



潘校成,蔡姗姗,孙磊,等.黑土区坡耕地土壤有机碳流失及治理研究进展[J].黑龙江农业科学,2025(3):100-105.

黑土区坡耕地土壤有机碳流失及治理研究进展

潘校成¹,蔡姗姗²,孙磊²,王伟²,高中超²,孙志玲²,罗龙涛³,李琳⁴

(1.融通农业发展(哈尔滨)有限责任公司,黑龙江哈尔滨 150010; 2.黑龙江省黑土保护利用研究院,黑龙江哈尔滨 150086; 3.东北农业大学资源与环境学院,黑龙江哈尔滨 150030; 4.黑龙江省生态研究所,黑龙江哈尔滨 150081)

摘要:坡耕地是分布在坡面上、地面平整度差的一类旱作耕地,因受地形影响,存在水肥流失、土壤流失等问题。水土流失不仅导致有机碳流失,还消耗了坡耕地土壤碳库。而传统的农耕方式欠缺水土保持措施,进一步加剧了土壤侵蚀与碳流失。采取相应的侵蚀治理措施,是降低土壤碳流失风险的重要途径。为了解析有机碳在坡耕地土壤中的周转过程并揭示治理技术对土壤碳流失的影响,综述了近年来国内外关于土壤有机碳流失及其治理技术的相关研究,揭示了物理、化学对碳流失的直接作用以及微生物的间接作用。分析了不同技术措施的碳阻控、碳补充效应,并对微生物作用下的土壤有机碳周转机制、不同有机碳组的分子结构、不同技术的固碳效应研究进行了展望。

关键词:坡耕地;侵蚀;土壤有机碳;碳流失;水土保持

土壤有机碳是土壤肥力形成、粮食生产和土壤健康的基础^[1],土壤碳储量动态直接影响着水体与大气圈的碳循环变化^[2-3],其收支动态研究备受关注^[4]。侵蚀作用可使 SOC 在土壤中的迁移再分布、矿化与固存过程发生变化,进而导致有机碳从土壤中流失与矿化损失^[5],影响土壤有机碳库的动态与土壤碳循环过程^[6]。农田土壤碳库是全球土壤碳库的重要组成部分^[7-8],坡耕地是土壤侵蚀的重点地区,尽管其仅占耕地总面积的 11.2%,但造成了全球近 50.5%的土壤侵蚀,其侵蚀率为整体土壤平均侵蚀率的 4 倍^[9]。当前,由于保护措施的缺乏或实施不到位造成的坡耕地有机碳流失日渐严重^[10]。

东北黑土是世界四大黑土带之一,也是中国重要的商品粮和绿色食品生产基地,其在地形、气候、人为等多方面都具有易造成土壤侵蚀的不利因素:如黑土地多为波状起伏的漫岗和高平原,坡耕地在耕地总面积中的占比达 59%;降水集中,多发于夏季;底土黏重、表土富含有机质,土壤抗蚀性差;坡耕地开垦种植过程中存在较多人为不合理利用情况,如顺坡起垄等,这些不利因素使土壤侵蚀造成了大量黑土有机碳流失。调查显示,在坡耕地水土流失及不合理利用下,黑土层的平

均厚度已由开垦前的 60~70 cm 降至 20 cm,且仍以每年 0.1~0.5 cm 的速度减少^[11]。明晰坡耕地土壤有机碳的运移规律及固持机制,以土壤固碳为目标有针对性地提出侵蚀治理措施,可有效防控当前东北黑土坡耕地土壤有机碳流失。本文综述了坡耕地土壤有机碳损失机制,对坡耕地固碳技术措施进行了解析,以期黑土坡耕地土壤固碳提供理论与技术参考。

1 坡耕地土壤有机碳损失的理化途径

侵蚀作用可导致坡耕地土壤有机碳产生质与量的动态变化,其中理化途径为导致变化的主要作用方式。这些途径主要包括^[12]:(1)矿化损失。包括原位土壤有机碳的矿化与侵蚀迁移过程中的矿化。受侵蚀影响,原位土壤中的有机碳会加速由有机形态转化为无机形态这一矿化过程,可导致土壤碳库的损失;在侵蚀迁移过程下,也可加速土壤有机碳的矿化过程。(2)团聚体破碎。侵蚀作用可破坏土壤团聚体结构,团聚体破碎使其中物理保护的有机碳分散并暴露环境中,进一步加剧流失。(3)直接流失。水力或融雪侵蚀等作用不仅带走土壤本身,还伴随着土壤有机碳的迁移,这些碳可能随着径流和土壤流失进入水体或其他生态系统。(4)沉积固定。在侵蚀物质的沉

收稿日期:2024-11-01

基金项目:国家大豆产业技术体系(CARS04);黑龙江省重点研发计划(JD22B002);国家重点研发计划(2022YFD1500903-1);中国与联合国开发计划署合作项目(CPR/21/401)。

第一作者:潘校成(1970—),男,硕士,高级农艺师,从事大豆土壤养分管理研究。E-mail:panxiaocheng81217@163.com。

通信作者:孙磊(1981—),男,博士,研究员,从事黑土肥力提升研究。E-mail:tufeisuosunlei@163.com。

积区域,土壤有机碳可能与无机矿物结合,形成有机无机复合体,这一过程对土壤碳的固定和长期存储具有重要影响。(5)富集埋藏。在侵蚀造成的土壤沉积环境中,富含有机碳的泥沙可能被深埋,这种埋藏作用对土壤有机碳的长期保存具有潜在影响。

以上途径,前3种直接造成了土壤有机碳的损失,这一整体损失过程可概括为:侵蚀营力可导致土壤团聚体破碎,其中雨水击溅、径流冲刷是主要作用力。土壤团聚体对有机碳具有物理保护作用,随着外部受力导致团聚体逐级分解,团聚体间与其内部的有机碳暴露出来,在加速矿化作用下向大气中释放损失。与此同时,径流冲刷作用带走了土壤表层富含的轻组分活性有机碳,进入水体等其他系统。而后两种途径,关于侵蚀对有机碳的沉积与深埋作用一直以来具有争议。相关的支持观点认为,沉积区土壤以矿质结合碳和微团聚体碳为主,形成一个惰性碳汇,如在方华军等^[13]研究中,长期处于沉积状态的坡脚部位,表层土壤大团聚体、土壤颗粒有机碳和大团聚体结合碳含量分别较坡顶低56.1%、47.9%和67.0%,而矿质结合碳和微团聚体结合碳分别较坡顶高10.0%和18.7%。反对观点则指出,在侵蚀过程中,绝大多数的碳在流失阶段即已发生完全矿化,因此,很难在沉积区进行富集^[14],虽然可通过埋藏作用实现一定程度的稳定,但在频繁的人为因素干扰等条件下也存在被重新释放的较大风险,难以被长期深埋^[12]。

在坡耕地土壤有机碳流失的理化途径中,地表侵蚀过程与土壤团聚体的破坏和损失之间存在密切关系。Ellison^[15]认为,在侵蚀过程中当土壤形成结皮以后,土壤大颗粒会分裂成大量的细小颗粒然后在土壤表层迁移,侵蚀区原位土壤的团聚体被破坏后,会造成有机碳矿化,使得土壤有机碳加速分解和损失。同时,由于有机碳主要分布在土壤表层,水蚀和耕作侵蚀容易造成土壤有机碳流失,土壤侵蚀不仅对土壤有机碳的损失有重要影响,还会使土壤固定和累积有机碳的能力下降。因此,研究坡耕地土壤团聚体在土壤侵蚀过程中破碎和损失的特征规律及其与土壤有机碳流失之间的关系,对土壤侵蚀机理的揭示有重要的科学价值。

2 坡耕地土壤有机碳的生物稳定机制

坡耕地土壤侵蚀引发的有机碳流失在作用机

制方面属于间接效应。这一过程来源于侵蚀对土壤及生态环境的影响,进而作用于土壤微生物的生长环境、空间分布和活性,最终对坡面土壤碳库的输入、循环与损失产生影响。坡耕地侵蚀对微生物作用下的间接碳损失途径主要包括:(1)生长环境改变。土壤侵蚀营力改变了坡耕地的土壤与水环境,使微生物群落在坡面上被迁移再分布^[16],这一改变驱动了不同坡面位置土壤呼吸作用与微生物矿化特征的差异。(2)生物活性改变。在理化损失途径中,土壤水力侵蚀对团聚体的破坏,释放出大量处于休眠状态的微生物^[17],使微生物群落结构组成改变,从而影响土壤碳库的周转与流失。(3)底物有效性改变。侵蚀优先搬运坡面上轻质活性碳组分成为土壤微生物的重要碳源,通过生物作用被利用分解进入大气中^[13,17-18]。在侵蚀作用驱使下,土壤微环境的变化共同作用于微生物,决定了不同坡面位置土壤有机碳的流失动态。

侵蚀与碳流失的理化途径导致了坡耕地土壤性状的变化,为微生物提供了不同的生境,从而造就了不同坡面位置上微生物固碳机制的差异。研究发现,与坡上侵蚀位置相比,坡下沉积部位的土壤养分含量与团聚体稳定性更高,为土壤微生物提供了更好的生存条件,从而导致坡下土壤中的微生物具有更高的丰富度和多样性^[16]。这种土壤性质的差异驱使了微生物群落结构的改变,使坡下沉积部位的微生物群落中真菌/细菌比例增加^[19]。微生物对土壤有机碳循环及封存机制产生影响主要通过真菌和细菌两种主导途径,但其内在机制非常复杂^[20-21]。研究表明,土壤环境的变化会显著影响土壤中细菌与真菌的生物量,土地利用强度的增加与细菌生物量呈反比,这一变化将加速土壤有机碳的损失^[22]。Bastida等^[23]的研究得出了相似结论,认为土壤中细菌生物量占比越高,越不利于土壤有机碳的固定。Ganjegunte等^[24]进一步指出,土壤微生物群落结构组成受底物来源影响,这一差异将进一步作用于土壤有机碳的周转。Nannipieri等^[25]指出,细菌和真菌对土壤侵蚀的抵御能力不同是由于二者直径不同造成,尺寸较小的细菌易被团聚体保护,而真菌则多附着于土壤团聚体表面。因此,由于真菌的高碳利用效率及其细胞壁的低生物降解性,侵蚀地点真菌群落优势的减少将会增加碳的周转率、减少碳的固存^[26]。

因此,坡耕地土壤有机碳的生物作用是在侵蚀环境影响下,土壤微生物群落结构与功能改变引发的生物反应过程。深入解析土壤微生物的分布与作用机制,进一步明确土壤有机碳迁移与固定过程中的微生物作用机理,是实现坡耕地土壤固碳的一个关键的科学问题。

3 坡耕地土壤固碳技术研究进展

土壤有机碳固持是指通过一些管理措施将大气中的 CO_2 或外源碳固定在土壤中,提高土壤中有机碳的含量,并减少原有土壤有机碳分解及流失的过程^[27]。当前,农田土壤中的有机碳含量动态正逐渐成为全球范围内有机碳研究领域的焦点,联合国粮食与农业组织(FAO)、美国、欧盟等国际组织和国家,纷纷发起农田土壤固碳与增碳研究^[28]。

针对当前公认的土壤有机碳化学、物理与生物稳定机制^[29],了解有机碳在土壤中的稳定机制、明确固碳过程中土壤性质与环境因子的交互作用,有助于制定针对性固碳技术措施。土壤有机碳库的平衡理论指出:土壤有机碳含量的变化取决于土壤有机碳输入和输出之间的动态平衡^[30]。基于有机碳平衡理论,结合土壤有机碳稳定机制,可以明确土壤固碳需要通过增加土壤碳库的有机碳输入和降低土壤原有碳库损失的两条途径,使增加的土壤有机碳抵消并超过由于矿化和侵蚀作用而损失的有机碳,达到土壤固碳目的。以土壤碳平衡理论与稳定机制为指导,结合坡耕地治理技术应用,坡耕地农田土壤固碳技术措施可分为以下四类。

3.1 农艺技术措施

包括少耕免耕、横坡垄作、地膜覆盖、秸秆覆盖等措施。在不同的土地利用方式下,作物还田模式、地表覆盖度都将产生差异,这种差异进一步影响着土壤的碳输入量与分解速率,最终对土壤有机碳的固存产生显著影响。张兴义等^[31]在松嫩平原黑土坡耕地上的研究表明,免耕覆盖可显著提高土壤水稳性大团聚体含量、减少径流与土壤流失,有利于有机碳的积累。在东北黑土区草甸土进行地膜覆盖处理,可以显著提高土壤有机碳含量、促进腐殖质积累,增加土壤固碳能力^[32]。Ghimire等^[33]在美国中西部的研究表明,在覆盖种植条件下,土壤侵蚀营力作用受到抑制,土壤养分循环与碳循环得到促进,可改善土壤肥力现状、提升抗蚀性与农业可持续性。农艺技术措施主要

通过改善土壤物理结构和增加地表覆盖度,减少侵蚀碳流失、改变土壤碳输入与分解,进而促进土壤有机碳固存,提升土壤肥力与农业可持续性。

3.2 生物技术措施

包括构建农林复合结构、退耕还林、种植植物篱等措施。生物措施可以直接影响投入有机碳空间分布与固持现状,同时,生物措施还可改变土壤有机碳的周转途径而间接影响有机碳固定。在德国慕尼黑针对4年农林复合系统的研究表明,灌木植物带(刺槐)可增加土壤有机碳含量,使活性碳库中高稳定性碳组分富集,特别是植物根际的碳固定作用是土壤固碳的重要途径^[34]。在黄土高原典型小流域塄堰沟针对土壤有机碳及土壤活性有机碳组分空间分布的研究中^[35],林灌地、草地措施可显著提升表层土壤中的颗粒有机碳、轻组有机碳和重组有机碳含量。通过监测绿篱和草带对多种生态系统服务指标的影响^[36],发现与对照耕地相比,草带土壤有机碳存量增加最为显著,其次是灌木林。生物技术措施主要通过植物根系能形成根网来减少水土流失,同时增加一定的植被覆盖度实现生物固土,降低坡面径流量,减少土壤有机碳随水土流失而带来的风险。生物技术措施的应用有助于通过减少碳流失,提高土壤肥力和作物产量,为长期利用耕地提供有力保障。

3.3 工程技术措施

包括梯田、水土保持坝、坡面截水沟修建等措施。在黄土高原区的研究结果表明,与未治理的坡耕地相比,采用梯田改造工程技术措施下,土壤有机碳含量增加了0.14倍^[37];在陇东黄土丘陵沟壑区,坡耕地长期实施梯田技术措施(50年),0~60 cm土壤有机碳含量增加34%~55%,有机碳总量在24年后会有显著提高,并在后期趋于稳定^[38]。陈敏全等^[39]在云南山区红壤坡耕地实施了高反坡阶技术,发现未治理坡耕地在雨季降水后有机碳损失达10%,而实施高反坡梯田技术措施的地块在雨季降水后有机碳损失仅为4%,这是由于高反坡梯田技术措施改变了坡耕地微地形,从而抑制了有机碳的径流损失。工程技术措施通过地形改造与水土保持能够减少径流速度和动能,减少降雨对土壤的冲刷,进而减少土壤有机碳的流失,不仅可提高农田的生产力,还将促进生态环境的恢复和保护。

3.4 外源有机物料添加技术措施

包括秸秆还田、有机肥施用和生物炭施用等措施。农艺、生物与工程技术措施主要通过减少有机碳的迁移与输出进行固碳,而外源有机物料添加技术措施则主要通过增加农田土壤有机碳投入来提升土壤碳含量^[40]。在紫色土坡耕地上施用猪粪堆肥和秸秆还田均可显著增加耕层土壤有机碳含量,并使表层土壤有机碳中烷氧基碳和羧基碳的比例增加,从而提高有机碳库稳定性^[41]。张健乐等^[42]针对三峡库区典型紫色土坡耕地的研究表明,生物炭与化肥配施可显著提升耕层土壤有机碳含量,改变土壤侵蚀造成的坡耕地碳流失现状。魏永霞等^[43]在黑土区不同坡度的坡耕地上实施了生物炭施用技术,发现施炭后土壤有机碳可提升 9.54%~18.21%,并提出单次施用生物炭对培肥土壤作用的有效年限为 6~7 年。在红壤坡耕地上通过对秸秆、生物炭、猪粪有机肥的施用效果进行比对发现,3 种外源有机物料均有一定的阻控侵蚀效果,其中猪粪有机肥是该地区坡耕地固碳的最佳技术措施^[44]。外源有机物料可以作为有机胶结物质,促进土壤大团聚体的形成,从而稳定土壤结构和减少有机碳的流失。同时,添加外源有机物料可以直接增加土壤中的有机碳含量。

综上所述,不同土壤固碳技术措施均有显著阻控碳流失、提升土壤有机碳含量的作用。其中,农艺措施、外源有机物添加措施更适用于黑土坡耕地长缓坡地形与集约化农业需求,能够提高农业资源的利用效率,在黑土坡耕地上治理碳流失方面具有广阔的应用前景。

4 结论与展望

我国东北黑土区是国家重要的粮食产区,减少黑土坡耕地碳流失、提升黑土肥力是当前亟待解决的农业问题。综合现有研究,坡耕地土壤有机碳流失是一个复杂的过程,由物理(土壤团聚体破坏、迁移再分配)、化学(有机碳矿化、分解再结合)的直接途径,以及微生物(群落分布及生物活性改变的驱动作用)间接途径为主导。有机碳流失主要通过理化途径实现,包括土壤侵蚀导致的团聚体崩解、有机碳随径流迁移、泥沙搬运与再分布过程中的有机碳矿化;同时依靠生物稳定机制间接提升土壤有机碳的固存。将坡耕地土壤有机碳流失的物理、化学、微生物三种途径系统结合进行研究,可获取更多坡耕地土壤有机碳周转的信息,全面解析有机碳固持机理。通过实施保护性

耕作与生物工程等技术措施,可以保持土壤结构的稳定性,减少因耕作导致的土壤扰动和有机碳暴露。同时增加地表覆盖物与外源碳投入,能够增强土壤对降雨的截留能力、补充有机碳,降低土壤有机碳随水流失的风险。结合当前国内外研究现状,在今后的研究中仍有以下问题尚待进一步探讨。

(1)目前,虽然国内外针对坡耕地有机碳的物理运移、分布及化学组成已有了较多研究,但关于坡耕地土壤有机碳固持的微生物机制则鲜有研究报道。微生物群落结构、微生物驱动的土壤有机碳周转过程均与土地利用方式关系密切^[45],在当前的研究中,坡耕地土壤微生物与有机碳的研究多缺乏整体性与连接性,有机碳转化过程中不同类群微生物的碳固持作用仍不明确。在未来的研究中,应从土壤微生物群落结构对坡耕地侵蚀治理的响应入手,结合宏基因组测序技术手段,进一步探索坡耕地土壤微生物作用下的土壤有机碳周转机制,分析微生物在有机碳固持过程中的作用,有助于深入解析土壤固碳机制,系统揭示黑土区坡耕地土壤有机碳的分布特征及转化过程。

(2)免耕或秸秆还田等措施对坡耕地土壤有机碳分解的减缓作用已被揭示^[46],但其有机碳分解转化的内在驱动机制尚未完全明晰。同时,土壤有机碳的组成成分多样、分子结构复杂,已有的研究多将坡耕地土壤有机碳作为整体进行探讨^[47],往往难以全面解析其转化过程。从不同有机碳组分切入,结合有机碳分子结构进行深入研究,更有助于全面系统了解黑土区坡耕地有机碳对不同治理措施的响应机制。

(3)由于坡耕地侵蚀过程较为复杂,固碳技术措施在减缓土壤径流流失、土壤流失、碳固定等方面的平衡作用,以及各措施在不同地域环境下的有效性仍未确定。例如,Chen 等^[48]通过 Meta 分析发现,生物篱、草地覆盖等生物措施的减少坡耕地土壤侵蚀效果比免耕、改变垄向等农艺耕作措施更有效。Niu 等^[49]基于全球尺度的分析发现,覆盖物在减少坡耕地土壤侵蚀方面远不如生物篱、草地等生物种植方法有效。不同的气候、地形和管理系统的土壤侵蚀过程差异很大,不同的水土保持措施产生的效果也不同。并且由于水土保持措施对土壤碳库的影响是一个长期复杂的过程^[50],水土保持措施对土壤有机碳的来源、组成和收支变化的影响仍不明确。在未来的坡耕地侵蚀阻控技术实施过程中,应加强监测不同技术的固碳效应,针对性制定黑土区坡耕地治理措施。

参考文献:

- [1] KANG L F, WU J M, ZHANG C F, et al. Alterations of soil aggregates and intra-aggregate organic carbon fractions after soil conversion from paddy soils to upland soils: distribution, mineralization and driving mechanism [J]. *Pedosphere*, 2024, 34(1): 121-135.
- [2] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [3] TIFAFI M, GUENET B, HATTÉ C. Large differences in global and regional total soil carbon stock estimates based on SoilGrids, HWSD, and NCSCD: intercomparison and evaluation based on field data from USA, England, Wales, and France[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2018, 32(1): 42-56.
- [4] LAL R. Accelerated Soil erosion as a source of atmospheric CO₂[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 188: 35-40.
- [5] 王洪雨,于寒青.基于文献计量分析的土壤侵蚀与土壤有机碳动态研究进展与展望[J].*土壤通报*,2023,54(6):1470-1483.
- [6] YAO Y F, SONG J X, WEI X R. The fate of carbon in check dam sediments[J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 224: 103889.
- [7] LAL R, GRIFFIN M, APT J, et al. Managing soil carbon [J]. *Science*, 2004, 305(5690):1567.
- [8] KUMAR R, PANDEY S, PANDEY A. Plant roots and carbon sequestration[J]. *Current Science*, 2006, 91(7): 885-890.
- [9] BORRELLI P, ROBINSON D A, FLEISCHER L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 2013.
- [10] NASIR AHMAD N S B, MUSTAFA F B, MUHAMMAD YUSOFF S Y, et al. A systematic review of soil erosion control practices on the agricultural land in Asia [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2020, 8(2): 103-115.
- [11] 黑龙江省土地管理局黑龙江省土壤普查办公室. 黑龙江土壤[M].北京:农业出版社,1992.
- [12] LAL R. Soil erosion and the global carbon budget[J]. *Environment International*, 2003, 29(4): 437-450.
- [13] 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.
- [14] SCHLESINGER W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils [J]. *Nature*, 1990, 348: 232-234.
- [15] ELLISON W D. Studies of raindrop erosion[J]. *Agricultural Engineering*, 1944, 25: 131-136.
- [16] LI Z W, XIAO H B, TANG Z H, et al. Microbial responses to erosion-induced soil physico-chemical property changes in the hilly red soil region of Southern China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2015, 71: 37-44.
- [17] 方华军,杨学明,张晓平,等.土壤侵蚀对农田中土壤有机碳的影响[J].*地理科学进展*,2004,23(2):77-87.
- [18] JACINTHE P A, LAL R. A mass balance approach to assess carbon dioxide evolution during erosional events [J]. *Land Degradation & Development*, 2001, 12(4): 329-339.
- [19] HUANG J Q, LI Z W, ZENG G M, et al. Microbial responses to simulated water erosion in relation to organic carbon dynamics on a hilly cropland in subtropical China [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 60: 67-75.
- [20] KIEM R, KÖGEL-KNABNER I. Contribution of lignin and polysaccharides to the refractory carbon pool in C-depleted arable soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(1): 101-118.
- [21] MOORE J C, McCANN K, SETÄLÄ H, et al. Top-down is bottom-up: does predation in the rhizosphere regulate aboveground dynamics? [J]. *Ecology*, 2003, 84(4): 846-857.
- [22] BAILEY V L, SMITH J L, BOLTON H. Fungal-to-bacterial ratios in soils investigated for enhanced C sequestration[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(7): 997-1007.
- [23] BASTIDA F, TORRES I F, HERNÁNDEZ T, et al. Can the labile carbon contribute to carbon immobilization in semiarid soils? Priming effects and microbial community dynamics[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 892-902.
- [24] GANJEGUNTE G K, CONDRON L M, CLINTON P W, et al. Effects of the addition of forest floor extracts on soil carbon dioxide efflux [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2006, 43(2): 199-207.
- [25] NANNIPIERI P, ASCHER J, CECCHERINI M T, et al. Microbial diversity and soil functions [J]. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54(4): 655-670.
- [26] XIAO H B, LI Z W, CHANG X F, et al. The mineralization and sequestration of organic carbon in relation to agricultural soil erosion[J]. *Geoderma*, 2018, 329: 73-81.
- [27] AKPA S I C, ODEH I O A, BISHOP T F A, et al. Total soil organic carbon and carbon sequestration potential in *Nigeria*[J]. *Geoderma*, 2016, 271: 202-215.
- [28] KROODSMA D A, FIELD C B. Carbon sequestration in California agriculture, 1980-2000[J]. *Ecological Applications*, 2006, 16(5): 1975-1985.
- [29] LÜTZOW M V, KÖGEL-KNABNER I, EKSCHMITT K, et al. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions-a review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57(4): 426-445.
- [30] POEPLAU C, DON A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops-A meta-analysis [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 200: 33-41.
- [31] 张兴义,李健宇,郭孟洁,等.连续14年黑土坡耕地秸秆覆盖免耕水土保持效应[J].*水土保持学报*,2022,36(3): 44-50.
- [32] 李颖,吴景贵.稻草秋季薄浆旋耙还田及覆膜对土壤有机碳组成及特征影响[J/OL].*吉林农业大学学报*,1-7[2024-10-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1100.S.20230727.1527.003.html>.
- [33] GHIMIRE R, GHIMIRE B, MESBAH A O, et al. Current status, opportunities, and challenges of cover cropping for sustainable dryland farming in the Southern Great Plains[J]. *Journal of Crop Improvement*, 2018, 32(4): 579-598.
- [34] SUN H Y, KOAL P, GERL G, et al. Response of water

- extractable organic matter and its fluorescence fractions to organic farming and tree species in poplar and *Robinia*-based alley cropping agroforestry systems[J]. *Geoderma*, 2017, 290: 83-90.
- [35] 王伟,李占斌,李鹏,等.生态建设对坡面土壤有机碳分布的影响[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(2): 35-41.
- [36] van VOOREN L, REUBENS B, AMPOORTER E, et al. Monitoring the impact of hedgerows and grass strips on the performance of multiple ecosystem service indicators [J]. *Environmental Management*, 2018, 62(2): 241-259.
- [37] 李占斌,周波,马田田,等.黄土丘陵区生态治理对土壤碳氮磷及其化学计量特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 312-318.
- [38] 邱宇洁,许明祥,师晨迪,等.陇东黄土丘陵区坡改梯田土壤有机碳累积动态[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(1): 87-98.
- [39] 陈敏全,王克勤.等高反坡阶对坡耕地土壤碳库的影响[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(6): 41-46, 52.
- [40] HE Y T, ZHANG W J, XU M G, et al. Long-term combined chemical and manure fertilizations increase soil organic carbon and total nitrogen in aggregate fractions at three typical cropland soils in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 532: 635-644.
- [41] 刘玲,崔俊芳,杨红薇,等.长期外源有机物料添加对川中丘陵区农田土壤养分和有机碳组分的影响[J]. *土壤*, 2023, 55(5): 991-1000.
- [42] 张健乐,曾小英,史东梅,等.生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(4): 2209-2218.
- [43] 魏永霞,肖敬萍,王鹤,等.施加生物炭对黑土区坡耕地改土培肥效应的持续影响[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(3): 305-314.
- [44] 张白雪,何福红,朱巧红,等.有机培肥对红壤坡耕地产流产沙的影响[J]. *土壤*, 2017, 49(6): 1237-1242.
- [45] SIX J, FREY S D, THIET R K, et al. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(2): 555-569.
- [46] PAUSTIAN K, LEVINE E, POST W M, et al. The use of models to integrate information and understanding of soil C at the regional scale[J]. *Geoderma*, 1997, 79(1/2/3/4): 227-260.
- [47] TRIGALET S, van OOST K, ROISIN C, et al. Carbon associated with clay and fine silt as an indicator for SOC decadal evolution under different residue management practices[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 196: 1-9.
- [48] CHEN J, XIAO H B, LI Z W, et al. How effective are soil and water conservation measures (SWCMs) in reducing soil and water losses in the red soil hilly region of China? A meta-analysis of field plot data[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 735: 139517.
- [49] NIU Y H, WANG L, WAN X G, et al. A systematic review of soil erosion in *Citrus* orchards worldwide[J]. *CATENA*, 2021, 206: 105558.
- [50] LAL R. Soil degradation by erosion[J]. *Land Degradation & Development*, 2001, 12(6): 519-539.

Research Progress on Soil Organic Carbon Loss and Control in Sloping Farmland in Black Soil Areas

PAN Xiaocheng¹, CAI Shanshan², SUN Lei², WANG Wei², GAO Zhongchao², SUN Zhiling², LUO Longtao³, LI Lin⁴

(1. Rongtong Agricultural Development (Harbin) Co., Ltd., Harbin 150010, China; 2. Heilongjiang Academy of Black Soil Conservation and Utilization, Harbin 150086, China; 3. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 4. Heilongjiang Ecology Institute, Harbin 150081, China)

Abstract: Slope farmland, characterized by its distribution on slopes with uneven terrain, is a type of dryland farmland. The topography of these areas leads to issues such as water and fertilizer runoff and soil erosion. Soil erosion not only causes the loss of organic carbon but also depletes the soil carbon pool of sloping farmland. Traditional farming practices that lack soil and water conservation measures further intensify soil erosion and carbon loss. Therefore, implementing effective erosion control measures is crucial for mitigating the risk of soil carbon loss. To better understand the turnover process of organic carbon in the soil of sloping farmland and to assess the impact of remediation techniques on soil carbon loss, this review examines recent domestic and international research on soil organic carbon loss and its remediation techniques. The article highlights the direct effects of physical and chemical factors on carbon loss and the indirect effects of microorganisms. It also analyzes the carbon blocking and replenishment effects of various technological measures and anticipates future research on the soil organic carbon turnover mechanism under microbial action, the molecular structure of different organic carbon groups, and the carbon sequestration potential of different technologies.

Keywords: slope farmland; erosion; soil organic carbon; carbon loss; water and soil conservation