

黄凯文,马 珍,苦君月,等. 土壤有机碳损失机制研究进展[J]. 江苏农业科学,2022,50(24):26-32.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.24.004

土壤有机碳损失机制研究进展

黄凯文¹, 马 珍¹, 苦君月¹, 张珍明², 姜 鑫¹, 黄先飞¹

(1. 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵州贵阳 550001;

2. 贵州省生物研究所, 贵州贵阳 550008)

摘要:土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,土壤有机碳作为土壤碳库的重要组成部分,由于其储量巨大且性质较为活跃,其产生的任何微小变化都将对全球气候产生影响。近年来,土壤有机碳在全球碳循环、气候变化及农业发展等领域备受关注。因此,明晰土壤有机碳的损失机制对于应对气候变化、生态环境保护及农业可持续发展等具有重要意义。本文主要从自然和人为两大方面对土壤有机碳的损失机制进行探讨,其中自然因素主要由气候变化(温度、降水、CO₂ 浓度)、土壤侵蚀(水蚀、风蚀)引起的土壤有机碳损失;人为因素主要由土地利用/覆被类型的变化(将富含有机质的森林、草地和湿地土壤转变为农田土壤)以及农田管理措施(耕作、施肥)引起的土壤有机碳损失,最后根据国内外学者的研究结论和思路提出建议与展望,以期土壤有机碳损失的进一步研究提供理论依据。

关键词:土壤有机碳;损失机制;气候变化;土壤侵蚀;土地利用;农田管理

中图分类号:P593;S153.6⁺2 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)24-0026-07

全球气候变暖已成为不争的事实,其主要原因是近代人类活动造成温室气体的大量排放。为应对这一问题,国际社会做出了不少努力,我国也于2016 年加入《巴黎协定》并在2020 年又向世界郑重承诺力争于2030 年前实现碳达峰,于2060 年前实现碳中和,体现了大国责任与担当^[1]。土壤是陆地

生态系统中最大的碳库,土壤有机碳不仅是土壤肥力的主要组成部分,而且是土壤健康的重要评价指标,同时对土壤微域环境具有调节作用,是全球碳循环、气候变化等方面研究的核心^[2-3]。全球土壤有机碳储量约为1 500 Pg,是大气碳库的2 倍,是植物碳库的2~4 倍^[4]。由于土壤有机碳库储量巨大,其产生的任何微小变动,都可能造成全球碳循环失衡,大气 CO₂ 浓度强烈波动,引发气候问题。有关土壤碳循环及有机碳的转化机制见图1。因此,研究土壤有机碳的损失机制对全球气候变暖、土壤资源利用等领域至关重要。目前,国内有关土壤有机碳的研究论文主要集中在有机碳储量估算、时空分布及影响因素分析等方面,而对土壤有机碳损失机制缺乏系统评述。笔者梳理了国内外相关研究,主要从自然和人为两大方面综述土壤有机碳的损失

收稿日期:2022-03-08

基金项目:中国博士后科学基金(编号:2020M673582XB);贵州省普通高等学校青年科技人才成长项目(编号:黔教合 KY 字[2021]302)。

作者简介:黄凯文(1996—),男,江苏淮安人,硕士研究生,主要从事土壤有机碳的损失与转化机制研究。E-mail: hkw334420@163.com。

通信作者:黄先飞,博士,副研究员,主要从事环境科学研究。E-mail: hxfswjs@gznu.edu.cn。

草莓再植病害的研究[J]. 中国农业科学,2005,38(4):730-735.

[123] 郭会婧,蒋继志,孙琳琳,等. 几种植物提取液混配对草莓立枯丝核菌的抑制作用[C]//彭友良. 中国植物病理学会2006 年学术年会论文集. 北京:中国农业科学技术出版社,2006:448-453.

[124] 吴 迪. 一种防治草莓病害的植物源生物农药:CN104872203A[P]. 2015-09-02.

[125] 张 华. 一种防治草莓根腐病的植物源杀菌剂:CN105941504A[P]. 2016-09-21.

[126] 黄朝纲. 一种基于愈创木酚治疗草莓根腐病的组合物及施用方法:CN106982828A[P]. 2017-07-28.

[127] 张国前,郑 阳,张 健. 一种利用棉籽饼制备的草莓根腐病防治剂:CN106070342A[P]. 2016-11-09.

[128] Großkopf T, Soyer O S. Synthetic microbial communities[J]. Current Opinion in Microbiology,2014,18:72-77.

[129] de Roy K, Marzorati M, van den Abbeele P, et al. Synthetic microbial ecosystems: an exciting tool to understand and apply microbial communities[J]. Environmental Microbiology,2014,16(6):1472-1481.

[130] Vorholt J A, Vogel C, Carlström C I, et al. Establishing causality: opportunities of synthetic communities for plant microbiome research[J]. Cell Host & Microbe,2017,22(2):142-155.

机制,并对未来土壤有机碳损失的研究重点进行了展望,为探究全球气候变化和生态环境保护以及实

现我国“双碳”目标提供科学参考。

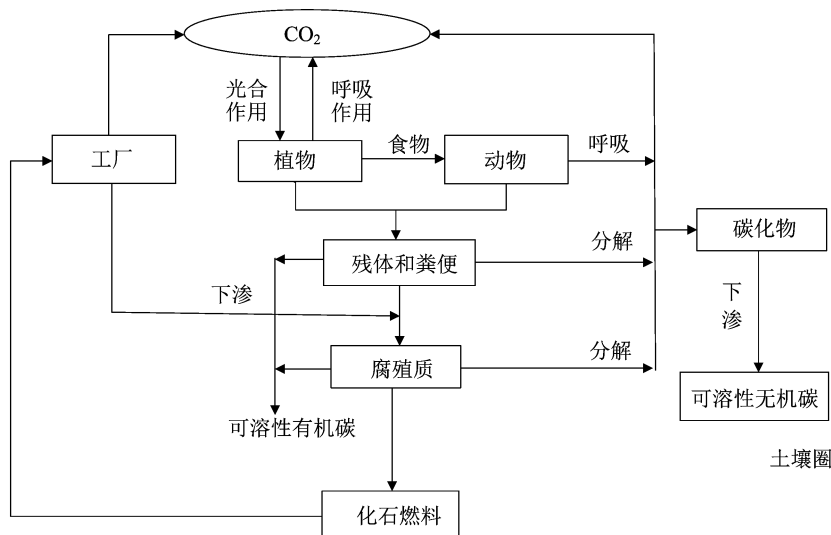


图1 土壤碳循环及有机碳转化过程

1 气候变化

在自然条件下,气候变化对土壤有机碳库的影响复杂多样,气候变化的影响主要是指温度、降水、CO₂等气候因子的变化引起的土壤碳库的损失。

1.1 温度的升高

温度是控制土壤有机碳动态变化的重要影响因素。温度的升高可以改变土壤中微生物的数量、活性及群落结构,从而促进土壤的呼吸作用^[5]。温度还会影响植物生长及分布,较高的温度抑制植被凋落物的分解从而降低地表碳的输入量,同时土壤酶活性和速度也会增强,最终加速土壤有机碳的分解。Gao等研究发现,15~25℃时有机碳矿化速率的温度敏感性(Q₁₀)低于25~35℃,表明更高的温度环境会加快土壤中碳的释放^[6]。Wang等研究发现,温度的升高会引起大团聚体向微团聚体和淤泥、黏土的转变,特别是在30~50℃时,土壤团聚体稳定性会随着温度的升高而显著降低^[7]。Sun等通过空间代替时间的方法也证实了上述观点,发现表层20 cm土壤有机碳含量从温带的89.2 g/kg下降到亚热带的57.7 g/kg,认为探究土壤有机碳与气候变暖之间的响应机制需结合土壤理化性质、有机碳组分和微生物群落之间的相互作用进行分析^[8]。如今全球气候变暖广受关注,但由于年际变化不显著,其对土壤碳库的影响容易被忽视,同时气候变

暖引发的系列生态问题(如冰川和冻土层融化、海平面上升等)对土壤碳库的影响也需引起重视。

1.2 降水的变化

降水会破坏表层土壤团聚体结构,改变土壤水分状况和微生物的生存环境,刺激土壤呼吸作用,从而对土壤有机碳积累及其储量平衡产生影响。朱猛等对祁连山草原土壤含水量和有机碳密度进行回归分析,其相关系数高达0.85,表明土壤水分含量是影响土壤有机碳变化的主导因素^[9],这与Kerr等的研究^[10]一致。Zheng等研究发现,降水后由土壤呼吸引起的碳排放量增加约33%^[11]。Maillard等对加拿大萨省30年间降水对土壤碳储量的影响进行了研究,发现土壤碳的输入量和分解量均随着降水的增加而增加,但表观碳分解的增加超过地表生物量碳输入的增加,最终导致有机碳储量的减少^[12]。以上学者均表示降水会加速土壤有机碳损失,也有研究认为,降水使土壤孔隙堵塞形成厌氧环境,水起着保护层的作用,抑制了微生物活动和有机物分解,有助于土壤有机碳的积蓄^[13]。适度的降水会增加土壤的微生物生物量和电导率,缓解土壤盐碱化,进而抑制有机碳的分解,但极端降水则会刺激有机碳的分解^[14]。可见,降水对土壤有机碳储量的影响并无明确结论,但极端降水则必定会引起有机碳的损失,郑小俊等已对极端气候下有机碳的损失机制进行了探讨^[15]。

1.3 CO₂ 浓度的升高

美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 监测数据显示,大气中的 CO₂ 浓度于 2019 年 5 月已超过 415 ppm,达到监测以来的历史之最,若不加以控制,大气 CO₂ 浓度将于 2250 年达约 2 000 ppm^[16]。大气 CO₂ 浓度升高主要从以下 3 个方面造成土壤碳的损失:(1) CO₂ 浓度升高会改变地表植被的生存环境,使得植物残体分解速率放缓,从而削减地上部分碳的输入。周晓宇等发现,当 CO₂ 浓度达到原先的 2 倍,地表凋落物中的 C/N 将上升 20% ~ 40% 且木质素/N 也会有所上升,从而降低了地表凋落物质的分解速率^[17]。(2) CO₂ 浓度升高促进植物根系的发展和微生物数量的增长。Fontaine 等发现,CO₂ 浓度升高会刺激土壤中纤维素量的增加,进而引起土壤微生物数量的增加,这些微生物在纤维素耗尽后仍可继续加速有机碳矿化,从而间接造成

有机碳库的损失^[18]。(3) CO₂ 浓度升高导致气候变暖,加速了土壤有机碳的矿化分解。已有众多学者通过模型或试验证明了气候变暖将会导致土壤碳的损失^[6-8]。尽管 CO₂ 浓度升高引发的“施肥效应”可提高植被的固碳能力,但研究 CO₂ 浓度对有机碳库的作用机制还需考虑其他胁迫因子的影响,这也是日后研究的重点。

2 土壤侵蚀作用

土壤侵蚀是指土壤在水力、风力、重力等外力作用下,土壤物理结构和化学成分发生变化,包括剥蚀、搬运、堆积等过程。土壤侵蚀过程会破坏土层结构,降低土壤肥力,损坏基础设施,堆积河道,加剧洪涝灾害,对环境的危害极大。有关土壤风蚀、水蚀的基本信息见表 1。

表 1 土壤侵蚀的基本信息

类型	范围	发生地区	土壤侵蚀面积 (万 km ²)
水力侵蚀	全球	主要发生在 50°N ~ 40°S 之间	1 094.00
	中国	主要分布在 20°N ~ 50°N 之间,如西北黄土高原、西南山地丘陵等	113.47
风力侵蚀	全球	主要发生在半干旱与干旱地区和周期性干旱的湿润地区	3 600.00
	中国	主要分布在青海和新疆等地,以柴达木地区为代表	157.61

注:全球、中国的碳损失量分别为 7.2 × 10¹¹ kg/年^[19]、4.5 × 10¹⁰ kg/年^[20]。

2.1 水力侵蚀

土壤水蚀是指土壤在水力作用下,地表物质遭到破坏、推移、沉积的过程。目前,相关学者对水蚀的研究大多仅关注于侵蚀过程中有机碳的矿化损失,缺乏对全过程的综合探讨。黄金权等认为,研究水蚀对土壤有机碳动态分布的影响应从水平迁移、垂直淋融、搬运矿化以及沉积封存 4 个过程进行综合考虑^[21]。土壤水蚀对全球碳的平衡与循环至关重要,有效识别水蚀对土壤有机碳损失的作用机制意义重大。水蚀对土壤有机碳损失的作用机制主要包括:(1) 通过雨水的滴溅和地表径流的剥蚀扰乱原本土壤的空间分布格局,破坏团聚体的物理结构,使封闭在团聚体中的有机碳暴露在外,易被土壤微生物快速分解利用^[22];(2) 径流裹挟着大量泥沙引起土壤质量和土壤肥力降低,从而影响植被的生长和微生物生物量的积累,造成恶性循环;(3) 水蚀可加速土壤有机碳的垂向淋溶,土壤有机碳以溶解或游离的形式随地表径流下渗到深层土壤^[21];(4) 水蚀过程破坏土壤结构,同时释放出大量处于

休眠态的土壤微生物,加速了土壤有机碳的矿化,间接作用于土壤有机碳的损失^[23]。

2.2 风力侵蚀

风蚀是指地表松散物质被风吹起、搬运、堆积的过程,主要包括吹蚀、磨蚀、擦蚀等形态。与水蚀对土壤的影响相似,风蚀会引起土壤结构的破坏,土壤有机物和养分的流失,生态退化与生物量的减少,最终会造成土壤荒漠化。我国风蚀主要发生在西北干旱与半干旱地区,这些地区气候干燥、年均降水量不足 400 mm,土质松散且土壤肥力低下,植被生长受限,生态环境极其脆弱,加之人类不合理的耕作和放牧,加速了土壤风蚀。目前,有关风蚀对土壤有机碳损失的研究较少,但土壤风蚀现状的严峻性不容忽视。风蚀对土壤有机碳损失的影响表现为:首先,由于土壤细颗粒具有较大的比表面积可以固定更多有机碳组分,风蚀会将地表大量细颗粒物吹出系统,直接造成了土壤有机碳的损失^[24];其次,风蚀会破坏当地植被,增强土壤反射率进而改变土壤水热状况,加速表土有机碳的矿化;

再次,风蚀破坏土壤物理结构,引起土壤氮流失,植被对水分、养分的吸收能力下降,植物生长受限,其反馈为土壤的有机物减少^[25];最后,风蚀会将含有碳酸钙的底层土壤暴露在外,土壤碳在酸性环境下更加容易氧化。

3 地表覆被的变化

土地利用方式的变化会引起地表植被类型的改变,包括森林的砍伐、城市的规划建设以及森林、草地、湿地与农用地间的相互转化等。土地利用方式的变化不仅可以直接对土壤碳库产生影响,还可以间接地作用于土壤有机碳形成过程中的相关因子从而影响着有机碳的空间分布。

3.1 森林利用方式的变化

人类活动引起土地利用方式的改变是全球碳储量变化的重要影响因素,其中最为典型的便是将森林开垦为农田。《中国森林资源报告(2014—2018)》数据显示,我国森林面积约 $2.2 \times 10^8 \text{ hm}^2$,森林覆盖率达到 22.96%,其在全球碳循环中的作用不可忽视。森林砍伐会增加土壤的光照率,改变林地土壤的水热条件,加之人类活动的扰动程度增强,造成当地土壤种子库功能丧失,生物多样性减少,地表有机质输入量显著下降^[26]。森林转变为农田后,由于表层土壤碳比深层更易被分解且植物类型发生转换造成深层土壤碳稳定性下降^[27],加快了有机碳的分解,但是受不同农业管理方式和作物类型的影响,土壤有机碳损失比例并不统一。据估算,全球森林土壤碳储量约占陆地碳库的 46.3%^[28]。当森林转变为耕地后,土壤有机碳含量下降 65%~70%^[29]。此外,森林转变为农田后农业生产需进行翻耕处理,大量有机质以 CO_2 形式从陆地生态系统中释放,这也是有机碳损失的主要途径^[30]。由此可见,森林转变为农田不仅会引起大量的有机碳损失,还会增加温室气体的排放,加剧全球变暖。

通常情况下,由于草地生物量远小于森林且草地生长排布紧密,地下根系复杂,土壤渗透性较差,地上部分凋落物无法下渗被微生物分解利用,降低了地表碳的输入量,且相比于森林,草地生物质更容易随径流流失^[31],因此,森林向草地转变的过程也是碳损失过程。Srivastava 等研究表明,自然林转变为草地后土壤有机碳含量每年降低 27%^[29]。与上述研究结论不同的是,Moraes 等研究认为,森林

转变为草地后有机碳储量并不会持续下降,在前 2 年表层有机碳储量下降 21.4%,但 8 年后储量会恢复到原先森林用地水平^[32]。而 Fearnside 等对巴西雨林向牧场转变后土壤碳的动态进行研究,发现表层 20 cm 有机碳含量有所增加,认为土壤碳含量增加或降低取决于牧场管理方式,只有长期受到良好管理的牧场,有机碳含量才会增加^[33]。综上所述,森林转变为草地一般情况下会造成有机碳储量的下降,优势的草种类型、适宜的气候条件、良好的管理方式是导致上述有机碳升高的主要原因。

3.2 草地利用方式的变化

全球草原面积占陆地面积的 16.4%,而我国草原面积约 4 亿 hm^2 ,占全球草原总面积的 8.7%。据估算,全球草原碳储量为 $3.08 \times 10^{11} \text{ t}$,其中高达 90% 存储在草地土壤中^[34]。当草地向耕地转化后,土壤有机碳含量下降约 65%^[35]。因此,草地利用方式的改变对全球碳循环的影响不可小觑。草地开垦为农田对土壤碳库的影响可以归纳为以下 3 点:(1)开垦后土壤呼吸以及土壤有机物的矿化分解速率都随之增强;(2)草地转变为耕地后,土壤微环境更有助于微生物的活动,同时团聚体结构的稳定性降低^[36];(3)物种变化和作物收割制度以及收割后的烧荒、秸秆不还田等措施会使植被中的碳素垂向分配比例下降。但曲福田等研究认为,草地向耕地转变后地表生物碳输入量差异不大,土壤有机碳的损失主要是由于耕层土壤受翻耕处理而结构遭受破坏,加速有机碳的矿化^[37]。总体而言,其损失机制与上述森林转变为农田大致相同。

在草地利用方式中,放牧被认为是对土壤有机碳影响最大的人类活动之一。已有不少学者针对不同放牧强度下土壤有机碳库变化情况开展了大量研究。众多研究表明,随着放牧强度的增强有机碳储量会随之降低且重度放牧对草地有机碳的影响最为强烈。丁妮等对天山北坡草原不同强度放牧下土壤有机碳的动态变化进行研究,发现放牧强度与有机碳含量呈显著负相关且差异主要集中在表层 0~30 cm^[38]。也有学者研究结论有所不同,杜宝红等发现,轻度、中度放牧均有利于土壤有机碳的积蓄,但重度放牧会导致草地有机碳储量急速下降^[39]。上述研究均指出,在草地利用方式下重度放牧是造成土壤碳库损失的重要因素。长期重度放牧会造成草场的退化,同时抑制植物的生产及根系分泌物的释放,从而引发系列的生态恶化连锁反

应,包括水分养分流失、土壤侵蚀加剧等^[40]。因此,在对草地的利用过程中,应坚持适度原则,研究发现,中期禁牧有助于土壤碳的积蓄,但从经济效益和环境角度进行综合考虑,采取轮牧措施才是最优选择,可使草地土壤肥力保持在较高水平,实现草地资源的可持续利用^[41]。

3.3 湿地利用方式的变化

湿地是陆地生态系统的重要碳库。虽然湿地面积只占全球陆地总面积的 6%,但其土壤中贮存的碳却占到全球土壤碳库的 20%~30%^[42]。据统计,我国湿地土壤碳储量约为 9.945 Pg^[43],在 1950—2000 年由于围垦和放牧造成土壤有机碳的损失约 1.5 Pg。湿地利用方式的变化不仅会改变其水文状况、影响湿地植被的生长与分布,还会对土壤理化性质、微生物群落组成以及有机碳组分产生影响。当湿地转变为农田后,地下水位显著降低,土壤由厌氧环境转变为有氧环境,有机质的氧化分解速率加快,同时加剧了表层土壤的侵蚀与水分、养分的流失,土地因此变得贫瘠^[44]。此外,人为扰动引起湿地生态出现不同程度的退化也是湿地土壤碳库损失的主要途径。由于植物残体与根系分泌物是土壤有机碳的重要来源,人类对湿地的干预导致植物生产力下降,先前存储的大量有机碳可能会以 CO₂、CH₄ 等形式排放到大气中,造成土壤有机碳的直接损失^[45]。可见湿地生态系统极易受到环境变化的影响,人类活动是造成湿地土壤有机碳损失的重要影响因子。因此,我国应当出台相关政策对湿地资源加以保护,鼓励退耕还湿,从而提高湿地生态系统的固碳能力及其稳定性。

4 农田管理措施

人类对农用地的管理一般包含传统耕作、保护性耕作、灌溉、施肥等措施,上述管理方式均会对土壤有机碳库产生影响。

4.1 耕作

一般情况下,耕作会改变土壤物理性质,降低土壤有机质和养分含量,但其变化趋势会随耕作模式的不同而变化。传统耕作方式对土壤有机碳损失的作用机制可以概括为以下 4 个方面:(1)耕作破坏土壤团聚体结构,团聚体中的有机碳不受保护,更易被分解;(2)翻耕处理使土层倒转,从而改善了土壤孔隙度和水热条件,提高了土壤微生物活性,土壤通风性增强加速了土壤有机物质的分

解^[46];(3)与森林和草地相比,作物光合作用固定的碳含量大幅降低,收割后秸秆不还田又使凋落物中的碳向土壤的输入量减少;(4)长期耕作后土壤更易遭受风蚀、水蚀的干扰。叶莹莹等对不同翻耕次数下有机碳含量变化情况进行研究,发现与对照组相比,表层 10 cm 有机碳含量显著下降,各翻耕处理下有机碳的平均损失达 15.4%~27.6%^[30]。此外,传统耕作造成的土壤有机碳损失还包括富碳表土受到侵蚀,贫碳亚表土进入耕层。与之相反,保护性耕作通常可以改善土壤结构,提高农地表土的稳定性,从而促进地表生物量的积累,减缓土壤有机物的分解与矿化。其核心主要包括免耕和秸秆还田等措施,已有不少学者证实免耕^[47-48]和秸秆还田^[49-50]有利于土壤有机碳的积累。综上所述,在进行农业生产活动时,应坚持合理耕作原则,采取少耕、免耕、秸秆还田等保护性耕作措施,使得农用地保持较高的土壤质量和稳定性,从而实现农业资源的持续利用。

4.2 施肥

施肥是农业活动中的基本措施,不仅可以促进作物的生长,还影响土壤有机碳的输入、输出。此外施肥能够改变土壤性质和微生物活性,肥料类型的差异对土壤有机碳库的影响也不同。研究表明,化肥有机肥配施或单施有机肥均更有利于土壤有机碳的积蓄^[51-53],但有关单施化肥对土壤有机碳库的影响,很多人持有不同观点。李廷亮等研究发现,长期单施化肥会使有机碳含量降低 2.4%~8.2%^[54]。罗原骏等研究表明,单施化肥后土壤有机碳含量增加 27.6%^[55]。谢钧宇等研究发现,与不施肥相比,单施化肥对各组分有机碳含量均无显著影响^[56]。单施化肥主要从以下 2 个途径对土壤碳库产生影响:(1)施用化肥可提高作物的产量,增加地表凋落物生物量的碳输入,从而提高土壤有机碳储量;(2)长期施用化肥会形成较低 C/N 环境,且可促进土壤微生物数量的增加和活性的提高,加快地上、地下有机物的分解,从而降低土壤有机碳储量。可见,单施化肥是否会引起土壤有机碳的损失目前尚无明确的定论,但在农田管理方式中,过分依赖化肥而忽视有机肥的作用必然会造成土壤质量的下降。因此,为减少人为因素造成的土壤有机碳损失应尽量采取施有机肥和秸秆还田等保护性耕作措施。

5 结语与展望

综上所述,自然因素和人类活动对土壤有机碳库的影响复杂多样,其对土壤有机碳损失的作用机制各不相同,可以概括为 3 种方式:(1)部分土壤被移出系统,造成直接损失;(2)通过破坏植被、改变植被类型或降低土壤肥力等方式减少地上碳输入量;(3)通过改变土壤理化性质、水热条件或提高微生物数量和活性等方式加速有机碳的矿化分解。根据国内外众多学者的研究结论和思路,今后对有机碳损失途径的探索应主要从以下几个方面进行:(1)由于人类社会与生态环境密不可分,有关自然与人为两大因素对土壤有机碳损失的影响的研究不能独立进行,需综合考虑各因素间的作用关系。此外,各地区气候、地形、水文等差异很大,探究有机碳损失机制时还需考虑区域自身的独特性。(2)近年来,人类活动导致的极端天气频发,如强降水、干旱、冰灾、森林火灾以及强风暴等,极端天气造成的土壤有机碳损失也将是日后研究的重点。(3)目前,有关土壤有机碳损失的研究多基于第 2 次土壤普查数据,但并没有对无机碳进行分析,有机碳老化转变为无机碳也是一个研究思路。

参考文献:

- [1] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版),2021,21(3):1-15.
- [2] 王兴富,黄先飞,胡继伟,等. 喀斯特石漠化过程中小生境及岩性的演替对土壤有机碳的影响[J]. 水土保持学报,2020,34(4):295-303.
- [3] 张珍明,周运超,李 会,等. 喀斯特小流域土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 地球与环境,2017,45(1):38-45.
- [4] Weissert L F, Salmond J A, Schwendenmann L. Variability of soil organic carbon stocks and soil CO₂ efflux across urban land use and soil cover types[J]. Geoderma,2016,271:80-90.
- [5] Zhou G Y, Xu S, Ciais P, et al. Climate and litter C/N ratio constrain soil organic carbon accumulation[J]. National Science Review, 2019,6(4):746-757.
- [6] Gao X S, Huang R, Li J, et al. Temperature induces soil organic carbon mineralization in urban park green spaces, Chengdu, southwestern China: effects of planting years and vegetation types[J]. Urban Forestry & Urban Greening,2020,54:126761.
- [7] Wang Y, Gao S Q, Li C L, et al. Effects of temperature on soil organic carbon fractions contents, aggregate stability and structural characteristics of humic substances in a Mollisol[J]. Journal of Soils and Sediments,2016,16(7):1849-1857.
- [8] Sun X L, Tang Z X, Ryan M G, et al. Changes in soil organic carbon contents and fractionations of forests along a climatic gradient in

China[J]. Forest Ecosystems,2019,6(1):1.

- [9] 朱 猛,冯 起,张梦旭,等. 祁连山中段草地土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 草地学报,2018,26(6):1322-1329.
- [10] Kerr D D, Ochsner T E. Soil organic carbon more strongly related to soil moisture than soil temperature in temperate grasslands[J]. Soil Science Society of America Journal,2020,84(2):587-596.
- [11] Zheng P F, Wang D D, Yu X X, et al. Effects of drought and rainfall events on soil autotrophic respiration and heterotrophic respiration[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2021,308:107267.
- [12] Maillard É, McConkey B G, St Luce M, et al. Crop rotation, tillage system, and precipitation regime effects on soil carbon stocks over 1 to 30 years in Saskatchewan, Canada[J]. Soil and Tillage Research,2018,177:97-104.
- [13] Zhao Z Z, Zhao Z Y, Fu B, et al. Characteristics of soil organic carbon fractions under different land use patterns in a tropical area[J]. Journal of Soils and Sediments,2021,21(2):689-697.
- [14] Qu W D, Han G X, Wang J, et al. Short-term effects of soil moisture on soil organic carbon decomposition in a coastal wetland of the Yellow River Delta[J]. Hydrobiologia,2021,848(14):3259-3271.
- [15] 郑小俊,陈 明,刘友存,等. 土壤有机碳流失现状分析[J]. 现代化工,2020,40(2):7-11.
- [16] 郭英楠. 大气二氧化碳浓度达历史顶点[J]. 生态经济,2019,35(7):5-8.
- [17] 周晓宇,张称意,郭广芬. 气候变化对森林土壤有机碳贮藏影响的研究进展[J]. 应用生态学报,2010,21(7):1867-1874.
- [18] Fontaine S, Bardoux G, Abbadié L, et al. Carbon input to soil may decrease soil carbon content[J]. Ecology Letters,2004,7(4):314-320.
- [19] Berhe A A, Harte J, Harden J W, et al. The significance of the erosion-induced terrestrial carbon sink[J]. BioScience,2007,57(4):337-346.
- [20] Yue Y, Ni J R, Ciais P, et al. Lateral transport of soil carbon and land-atmosphere CO₂ flux induced by water erosion in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2016,113(24):6617-6622.
- [21] 黄金权,程冬兵,王志刚,等. 水力侵蚀作用下土壤有机碳动态研究进展[J]. 长江科学院院报,2016,33(12):27-32.
- [22] 刘鹤龄,饶良懿,图尔荪,等. 北方土石山区水蚀及水土保持对土壤有机碳的影响[J]. 浙江农林大学学报,2019,36(4):646-655.
- [23] Huang J Q, Li Z W, Nie X D, et al. Microbial responses to soil rewetting in erosional and depositional environments in relation to the organic carbon dynamics[J]. Geomorphology,2014,204:256-264.
- [24] Borrelli P, Lugato E, Montanarella L, et al. A new assessment of soil loss due to wind erosion in European agricultural soils using a quantitative spatially distributed modelling approach[J]. Land Degradation & Development,2017,28(1):335-344.
- [25] Lei L J, Zhang K S, Zhang X Z, et al. Plant feedback aggravates soil organic carbon loss associated with wind erosion in Northwest China

- [J]. Journal of Geophysical Research (Biogeosciences), 2019, 124 (6): 825–839.
- [26] 马利芳, 熊黑钢, 王 宁, 等. 不同干扰程度下土壤盐分和有机质空间变异特征[J]. 环境工程, 2019, 37(2): 179–183.
- [27] Lyu M K, Noormets A, Ukonmaanaho L, et al. Stability of soil organic carbon during forest conversion is more sensitive in deep soil than in topsoil in subtropical forests [J]. Pedobiologia, 2021, 84: 150706.
- [28] 邹佳勇. 森林生态系统碳储量和固碳能力研究进展[J]. 中国林业经济, 2017(4): 74–75.
- [29] Srivastava R, Mohapatra M, Latore A. Impact of land use changes on soil quality and species diversity in the Vindhyan dry tropical region of India [J]. Journal of Tropical Ecology, 2020, 36(2): 72–79.
- [30] 叶莹莹, 肖霜霜, 王克林, 等. 耕作干扰下喀斯特土壤有机碳损失主要途径及其影响因素[J]. 农业现代化研究, 2019, 40(2): 325–332.
- [31] 黄先飞, 周运超, 张珍明. 喀斯特石漠化区不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 215–221.
- [32] Moraes J L, Cerri C C, Melillo J M, et al. Soil carbon stocks of the Brazilian Amazon Basin [J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59(1): 244–247.
- [33] Fearnside P M, Imbrozio B R. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia [J]. Forest Ecology and Management, 1998, 108(1/2): 147–166.
- [34] 周 莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99–105.
- [35] Gebresamuel G, Molla B, Teka K, et al. Changes in soil organic carbon stock and nutrient status after conversion of pasture land to cultivated land in semi-arid areas of northern Ethiopia [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2022, 68(1): 44–60.
- [36] 吴晓阳, 李 林, 史喜林, 等. 土壤有机碳稳定机制及影响因素研究进展[J]. 吉林农业科学, 2014, 39(3): 42–45, 78.
- [37] 曲福田, 卢 娜, 冯淑怡. 土地利用变化对碳排放的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(10): 76–83.
- [38] 丁 妮, 孙 霞, 贾宏涛, 等. 放牧强度对天山北坡草甸草原土壤有机碳的影响[J]. 西南农业学报, 2014, 27(4): 1596–1600.
- [39] 杜宝红, 高翠萍, 哈达朝鲁. 不同放牧强度对锡林郭勒典型草原生产力及碳储量的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 139–146, 152.
- [40] Li G, Zhang Z, Shi L L, et al. Effects of different grazing intensities on soil C, N, and P in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(11): 2584.
- [41] Dong L, Martinsen V, Wu Y T, et al. Effect of grazing exclusion and rotational grazing on labile soil organic carbon in North China [J]. European Journal of Soil Science, 2021, 72(1): 372–384.
- [42] Lal R. Carbon sequestration [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society (B: Biological Sciences), 2008, 363 (1492): 815–830.
- [43] 韩 露. 中国沼泽湿地土壤有机碳储量估算研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 30–31.
- [44] Zhang H H, Zhang S Y, Meng X, et al. Conversion from natural wetlands to forestland and farmland alters the composition of soil fungal communities in Sanjiang Plain, Northeast China [J]. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 2018, 32(4): 951–960.
- [45] Wu J Q, Ma W W, Li G, et al. Vegetation degradation along water gradient leads to soil active organic carbon loss in Gahai wetland [J]. Ecological Engineering, 2020, 145: 105666.
- [46] Mohamed A A, Younis S M, Ibrahim M M. Effects of different tillage methods and fertilizer on soil carbon, emission of CO₂, and maize yield [J]. Plant Archives, 2020, 20(1): 9265–9276.
- [47] 杨思存, 王成宝, 霍 琳, 等. 不同耕作措施对甘肃引黄灌区耕地土壤有机碳的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 114–121.
- [48] 黄雅楠, 黄 丽, 薛 斌, 等. 保护性耕作对水-旱轮作土壤有机碳组分的影响: 基于密度分组法[J]. 土壤通报, 2019, 50(1): 109–114.
- [49] 石含之, 赵沛华, 黄永东, 等. 秸秆还田对土壤有机碳结构的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(3): 536–542.
- [50] 王旭东, 庄俊杰, 刘冰洋, 等. 秸秆还田条件下中国农田土壤有机碳含量变化及其影响因素的 Meta 分析[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(8): 12–24.
- [51] Das S, Kumar N, Das R, et al. Long term impact of nutrient management options on yield, and nutrient uptake by soybean and soil properties under soybean (*Glycine max*) – wheat (*Triticum aestivum*) cropping system in the Indian Himalayas [J]. Indian Journal of Agricultural Sciences, 2019, 89(3): 406–414.
- [52] 闫 雷, 周丽婷, 孟庆峰, 等. 有机物料还田对黑土有机碳及其组分的影响[J]. 东北农业大学学报, 2020, 51(5): 40–46.
- [53] 邓家欣, 韦继光, 於 虹, 等. 不同施肥处理对高丛越橘幼苗生长和生理指标及土壤理化性质的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(2): 28–34.
- [54] 李廷亮, 李 顺, 谢英荷, 等. 不同施肥措施对晋南旱塬麦田土壤碳氮变化的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(11): 43–49.
- [55] 罗原骏, 蒲玉琳, 龙高飞, 等. 施肥方式对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(8): 1389–1397.
- [56] 谢钧宇, 彭 博, 王仁杰, 等. 长期不同施肥对壤土大团聚体中有机碳组分特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(7): 1073–1083.