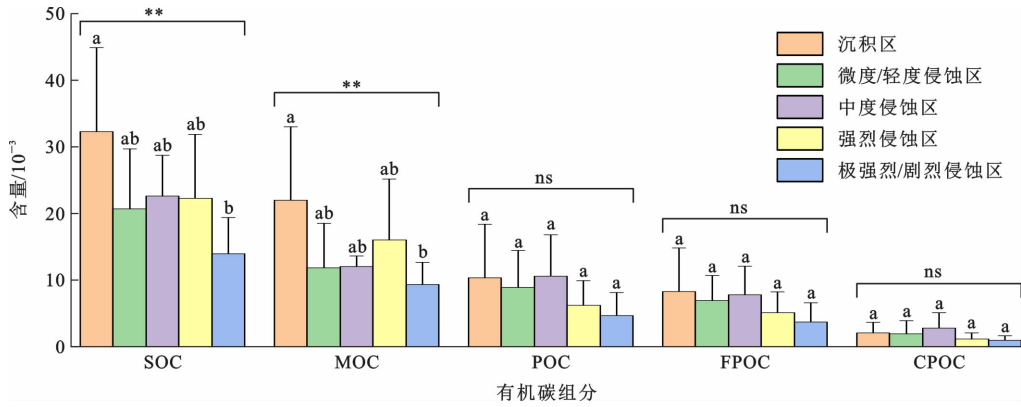
回归分析结果(图 6)显示:土壤侵蚀速率与 SOC 含量成极显著线性相关关系(决定系数(R^2)为 0.216, $P < 0.01$),与 MOC 含量、POC 含量和 FPOC 含量成显著线性相关关系,决定系数分别为 0.115、0.128 和 0.127($P < 0.05$),与 CPOC 含量没有显著相关性($P > 0.05$)。这表明土壤侵蚀与土壤有机碳、矿物结合态有机碳、颗粒态有机碳和细颗粒态有机碳密切相关。具体来说,随着土壤侵蚀强度的增大,土壤有机碳及其各组分含量呈显著下降趋势。

4 讨论

东北黑土区以往基于 ^{137}Cs 示踪技术获得的土壤侵蚀速率多集中在 $2\ 200 \sim 3\ 800\ \text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$,部分可达 $5\ 450\ \text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$ (表 3)。流域

尺度耕地采样点的密度会忽略局部地貌的影响,而局部地貌差异(如坡度、坡位和坡型等)会造成坡耕地尺度土壤侵蚀的显著差异^[16,20,25-26]。本次研究采样点密度大,土壤侵蚀强度最严重的部位多集中在坡中部坡度较大的区域,土壤侵蚀速率甚至达到 $12\ 572.67\ \text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$ 。垂直于径流方向的坡度是沉积区向西迁移的主要原因(图 2)。

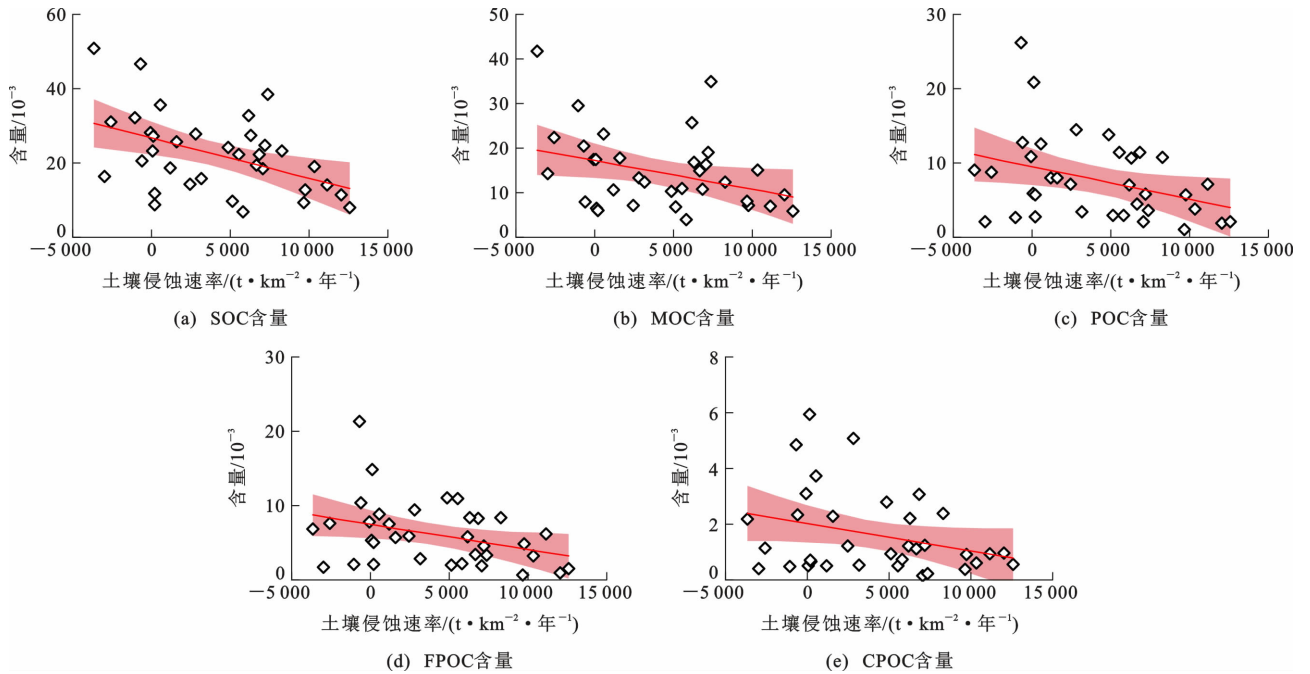
与未开垦地相比,坡耕地土壤有机碳及其各组分含量均下降。其原因主要有:①土地利用类型变化(林地开垦为耕地)后,植物凋落物对土壤有机质的输入减少^[27-28],而未开垦地(林地)持续接受植物凋落物和残根的补给;②农作物生长对土壤有机质的消耗;③农业耕作和“雨滴打击”破坏土壤团聚体结构,加速土壤有机碳及其各组分分解^[29-30]。本次



误差棒上方字母不同表示不同采样位置的对应土壤因子存在显著性差异($P < 0.05$);误差棒上方字母相同表示不同采样位置的对应土壤因子无显著性差异($P > 0.05$);**表示沉积区和侵蚀区对应土壤因子在0.01水平下极显著相关;ns表示沉积区和侵蚀区对应土壤因子无显著相关性

图5 不同侵蚀强度下土壤有机碳及其各组分含量分布

Fig. 5 Content Distributions of SOC and Its Components Under Different Erosion Intensities



红色线条为线性拟合线;红色区域代表95%置信带

图6 土壤有机碳及其各组分含量与土壤侵蚀速率的关系

Fig. 6 Relationships Between Contents of SOC and Its Components, and Soil Erosion Rate

研究中,直型坡耕地土壤有机碳组分中的颗粒态有机碳损失率大于矿物结合态有机碳,损失率分别为28.58%和20.36%,且颗粒态有机碳中CPOC含量下降程度最大,损失率达47.78%。尽管矿物结合态有机碳也可在常见根系分泌物(如葡萄糖和草酸)作用下通过矿化流失^[22],并且土壤侵蚀作用可能会促进这种过程^[26],但特定的化学键和小团聚体仍可保持其相对稳定^[31-32],并在沉积区作为主要的土壤有机碳组分积累(图3)。颗粒态有机碳主要由植物凋落物和部分残根组成,其仅受大团聚体保护,是微生

物活动的重要碳源,在土壤侵蚀过程中易被微生物分解利用,即便在沉积区也可能无法积累^[33-34]。耕作侵蚀是导致颗粒态有机碳损耗的主要机制,而非水蚀作用^[35]。高强度耕作会破坏易受微生物分解的土壤大团聚体,降低其结构稳定性^[36-37],进而显著降低POC含量。土壤侵蚀速率与POC含量成显著负相关关系,表明土壤侵蚀通过加速颗粒态有机碳的损失,直接参与了土壤有机碳的矿化过程^[38]。因此,坡耕地POC含量较MOC含量降幅更大。

基于¹³⁷Cs示踪技术测试结果表明,土壤侵蚀速

表 3 基于¹³⁷Cs 示踪技术计算的东北黑土区土壤侵蚀速率
Table 3 Soil Erosion Rates in the Black Soil Region of
Northeast China Based on ¹³⁷Cs Tracer Technique

研究区域	研究尺度	土壤侵蚀速率平均值/ ($t \cdot km^{-2} \cdot 年^{-1}$)	参考文献
黑龙江省尚志市	坡耕地	4 096.39	本文
黑龙江省克山农场	坡耕地	2 995.97(直型坡耕地); 3 801.71(凸型坡耕地)	[16]
		2 810.09(直型坡耕地); 3 801.71(凸型坡耕地)	[26]
黑龙江省宾州河流域	流域	2 614.00	[17]
黑龙江省鹤山农场	流域	2 200.00	[39]
吉林省德惠市	坡耕地	5 450.00	[20]
吉林省毛家沟流域	流域	2 248.75	[40]
黑龙江省宾县 东山沟小流域	坡耕地	2 822.99	[41]
黑龙江省克山县 英民小流域	坡耕地	2 174.74	[41]

率与部分土壤有机碳组分含量成显著、极显著线性相关关系,如SOC含量($P < 0.01$)、MOC含量($P < 0.05$)、POC含量($P < 0.05$)和FPOC含量($P < 0.05$)[图6(a)~(d)]。特别是SOC含量和MOC含量在侵蚀区和沉积区成极显著相关关系($P < 0.01$)(图5),指示土壤有机碳及其各组分(除粗颗粒态有机碳)在土壤侵蚀作用下伴随土壤颗粒从侵蚀区迁移至沉积区^[19,29,42](图3)。由于每年有新鲜的农作物残留物和根系不断补充土壤有机碳库,实际条件下,土壤侵蚀与有机碳各组分含量之间的相关性可能更加显著。坡面不同位置温度、含水率等物理化学性质的不同,会通过影响微生物活性来影响土壤有机碳的稳定性^[43];相比矿物结合态有机碳的微小团聚体,颗粒态有机碳(含粗颗粒态有机碳和细颗粒态有机碳)因大团聚体内更多更大土壤孔隙的存在导致其结构脆弱,增加了物质和O₂的传输^[44],使分解土壤有机碳的空气和溶解土壤有机碳的水分更加充足,微生物的生物量和活性更高,土壤有机碳更易被矿化分解^[45-46];不同于微小团聚体中的有机碳(以化学保护为主、分解慢、保持时间长),大团聚体中有机碳以物理保护为主,植物来源的有机碳较多,周转较快^[47];另外,耕作导致易受微生物分解的大团聚体损失较多,促进了微生物与有机碳的接触,加快了有机碳的矿化^[48]。因此,微生物分解对颗粒态有机碳的影响显著高于对矿物结合态有机碳的影响,导致POC含量在不同侵蚀强度下未呈现出显著性差异(图5),其中CPOC含量与土壤侵蚀速率也未表

现出显著相关性[图6(e)],表明微生物分解对粗颗粒态有机碳的影响可能超过了土壤侵蚀作用。

综上所述,坡面径流冲刷作用导致土壤有机碳及其组分发生机械迁移与空间再分配,而耕作及“雨滴打击”效应共同破坏土壤大团聚体结构,进而改变不同坡位的土壤物理化学性质,影响微生物活动效率,最终驱动有机碳及各组分发生不同程度分解与矿化。本研究通过在坡面尺度开展高密度采样,探讨了土壤有机碳组分与土壤侵蚀的关系,然而土壤养分迁移流失过程受径流量、土壤质地、地形地貌及土地利用管理等多种因素综合影响,机制复杂,各类因素的贡献仍需进一步量化分析。作为国家粮食安全的“压舱石”,东北黑土区部分坡耕地仍面临严峻的土壤侵蚀威胁。为有效减缓土壤养分流失,建议采取以下综合治理策略:推广免耕少耕等保护性耕作技术,实施秸秆还田并配施有机肥,加强肥沃耕层培育,促进增产与地力提升协同实现;推动分区治理模式,结合工程与生物措施,融合农机农艺技术,构建黑土地长效保护机制。值得强调的是,任何技术措施均需结合当地气候、地形与种植制度进行适应性调整,确保技术的落地性与可持续性。

5 结 语

本文以东北典型黑土区——黑龙江省尚志市一处直型坡耕地为研究对象,明确了土壤侵蚀速率和土壤有机碳组分在坡面空间分布特征,定量分析了土壤有机碳及其各组分含量与土壤侵蚀速率的关系。

(1)坡耕地土壤侵蚀速率平均值为4 096.39 $t \cdot km^{-2} \cdot 年^{-1}$,属中度侵蚀级别,侵蚀区主要发育在坡中部,沉积区主要分布在坡顶和坡脚的西侧。

(2)坡耕地SOC含量自开垦后下降23.38%,其中MOC含量下降20.36%,POC含量下降28.58%,CPOC含量下降47.78%(降幅最大),FPOC含量下降19.87%。

(3)土壤侵蚀速率与SOC含量成极显著负相关关系($P < 0.01$),与POC含量、MOC含量、FPOC含量成显著负相关关系($P < 0.05$),且在空间分布上具有一致性,但与CPOC含量的相关性不显著($P > 0.05$)。

(4)土壤侵蚀是导致土壤有机碳组分流失并在坡面重新分配的主要原因。矿物结合态有机碳和细颗粒态有机碳的损失主要受控于物理迁移,而粗颗粒态有机碳的显著损耗则主要归因于耕作扰动破坏

团聚体后增强的微生物分解作用。

中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心赵文志博士在本文修改过程中提出了很多建设性意见,在此表示感谢!

参考文献:

References:

- [1] 水利部. 中国水土保持公报(2024年)[R]. 北京:水利部, 2025.
Ministry of Water Resources. Bulletin of Soil and Water Conservation in China (2024) [R]. Beijing: Ministry of Water Resources, 2025.
- [2] 刘兴土, 阎百兴. 东北黑土区水土流失与粮食安全[J]. 中国水土保持, 2009, 30(1): 17-19.
LIU Xing-tu, YAN Bai-xing. Water and Soil Losses in Relation to Food Security in Black Soil Region of Northeast China[J]. Soil and Water Conservation in China, 2009, 30(1): 17-19.
- [3] WALLING D E, HE Q. Improved Models for Estimating Soil Erosion Rates from Cesium-137 Measurements[J]. Journal of Environmental Quality, 1999, 28(2): 611-622.
- [4] OWENS P N, WALLING D E, HE Q P. The Behaviour of Bomb-derived Caesium-137 Fallout in Catchment Soils[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 1996, 32(3): 169-191.
- [5] FANG H J, YANG X M, ZHANG X P, et al. Using ¹³⁷Cs Tracer Technique to Evaluate Erosion and Deposition of Black Soil in Northeast China[J]. Pedosphere, 2006, 16(2): 201-209.
- [6] 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: 106001.
- [7] 史衍玺, 唐克丽. 人为加速侵蚀下土壤质量的生物学特性变化[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 28-40.
SHI Yan-xi, TANG Ke-li. Changes of Biological Characteristics of Soil Quality Under Man-made Accelerated Erosion[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998, 4(1): 28-40.
- [8] MILLER M P, SINGER M J, NIELSEN D R. Spatial Variability of Wheat Yield and Soil Properties on Complex Hills[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52(4): 1133-1141.
- [9] 邢伟民, 王懿潼, 徐浩林, 等. 坡形和 PAM 对黄土坡地水土养分迁移特征的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 135-142.
XING Wei-min, WANG Yi-tong, XU Hao-lin, et al. Effects of Polyacrylamide and Slope and Shape on Transportation of Soil Water and Nutrients from the Loess Sloping Land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 135-142.
- [10] 陈晓安, 杨洁, 汤崇军, 等. 雨强和坡度对红壤坡耕地地表径流及壤中流的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 141-146.
CHEN Xiao-an, YANG Jie, TANG Chong-jun, et al. Effects of Rainfall Intensity and Slope on Surface and Subsurface Runoff in Red Soil Slope Farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(9): 141-146.
- [11] 陈安磊, 王卫, 张文钊, 等. 土地利用方式对红壤坡地地表径流氮素流失的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 101-106.
CHEN An-lei, WANG Wei, ZHANG Wen-zhao, et al. Effect of Nitrogen Losses in a Red Soil Field Under Long-term Land Use Patterns[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1): 101-106.
- [12] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区侵蚀环境不同坡面及坡位土壤理化特征研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 7-12.
ZHOU Ping, LIU Guo-bin, HOU Xi-lu. Study on Soil Physical and Nutrients Properties of Different Slope Aspects and Positions in Eroded Loess Hilly Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(1): 7-12.
- [13] 王全九, 王力, 李世清. 坡地土壤养分迁移与流失影响因素研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(12): 109-119.
WANG Quan-jiu, WANG Li, LI Shi-qing. Research on the Effective Factors of Nutrient Transfer and Loss in the Slope Land[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2007, 35(12): 109-119.
- [14] 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: 108283.
- [15] 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 Ya-ning, WANG Bin, WANG Wen-gang, 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.

- [16] 康晓祺,何彦星,张风宝,等. 东北黑土坡耕地土壤化学计量特征变化对侵蚀的响应[J]. 水土保持学报, 2024,38(4):20-28.
KANG Xiao-qi, HE Yan-xing, ZHANG Feng-bao, et al. Response of Soil Stoichiometric to Soil Erosion on Slope Farmland in Black Soil Region of Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(4):20-28.
- [17] 魏哈梅,郑粉莉,冯志珍,等. 薄层黑土区流域尺度土壤养分对侵蚀-沉积的响应[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4):49-54.
WEI Han-mei, ZHENG Fen-li, FENG Zhi-zhen, et al. Responses of Soil Nutrients to Soil Erosion and Deposition at Watershed Scale in the Thin Layer Mollisol Area of Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(4):49-54.
- [18] 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 Song-wei, HE Xiu-bin, CHEN Yun-ming, 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.
- [19] LI T, ZHANG H C, WANG X Y, et al. Soil Erosion Affects Variations of Soil Organic Carbon and Soil Respiration Along a Slope in Northeast China[J]. Ecological Processes, 2019,8(1):28.
- [20] 方华军,杨学明,张晓平,等. 利用¹³⁷Cs技术研究黑土坡耕地土壤再分布特征[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3):464-468.
FANG Hua-jun, YANG Xue-ming, ZHANG Xiao-ping, et al. Redistribution Patterns of Black Soil in Hillslope Landform of Northeast China: A ¹³⁷Cs Study[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(3):464-468.
- [21] 阎百兴,汤洁. 黑土侵蚀速率及其对土壤质量的影响[J]. 地理研究, 2005,24(4):499-506.
YAN Bai-xing, TANG Jie. Study on Black Soil Erosion Rate and the Transformation of Soil Quality Influenced by Erosion[J]. Geographical Research, 2005, 24(4):499-506.
- [22] JILLING A, KEILUWEIT M, GUTKNECHT J L M, et al. Priming Mechanisms Providing Plants and Microbes Access to Mineral-associated Organic Matter [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 158: 108265.
- [23] ZHANG X B, ZHANG Y Y, WEN A B, et al. Assessment of Soil Losses on Cultivated Land by Using the ¹³⁷Cs Technique in the Upper Yangtze River Basin of China[J]. Soil and Tillage Research, 2003, 69(1/2): 99-106.
- [24] SL 190—2007, 土壤侵蚀分类分级标准[S].
SL 190—2007, Standard for Classification and Grading of Soil Erosion[S].
- [25] 刘华征,贾燕锋,范昊明,等. 东北松嫩典型黑土区长缓坡耕地土壤侵蚀沿坡长变化规律及其对土壤质量的影响[J]. 自然资源学报, 2022,37(9):2293-2305.
LIU Hua-zheng, JIA Yan-feng, FAN Hao-ming, et al. Variation of Soil Erosion Intensity Along the Long Gentle Farming Slopes and Its Influence on Soil Quality in the Typical Mollisol Region, Songnen Plain, Northeast China[J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(9):2293-2305.
- [26] 何彦星. 东北黑土区坡耕地土壤碳氮变化对侵蚀强度的响应研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2022.
HE Yan-xing. Response of Soil Carbon and Nitrogen Changes to Erosion Intensity on Sloping Cropland in the Black Soil Region of Northeast China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.
- [27] BORCHARD N, ADOLPHS T, BEULSHAUSEN F, et al. Carbon Accrual Rates, Vegetation and Nutrient Dynamics in a Regularly Burned Coppice Woodland in Germany[J]. Global Change Biology Bioenergy, 2017, 9(6):1140-1150.
- [28] QIU L P, WEI X R, GAO J L, et al. Dynamics of Soil Aggregate-associated Organic Carbon Along an Afforestation Chrono Sequence[J]. Plant and Soil, 2015, 391:237-251.
- [29] LI H Q, ZHU H S, QIU L P, et al. Response of Soil OC, N and P to Land-use Change and Erosion in the Black Soil Region of the Northeast China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 302:107081.
- [30] LU J, ZHENG F L, LI G F, et al. Effects of Raindrop Impact and Runoff Detachment on Hillslope Soil Erosion and Soil Aggregate Loss in the Mollisol Region of Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 161:79-85.
- [31] MIDWOOD A J, HANNAM K D, GEBRETSADIKAN T, et al. Storage of Soil Carbon as Particulate and Mineral Associated Organic Matter in Irrigated Woody Perennial Crops [J]. Geoderma, 2021, 403: 115185.
- [32] LAVALLEE J M, SOONG J L, COTRUFO M F. Conceptualizing Soil Organic Matter into Particulate and Mineral-associated Forms to Address Global Change in the 21st Century[J]. Global Change Biology, 2020, 26(1):261-273.
- [33] 何彦星,张风宝,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 Yan-xing, ZHANG Feng-bao, YANG Ming-yi. Effects of Soil Erosion on Organic Carbon Fractions in Black Soils in Sloping Farmland of Northeast China by Using ^{137}Cs Tracer Measurements [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(14): 60-68.
- [34] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 等. 黑土颗粒态有机碳与矿物结合态有机碳的变化研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(1): 153-158.
- LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, YANG Xue-ming, et al. Dynamics of Soil Particulate Organic Carbon and Mineral-incorporated Organic Carbon in Black Soils in Northeast China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(1): 153-158.
- [35] MARTINEZ-MENA M, LOPEZ J, ALMAGRO M, et al. Effect of Water Erosion and Cultivation on the Soil Carbon Stock in a Semiarid Area of South-East Spain [J]. Soil and Tillage Research, 2008, 99(1): 119-129.
- [36] WANG Y, ZHANG J H, ZHANG Z H. Influences of Intensive Tillage on Water-stable Aggregate Distribution on a Steep Hillslope [J]. Soil and Tillage Research, 2015, 151: 82-92.
- [37] WEI S, ZHANG X, MCLAUGHLIN N B, et al. Effect of Breakdown and Dispersion of Soil Aggregates by Erosion on Soil CO_2 Emission [J]. Geoderma, 2016, 264: 238-243.
- [38] 赵鹏志, 陈祥伟, 王恩姮. 黑土坡耕地有机碳及其组分累积-损耗格局对耕作侵蚀与水蚀的响应 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(11): 3634-3642.
- ZHAO Peng-zhi, CHEN Xiang-wei, WANG En-heng. Responses of Accumulation-loss Patterns for Soil Organic Carbon and Its Fractions to Tillage and Water Erosion in Black Soil Area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(11): 3634-3642.
- [39] FANG H Y, SUN L Y, QI D L, et al. Using ^{137}Cs Technique to Quantify Soil Erosion and Deposition Rates in an Agricultural Catchment in the Black Soil Region, Northeast China [J]. Geomorphology, 2012, 169/170: 142-150.
- [40] YANG Y H, YAN B X, ZHU H. Estimating Soil Erosion in Northeast China Using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ [J]. Pedosphere, 2011, 21(6): 706-711.
- [41] 周笑, 王彬, 樊华, 等. 东北黑土区坡面侵蚀-沉积过程对土壤有机碳组分的影响 [J]. 水土保持学报, 2025, 39(5): 158-168.
- ZHOU Xiao, WANG Bin, FAN Hua, et al. Impacts of Slope Erosion-deposition Processes on Soil Organic Carbon Fractions in Black Soil Region of Northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(5): 158-168.
- [42] ZHANG S, LIU G, CHEN S L, et al. Assessing Soil Thickness in a Black Soil Watershed in Northeast China Using Random Forest and Field Observations [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021, 9(1): 49-57.
- [43] 张林海, 曾从盛, 全川. 生源要素有效性及生物因子对湿地土壤碳矿化的影响 [J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5387-5395.
- ZHANG Lin-hai, ZENG Cong-sheng, TONG Chuan. A Review on the Effects of Biogenic Elements and Biological Factors on Wetland Soil Carbon Mineralization [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(18): 5387-5395.
- [44] KRAVCHENKO A N, NEGASSA W C, GUBER A K, et al. Intraaggregate Pore Structure Influences Phylogenetic Composition of Bacterial Community in Macroaggregates [J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 78(6): 1924-1939.
- [45] ZHOU H, PENG X, PERFECT E, et al. Effects of Organic and Inorganic Fertilization on Soil Aggregation in an Ultisol as Characterized by Synchrotron Based X-ray Micro-computed Tomography [J]. Geoderma, 2013, 195/196: 23-30.
- [46] JIANG Y J, SUN B, JIN C, et al. Soil Aggregate Stratification of Nematodes and Microbial Communities Affects the Metabolic Quotient in an Acid Soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 60: 1-9.
- [47] 陈晓芬, 刘明, 江春玉, 等. 不同施肥处理红壤性水稻土团聚体有机碳矿化特征 [J]. 中国农业科学, 2018, 51(17): 3325-3334.
- CHEN Xiao-fen, LIU Ming, JIANG Chun-yu, et al. Organic Carbon Mineralization in Aggregate Fractions of Red Paddy Soil Under Different Fertilization Treatments [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(17): 3325-3334.
- [48] 刘新坤, 孙盛凯, 段霄汉, 等. 耕作方式对土壤团聚体微生物及有机碳矿化的影响研究进展及展望 [J]. 中国农学通报, 2023, 39(7): 88-94.
- LIU Xin-kun, SUN Sheng-kai, DUAN Xiao-han, et al. Effects of Tillage Methods on Soil Aggregate Microorganisms and Organic Carbon Mineralization: A Review [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(7): 88-94.