

侯赛赛,白懿杭,王 灿,祖 超,等. 土壤有机碳及其活性组分研究进展[J]. 江苏农业科学,2023,51(13):24-33.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.13.004

# 土壤有机碳及其活性组分研究进展

侯赛赛<sup>1</sup>,白懿杭<sup>2</sup>,王 灿<sup>3</sup>,祖 超<sup>3</sup>,张瑞芳<sup>2,4,5</sup>,王鑫鑫<sup>2,4,5</sup>

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院,河北保定 071001; 2. 国家北方山区农业工程技术研究中心,河北保定 071001;  
3. 中国热带农业科学院香料饮料研究所,海南万宁 571533; 4. 河北省山区农业技术创新中心,河北保定 071001;  
5. 河北农业大学河北省山区研究所,河北保定 071001)

**摘要:**土壤有机碳是反映土壤质量的关键性指标,对提高作物产量、调节土壤养分循环、改善土壤质量和全球碳循环具有重要意义。其中,土壤有机碳中的活性组分(颗粒有机碳、可溶性有机碳、微生物生物量碳和易氧化有机碳)较土壤总有机碳响应土壤理化性质、环境条件和管理方式改变更为敏感,因而是研究中的重点。土壤有机碳主要来源于地上凋落物、根系生物量、根系分泌物和微生物量。环境条件(温度和降水量变化)和管理方式(施肥措施、灌溉制度和土地利用方式等)变化影响了凋落物的输入类型和数量,同时也间接改变了土壤物理性质(包括土壤 pH 值、含水量、容重和团聚体数量等),影响了土壤微生物的丰度和活性,改变了土壤有机碳的固存和分解速率。

**关键词:**土壤质量;土壤有机碳;活性有机碳;土壤团聚体

**中图分类号:**S153.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)13-0024-10

当前对生态农业和农业可持续发展的研究离不开对土壤质量的关注。我们通常将一系列土壤的物理、化学和生物指标综合以评估土壤的质量程度,例如有机碳含量、容重和团聚体稳定性等<sup>[1]</sup>。土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)作为陆地生态系统中最大的碳库,已经成为大气中二氧化碳(CO<sub>2</sub>)的主要来源<sup>[2]</sup>。SOC 库的微小波动直接影响土壤质量和气候变化<sup>[3-4]</sup>,其动态平衡直接影响土壤肥力和植物生产力<sup>[5]</sup>,是评价土壤质量状况的重要指标<sup>[6]</sup>。因此了解 SOC 库的动态变化及影响因素具有重要意义。

SOC 是动植物和微生物残体在各个阶段降解物质的混合物,对气候和管理方式变化的响应相对缓慢,短期的土壤碳库变化难以通过土壤总 SOC 含量被捕捉<sup>[7]</sup>。根据其特性和周转率的不同, SOC 可分为稳定性有机碳和活性有机碳<sup>[8]</sup>。稳定性有机碳通常包括矿物结合态有机碳、重组有机碳和腐殖质等<sup>[9]</sup>,主要受化学和生物稳定机制的影响,不易

被微生物分解利用,对外界干扰的响应并不明显。而活性有机碳通常对气候环境和管理实践方式的变化较总有机碳更加敏感,易捕捉到外界环境对其的微小影响,可及时反映土壤碳库变化<sup>[10-11]</sup>。活性有机碳通常包括颗粒有机碳(particle organic carbon, POC)、可溶性有机碳(soluble organic carbon, DOC)、微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)和易氧化有机碳 EOC(easily oxidated carbon, EOC)<sup>[12-13]</sup>。与土壤总有机碳相比,这些活性组分对农业管理实践的变化有更加强烈的响应<sup>[14]</sup>。当前对 SOC 活性组分的研究得到了更多关注,但多注重环境和管理方式变化对 SOC 各组分含量的影响,缺乏对 SOC 组分的系统性描述。因此,本文总结了 SOC 各组分的特性、测定方法和影响因素等,并结合相关研究,揭示其变化原因,以期对 SOC 的研究提供理论依据与参考。

## 1 土壤有机碳(SOC)

SOC 含量主要由动植物残体等 SOC 输入量与微生物分解作用释放量决定<sup>[15]</sup>,主要受制于有机质的输入与土壤有机质分解-迁移速率的动态变化<sup>[16-17]</sup>,并且影响土壤碳循环过程(图 1)。大气中的 CO<sub>2</sub> 被光合作用固定并合成植物中的有机物,其凋落物、根生物量、根系分泌物和动物残体等有机质进入土壤被土壤微生物分解利用<sup>[18-19]</sup>。在土壤

收稿日期:2023-02-22

基金项目:国家重点研发计划(编号:2021YFD1901001、2022YFD1901303);

海南省院士创新平台科研专项(编号:YSTPZX202115)资助。

作者简介:侯赛赛(1998—),女,河北邢台人,硕士研究生,主要从事资源利用与植物保护研究。E-mail:hss11022021@163.com。

通信作者:王鑫鑫,博士,副教授,硕士生导师,主要从事资源利用与植物保护研究。E-mail:sywx@hebau.edu.cn。

微生物作用下,大部分的有机质被分解为  $\text{CO}_2$  并重新释放到大气中。而少数有机质难以被分解,最终

以稳定性有机质(以腐殖质为主)的形式存在于土壤中。

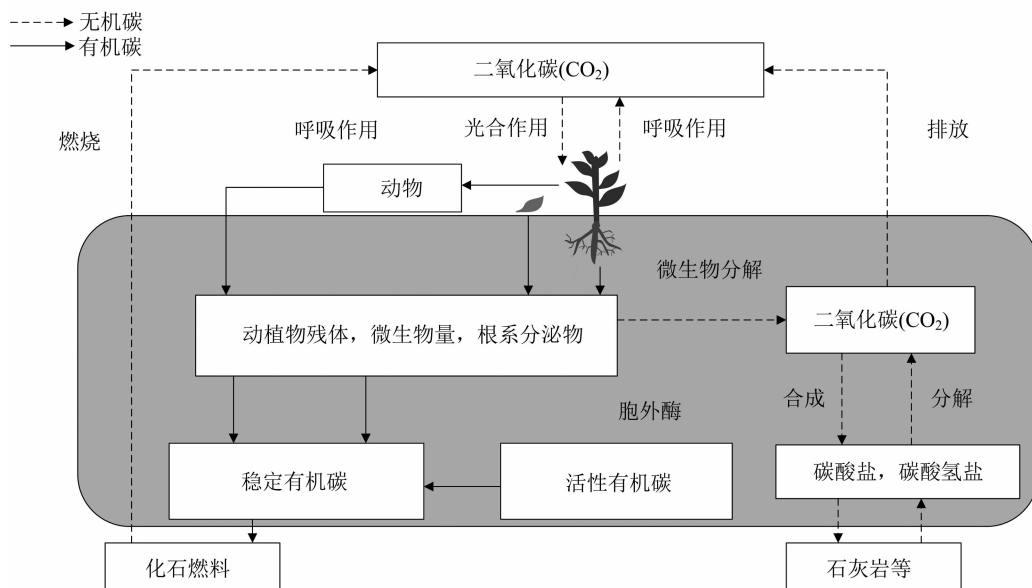


图1 土壤碳循环

SOC 被土壤物理、化学和生物等多方面因素共同影响。但大多数因素都与土壤孔隙度和透气性相关。较高孔隙度的土壤通常伴随着强透气性的特点,有利于好气性微生物的生长<sup>[20-21]</sup>。这导致了表层土壤中 SOC 活跃度要高于底土<sup>[22-23]</sup>。高容重的土壤由于其孔隙度差,限制了土壤水分和氧气的流通,从而抑制了土壤微生物的活性<sup>[24-25]</sup>。黏土中的 SOC 含量要高于沙土<sup>[26-27]</sup>,这不仅与黏土透气性相对较差有关,还与黏土含有更多的大团聚体有关,大团聚体对 SOC 的保护作用更强<sup>[28-29]</sup>。但黏土中也贮存着大量矿物氮,这有利于提高微生物丰度和活性,促进有机碳的分解<sup>[30]</sup>。气候变化影响土壤微生物和酶活性,引起 SOC 固存速率变化<sup>[31-32]</sup>。低温抑制微生物活性。而气候变暖 and 降水增加可能有利于植被生长,增加植物凋落物输入<sup>[33-35]</sup>;但凋落物增加也刺激碳分解微生物的活性,提高了土壤碳矿化速率<sup>[36-37]</sup>,促进 SOC 分解。

碳、氮循环的耦合性决定了它们之间存在联系<sup>[38]</sup>。一方面,氮添加改变土壤氮素水平,促进了植物生长,从而增加凋落物和根系分泌物向土壤的输入<sup>[39]</sup>。另一方面,氮添加通过调节土壤 pH 值,引起土壤酸化,促进土壤中水解酶分解,降低易氧化有机碳含量<sup>[40-41]</sup>;同时也抑制了土壤微生物生长,减少了土壤中的微生物生物量碳含量<sup>[42-44]</sup>。但高氮输入也会刺激土壤微生物对碳的需要,这可能

会增加 SOC 的损失<sup>[39]</sup>。土壤碳库对氮添加的响应取决于碳输入和输出之间的平衡,高碳氮比(C/N)可能更有利于 SOC 的固存<sup>[45]</sup>,但凋落物输入通常有利于土壤对氮的保留,降低土壤 C/N,并增加微生物活性<sup>[46]</sup>,这是导致氮增加导致 SOC 多种变化的主要因素。

人类活动通过改变凋落物输入类型和数量,引起 SOC 变化<sup>[47-49]</sup>。施肥有利于根际土壤对 SOC 的积累,并通过增加烷氧基碳比例和降低芳香碳比例改变 SOC 结构,提高 SOC 稳定性<sup>[50-51]</sup>。灌溉通过改变植物水分吸收和蒸腾效果,影响植物生物量和有机碳输入<sup>[52]</sup>。土壤水分变化影响土壤中养分、酶和微生物的活性<sup>[53]</sup>。适当灌溉还有利于根系分解、活根输入以及 SOC 的向下迁移<sup>[54-55]</sup>。Nielsen 等研究表明土壤细菌和真菌的丰富度也随灌溉量的增加而增加<sup>[56]</sup>。植被恢复通过生态位分化和互补的原理,引起更多样化的植物群落结构,从而增加凋落物数量<sup>[57-58]</sup>和输入类型<sup>[59-60]</sup>,影响土壤碳库的承载能力<sup>[61-63]</sup>。植被恢复后根系分泌物的输入增加,如根系分泌物中的主要成分有机酸,不仅可以诱导激励效应来刺激微生物活性,从而促进 SOC 的周转<sup>[64-65]</sup>,还可以通过影响有机碳的络合和溶解作用改变 SOC 的结构<sup>[66]</sup>。同时,有机酸还可以间接调节土壤 pH 值改变土壤中细菌和真菌的群落结构组成<sup>[67-68]</sup>,从而影响 SOC 矿化。

秸秆还田是最常见的农业生产措施,影响 SOC (表 1)<sup>[69-70]</sup>。一方面,秸秆还田增加土壤有机碳的积累:(1)秸秆还田直接增加了土壤外源有机碳的输入<sup>[71]</sup>。(2)长期秸秆还田还促进了团聚体的富集和团聚体的稳定性,增强土壤对有机碳的固存能力<sup>[71-72]</sup>。例如,秸秆还田后团聚体中 SOC 含量提高了 27.0% ~86.6%<sup>[73]</sup>。另一方面,秸秆还田也促进了 SOC 的分解:(1)秸秆还田为土壤微生物提供

了充足的碳源,促进了土壤微生物生长,增加了土壤微生物对 SOC 的分解<sup>[74]</sup>。(2)秸秆还田能够触发土壤呼吸的激发效应,有助于高肥力土壤中 SOC 的代谢更新<sup>[75-76]</sup>。因此,秸秆还田对 SOC 的影响取决于外源有机碳输入和外源有机碳输入促进 SOC 分解速率之间的平衡。此外,秸秆分解速率还受到土壤质地、pH 值、含水量和温度等多方面的影响<sup>[77]</sup>,这增加了秸秆还田后对 SOC 影响存在多种效应的可能。

表 1 秸秆还田对土壤有机碳的影响

秸秆还田	影响	结论	参考文献
生物炭和秸秆还田	生物炭和秸秆还田均提高了土壤有机碳含量和微生物生物量碳含量	生物炭和秸秆还田显著增加土壤呼吸速率和 CO <sub>2</sub> 总排放量,均提高了土壤微生物量和有机碳的积累	[75]
玉米根、茎、叶还田	与不添加秸秆土壤相比,低肥土壤添加根、茎、叶处理的土壤 CO <sub>2</sub> - C 排放累积量增加了 95% ~134%,高肥土壤增加了 96% ~189%	秸秆不同部位还田引起高低肥土壤的激发效应,不同部位秸秆还田对不同肥力土壤的激发效应存在差异	[76]
不同秸秆还田量和氮肥配施	秸秆还田 30%、50% 和 90% 下福建省水田土壤年均固碳速率分别是我国当前秸秆还田率下固碳量的 1.31%、2.28%、3.61% 和 6.33%	秸秆还田比例的提升有助于提高土壤的固碳速率,但由于受到土壤属性、气候和施肥等因素的限制,固碳能力存在差异	[78]
秸秆还田方式	秸秆直接还田和秸秆碳化还田处理下,土壤有机碳含量较 CK 处理分别提高了 33.28% ~36.4% 和 58.56% ~63.25%	秸秆直接还田和炭化还田均能逐年提高土壤有机碳含量,且秸秆炭化还田显著高于直接还田	[79]
小麦 ( <i>Triticum aestivum</i> L.) / 玉米秸秆还田量	不同土层的玉米高量还田的土壤有机碳含量提高了 31.37% ~36.31%	整体上,与小麦相比,玉米秸秆还田更有利于提高土壤有机碳含量。在玉米秸秆还田量 7 000 kg/hm <sup>2</sup> 时最适宜改良土壤团聚体结构和提升土壤固碳潜力	[80]
秸秆还田深度	玉米秸秆还田至 0 ~10、10 ~20、20 ~30、30 ~40 cm 土层 2 年后,与对照处理相比,前 3 个土层土壤有机碳含量分别减少了 1.16、0.52、0.84 g/kg,30 ~40 cm 土层增加了 17%	粉碎状秸秆一次性还田至不同深度 2 年后,还田至 30 ~40 cm 深度对土壤改良效果最好,团聚体稳定性增强,土壤中有机碳含量显著增加	[81]
秸秆还田深度	深秸秆掺入显著提高玉米百粒质量 7.8%、来年产量提高 10.5%、有机碳提高 13.4%。在生长季中,深植秸秆使幼苗光合 <sup>13</sup> C 同化增加 17.4%,拔节早期光合 <sup>13</sup> C 分配到土壤的比例增加 7.9%,成熟时增加 11.5%。光合 C 对微生物生物量 C(MBC)和溶解有机 C(DOC)的贡献在拔节期最高,收获期分别为 MBC 的 39.1% 和 DOC 的 28.8%	深秸秆还田对调控土壤碳动态具有重要意义,深秸秆还田显著提高了玉米的光合效率,促进了光合 C 向根系和土壤的分配,从而促进了玉米的生长和产量	[82]
香根草 ( <i>Chrysopogon zizanioides</i> ) 秸秆覆盖和化肥减施	与 CK 处理相比,香根草秸秆覆盖还田和化肥减施处理下土壤有机碳含量增加了 4.27% ~12.84%。通过线性方程表明,当土壤有机碳含量增加 1 g/kg,花生产量增加 903.31 ~934.62 kg/hm <sup>2</sup>	香根草秸秆覆盖还田可以显著提升花生产量和土壤有机碳含量。与投入碳氮比显著相关,应一起进行研究	[83]

2 活性有机碳

活性有机碳主要由处于新鲜有机质和腐殖质之间的过渡材料组成,周转速率快,直接参与土壤的生物、化学转化过程,可快速表征环境变化引起的土壤碳库变化<sup>[84-86]</sup>。POC、DOC、MBC、EOC 和潜在可矿化碳是土壤活性有机碳的重要组分<sup>[12-13]</sup>,但不同组分的概念、组成、测定方法(表 2)和影响因素<sup>[87]</sup>存在差异。

2.1 颗粒有机碳(POC)

POC 即土壤粒径大于 53 μm、介于新鲜动植物残体和腐殖化有机物之间的暂时性有机碳<sup>[93]</sup>,通常包括未分解或未分解完全的动植物残体,是动物、植物和微生物残体向腐殖质转化过程中的过渡产物<sup>[94]</sup>。POC 通常采用 5 g/L 六偏磷酸钠溶液分散法提取,并用总有机碳分析仪测定其含量<sup>[88]</sup>。根据分离方法不同,POC 通常分为砂粒级有机碳(SSFC)和轻组分有机碳(LFC)。基于粒径分组法,粒径大

表 2 活性有机碳组分定义、组成和测定方法

活性有机碳组分	定义	组成成分	测定方法
颗粒有机碳 (POC)	土壤粒径大于 53 $\mu\text{m}$ 介于新鲜动植物残体和腐殖化有机物之间的暂时性有机碳	未分解或未分解完全的动植物残体	5 g/L 六偏磷酸钠分散 <sup>[88]</sup>
可溶性有机碳 (DOC)	从土壤水溶液中分离出来并能通过 0.45 $\mu\text{m}$ 微孔滤膜的不同大小和结构的有机分子混合物	碳水化合物、蛋白质、长链脂肪族化合物和大分子的腐殖质	0.5 mol/L $\text{K}_2\text{SO}_4$ 浸提法 <sup>[89]</sup>
微生物生物量碳 (MBC)	土壤活的细菌、真菌、藻类和土壤微动物体内所含的碳	土壤微生物(细菌和真菌等)	0.5 mol/L $\text{K}_2\text{SO}_4$ - 氯仿熏蒸法 <sup>[90-91]</sup>
易氧化有机碳 (EOC)	土壤中容易被氧化、活性较高的物质	凋落物、根际生物量和根系分泌物	330 mmol/L $\text{KMnO}_4$ 溶液氧化法 <sup>[92]</sup>

于 53  $\mu\text{m}$ 、处于新鲜的动植物残体和腐殖化有机物之间暂时性或过渡性有机碳<sup>[95]</sup>,就是砂粒级有机碳 (SSFC),其含量占总有机碳的 10% 左右。SSFC 分解速率快,C/N 值小,易转化。基于密度分离法,用 1.5 ~ 2.0 g/cm<sup>3</sup> 密度的溶液将土壤中相对密度较低的游离态有机物质和相对密度较高的有机无机复合体进行分离,其中分离获得的悬浮液为 LFC。LFC 含量通常是 SOC 总量的 15% ~ 32%,分解速度快,C/N 值高,是介于动植物残体和腐殖质之间的中间碳库<sup>[88]</sup>,包括微生物遗留残骸、动植物残体、菌丝体及孢子等。一般条件下土壤中的 SSFC 含量要高于 LFC,且 SSF 比 LF 更容易被分解<sup>[96]</sup>。尽管 SSFC 和 LFC 都以动植物残体为主要来源,但由于提取方式不同,导致两者间存在差异。

POC 形成过程是凋落物中有机物和营养物质进入土壤的最初始途径,其数量与种类受到凋落物或外源输入物料等因素影响较大<sup>[97]</sup>。例如,与不施肥和单施化肥相比,单施有机肥和化肥有机肥配施的土壤 POC 占比分别增加了 27.72%、25.23% 和 10.61%、7.54%<sup>[98]</sup>。有机物料还田处理增加了土壤 POC 中亚甲基脂肪碳和芳香碳的相对含量,减少了土壤 POC 中羧基碳的含量,土壤 POC 官能团脂族性减弱,芳香性增强<sup>[99]</sup>。秸秆和根茬还田增加了土壤水耕表层、犁底层和氧化还原层游离态 POC 和闭蓄态 POC 含量<sup>[100]</sup>。POC 分解也是生成 DOC 和 MBC 等有机碳组分的前期过程和必要环节,POC 被分解涉及多种土壤过程和功能。首先,POC 作为土壤动物(包括蚯蚓和白蚁等)的主要食物和能源,在被食用过程中被物理分解成更小的颗粒,而 POC 的分解程度和周转速率均会随着粒径减小而增大<sup>[101]</sup>。其次,POC 是微生物活动的中心,它向土壤微生物提供碳源和养分<sup>[102]</sup>,被分解过程中自身化学性质也发生变化。

## 2.2 可溶性有机碳 (DOC)

DOC 是指可以从土壤水溶液中分离出来并能通过 0.45  $\mu\text{m}$  微孔滤膜的不同大小和结构的有机分子混合物,主要由碳水化合物、蛋白质、长链脂肪族化合物和大分子的腐殖质组成<sup>[103-104]</sup>。通常采用 0.5 mol/L  $\text{K}_2\text{SO}_4$  浸提法测定其含量<sup>[89]</sup>。土壤 DOC 主要来源于植物凋落物、根系生物量和分泌物等有机物质的分解<sup>[105]</sup>,是土壤中最活跃的组分,也是土壤微生物生长的主要营养来源<sup>[106]</sup>。DOC 含量在 SOC 总量中占比较低,全球 DOC 平均浓度为 77.39 (73.84 ~ 81.11) mg/kg<sup>[107]</sup>。但由于 DOC 溶于水,它在陆地、水体、大气和岩石圈等生态系统可以相互循环转化<sup>[108-110]</sup>。在陆地生态系统中,随土壤 DOC 含量增加,温室气体释放量也协同增长<sup>[111-112]</sup>。土壤 DOC 溶解后进入地表及地下水,直接或间接影响水中生物的生存<sup>[109,113]</sup>。在大陆向海洋输送的 SOC 中,DOC 占比 22% 左右<sup>[114]</sup>。在岩石圈,DOC 含量越多,溶蚀能力越强,从而改变岩溶动力系统,影响矿物风化等<sup>[115-118]</sup>。此外,土壤 DOC 能通过调节土壤 pH 值来解吸或吸附土壤金属元素<sup>[119-121]</sup>,影响重金属元素的迁移以及金属复合物的形成过程。

有机肥使用和秸秆还田是影响农田土壤 DOC 的重要因子<sup>[122-123]</sup>,这不仅与二者提高了土壤有机碳的输入有关,还与其对土壤透气性、含水量与 pH 值等性质产生较大影响从而间接影响 DOC 形成与周转有关。研究表明,有机肥施用与土壤 DOC 含量呈明显正相关<sup>[124-125]</sup>,一方面,长期施用有机肥能提高土壤对 DOC 中芳香性大分子物质的吸附能力<sup>[126]</sup>。另一方面有机肥料和秸秆还田会提高土壤含水量和孔隙度,改善土壤微生物生长环境<sup>[127]</sup>。但土壤含水量增加也会导致 DOC 向下渗透<sup>[128]</sup>。此外,肥料和秸秆还田一定程度上都增加了土壤外源

氮的输入,能够促进植物生长并增强土壤微生物活性,提高 DOC 含量<sup>[129-130]</sup>。研究表明,低、中量的氮添加通常有利于 DOC 积累<sup>[129,131]</sup>,而过量的氮会抑制微生物的生长,影响 DOC 的形成和矿化<sup>[132]</sup>。施用有机肥还会改变土壤 pH 值,在一定土壤 pH 值范围内,土壤中 DOC 的含量与土壤 pH 值之间呈线性负相关<sup>[133]</sup>。酸性肥料通常会降低土壤微生物活性,影响碳固存,从而降低土壤 DOC 含量。施肥对 DOC 的影响也与耕作方式相关。例如,旋耕和深耕等轮耕措施显著提高了 0~40 cm 土层的土壤 DOC 含量<sup>[134]</sup>;横坡耕作和化肥与有机肥配施能有效抑制土壤中 DOC、氮和磷的流失<sup>[135]</sup>;在 0.8、1.2 g/kg 的施氮条件下,干湿交替灌溉较常规灌溉显著增加了水稻根际 DOC 和 MBC 含量<sup>[136]</sup>。另外,植被恢复通常会增加 SOC 各组分储量。凋落物更加丰富的林地和草地其土壤 DOC 要显著高于农田<sup>[129]</sup>。原因可能是林地植物发达的根系和丰富的凋落物增加了土壤微生物的丰度和活性<sup>[130]</sup>,因此其 DOC 含量要高于玉米地和撂荒地等农田土壤。

### 2.3 微生物生物量碳(MBC)

MBC 是指土壤活的细菌、真菌、藻类和土壤微生物体内所含的碳<sup>[131]</sup>,是土壤微生物生物量的主要组成和土壤碳的重要来源<sup>[132]</sup>,反映输入土壤的有机质向微生物生物量的转化效率以及土壤中养分元素的损失和土壤矿物质对有机质的固定<sup>[137]</sup>。MBC 易分解、活性高且周转速率快,直接参与陆地生态系统养分循环、凋落物分解和有机质转化等生态过程<sup>[138-140]</sup>,MBC 含量一般为 SOC 总量的 0.5%~13%<sup>[141]</sup>,可直接表征微生物群落状态与功能变化<sup>[142-143]</sup>。MBC 含量通常采用 0.5 mol/L K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-氯仿熏蒸法进行测定,将土壤用氯仿熏蒸并在好氧条件下进行培养,测定培养期间 CO<sub>2</sub> 所释放的含量,所得释放量与未熏蒸土壤(对照处理)释放的 CO<sub>2</sub> 含量即为该土壤的 MBC<sup>[90-91]</sup>。

土壤 MBC 也与微生物量氮、土壤细菌和放线菌数量均呈显著相关关系<sup>[75,144]</sup>。Miltner 等利用扫描电子显微镜,在土壤颗粒表面原位观察到大量微生物残体碳的存在,明确了土壤有机质的微生物来源,认为微生物残体是土壤有机质形成的主要因素之一<sup>[145]</sup>。施肥方式对 MBC 含量影响显著,施用有机肥、有机肥与化肥配施的土壤 MBC 较未施肥土壤分别增加了 21.82% 和 19.17%<sup>[98]</sup>。连续 2 年施用菌渣、秸秆和生物炭后较第一年的土壤 MBC 含量增

加了 5.6%~458.0%<sup>[146]</sup>。不同土层深度和不同粒径团聚体中土壤 MBC 含量也存在差异,0~20 cm 土层土壤 MBC 含量要高于 20~40 cm 土层,>2.00 mm 粒径的团聚体 MBC 含量高于 <0.25 mm 粒径的团聚体<sup>[147]</sup>。此外,MBC 含量与 POC 和 DOC 含量呈正相关<sup>[124,148]</sup>,这可能是较高的 POC 为微生物提供了良好的生存环境以及可溶性有机质的浸出为土壤微生物提供了充足的碳源。

### 2.4 易氧化有机碳(EOC)

土壤 EOC 是土壤中容易被氧化、活性较高的物质,主要输入来源包括凋落物和根系分泌物。土壤 EOC 因其较高的氧化活性,易被土壤微生物利用,在生态系统营养循环过程中起着重要作用。Blair 等认为将能被 330 mmol/L KMnO<sub>4</sub> 溶液氧化的土壤有机碳为 EOC,因此土壤 EOC 含量也通过 KMnO<sub>4</sub> 氧化法进行测定,通过处理前后 KMnO<sub>4</sub> 溶液浓度的变化计算出土壤 EOC 的含量<sup>[92]</sup>。

施肥是影响土壤 EOC 含量的关键性因素。大量研究表明,与施用无机肥相比,有机肥显著提高了 EOC 含量<sup>[71-72]</sup>,这不仅与有机肥的施用增加了土壤有机碳的投入有关,还与有机肥提供了氮、磷等养分供给,从而提高了土壤对 EOC 的固存能力,造成 EOC 积累有关<sup>[149]</sup>。土壤 EOC 含量还对土壤类型和土地利用方式变化响应强烈,在荒漠草地向沙地的演变过程中,随着荒漠草地沙漠化加剧,土壤 EOC 含量下降明显<sup>[150]</sup>;人类活动和自然生态活动也影响着土壤 EOC 含量,如人类灌溉引起的有机质溶解流失,生物筑巢引起周围微环境改变等,间接地改变了土壤微生物的数量和活性,从而影响土壤 EOC 含量<sup>[151]</sup>。此外,土壤 EOC 含量还受气候、时间等因素影响而呈明显的时空变化<sup>[152]</sup>。

## 3 总结与展望

土壤有机碳及活性组分作为衡量土壤质量的重要指标,受到土壤性质、气候和管理方式等多因素的共同影响:(1)凋落物、根系分泌物和微生物生物量等外源有机碳决定了土壤有机碳的输入土壤,土壤微生物数量、活性和其他环境变化影响土壤有机碳的矿化和分解速率,而土壤中总有机碳和各组分有机碳含量取决于两者间的平衡。(2)秸秆还田和管理方式等措施多数情况下有利于土壤有机碳含量增加和活性提升,其中对可溶性有机碳的作用效果最为显著。然而由于诸多因素的影响,土壤有

机碳的变化存在多向性。

目前关于土壤有机碳的研究取得了较大进展,但对于其活性组分的特性和影响因素以及同一因素对各组分的影响效果缺乏研究。根据目前的研究,为更好地了解土壤有机碳以评估土壤质量,未来还需细化对土壤有机碳的研究:(1)秸秆类型和秸秆还田深度通常引起土壤有机碳含量增加,但效果容易受其他因素的影响,那是否能通过调节和合理搭配秸秆还田方式(还田深度和秸秆类型等)来稳定秸秆还田对土壤有机碳和土壤质量的提升效果?(2)施肥会引起土壤有机碳的变化,但这并不意味着高投入会带来较高的回报,那么探索肥料施用提高土壤有机碳含量的平衡点是未来需进行研究的重点。(3)土壤有机碳输入量、矿化和分解速率决定土壤有机碳含量。目前较多学者进行了相关研究,如通过有机碳官能团计算有机碳分解潜力。但目前还没有系统的测算方式或模型。未来通过土壤有机碳评价土壤质量,建立系统的土壤有机碳输入量、矿化和分解速率测算模型具有必要性。(4)土壤有机碳是评价土壤质量的重要指标,但若仅依赖土壤有机碳及其组分的含量来衡量土壤质量是不充分的。土壤有机碳官能团、土壤团聚体稳定性指标和土壤有机碳光谱特征更能深层次地反映土壤有机碳状况,有助于更全面地衡量土壤质量。

#### 参考文献:

- [1] Moebius - Clune B N, Moebius - Clune D J, Gugino B K, et al. Comprehensive assessment of soil health - The cornell framework manual[M]. Geneva: Cornell University, 2016: 19 - 75.
- [2] van Groenigen K J, Qi X, Osenberg C W, et al. Faster decomposition under increased atmospheric CO<sub>2</sub> limits soil carbon storage[J]. Science, 2014, 344(6183): 508 - 509.
- [3] 程 璐, 程 曼, 徐茂红, 等. 铁对不同坡向不同深度亚高山草甸土壤有机碳矿化特征的影响[J/OL]. 应用与环境生物学报. (2022 - 06 - 20) [2023 - 01 - 10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1482.Q.20220617.1659.013.html>.
- [4] Lal R. Accelerated soil erosion as a source of atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 188: 35 - 40.
- [5] Bossio D A, Cook - Patton S C, Ellis P W, et al. The role of soil carbon in natural climate solutions[J]. Nature Sustainability, 2020, 3(5): 391 - 398.
- [6] 渠晨晨, 任稳燕, 李秀秀, 等. 重新认识土壤有机质[J]. 科学通报, 2022, 67(10): 913 - 923.
- [7] 张晓玲, 陈效民, 陶朋闯, 等. 施用生物质炭对旱地红壤有机碳矿化及碳库的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 191 - 196.
- [8] 原 野, 高国卿, 高 娜, 等. 黄土区大型露天煤矿复垦 24a 土壤

- 碳氮组分特征[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4): 167 - 174.
- [9] 余 健, 房 莉, 卞正富, 等. 土壤碳库构成研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 4829 - 4838.
- [10] 闫丽娟, 李 广, 吴江琪, 等. 黄土高原 4 种典型植被对土壤活性有机碳及土壤碳库的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5546 - 5554.
- [11] He X X, Huang Y Z, Zhang Q C, et al. Distribution of organic carbon fractions in soil aggregates in Chinese fir plantations with different stand ages[J]. Ecological Processes, 2021, 10(1): 646 - 658.
- [12] Geisen S, Hu S R, dela Cruz T E E, et al. Protists as catalyzers of microbial litter breakdown and carbon cycling at different temperature regimes[J]. The ISME Journal, 2020, 15(2): 618 - 621.
- [13] Li Y, Li Z, Cui S, et al. Microbial - derived carbon components are critical for enhancing soil organic carbon in no - tillage croplands: a global perspective [J]. Soil & Tillage Research, 2021, 205: 104758.
- [14] 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.
- [15] Krogh L, Noergaard A, Hermansen M, et al. Preliminary estimates of contemporary soil organic carbon stocks in Denmark using multiple datasets and four scaling - up methods[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2003, 96(1/2/3): 19 - 28.
- [16] Diffenbaugh N S, Field C B. Changes in ecologically critical terrestrial climate conditions [J]. Science, 2013, 341(6145): 486 - 492.
- [17] Ding J Z, Chen L Y, Ji C J, et al. Decadal soil carbon accumulation across Tibetan permafrost regions[J]. Nature Geoscience, 2017, 10(6): 420 - 424.
- [18] Chen S P, Wang W T, Xu W T, et al. Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4027 - 4032.
- [19] Dean C, Kirkpatrick J B, Doyle R B, et al. The overlooked soil carbon under large, old trees[J]. Geoderma, 2020, 376: 114541.
- [20] 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.
- [21] Hong S B, Yin G D, Piao S L, et al. Divergent responses of soil organic carbon to afforestation[J]. Nature Sustainability, 2020, 3(9): 1 - 7.
- [22] Zhenrui Z, Xiaoxia G, Sibao Z, et al. Urban development enhances soil organic carbon storage through increasing urban vegetation[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 312: 114922.
- [23] Peixoto L, Elsgaard L, Rasmussen J, et al. Decreased rhizodeposition, but increased microbial carbon stabilization with soil depth down to 3.6 m[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2020, 150: 108008.
- [24] Li Q Q, Li A W, Dai T F, et al. Depth - dependent soil organic

- carbon dynamics of croplands across the Chengdu Plain of China from the 1980s to the 2010s[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(7): 4134–4146.
- [25] Keiluweit M, Wanzek T, Kleber M, et al. Anaerobic microsites have an unaccounted role in soil carbon stabilization[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1771.
- [26] Angst G, Mueller K E, Kögel – Knabner I, et al. Aggregation controls the stability of lignin and lipids in clay – sized particulate and mineral associated organic matter[J]. *Biogeochemistry*, 2017, 132(3): 307–324.
- [27] Hong H L, Chen S L, Fang Q, et al. Adsorption of organic matter on clay minerals in the Dajihu peat soil chronosequence, South China [J]. *Applied Clay Science*, 2019, 178: 105125.
- [28] Li N, Long J H, Han X Z, et al. Molecular characterization of soil organic carbon in water – stable aggregate fractions during the early pedogenesis from parent material of Mollisols[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(4): 1869–1880.
- [29] Adnan M, Xu M G, Syed A A S, et al. Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of southern China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 270: 110894.
- [30] Gul S, Whalen J K, Ellis B E, et al. Plant residue chemistry impacts soil processes and microbial community structure: a study with *Arabidopsis thaliana* cell wall mutants[J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, 60: 84–91.
- [31] Delgado – Baquerizo M, Eldridge D J, Maestre F T, et al. Climate legacies drive global soil carbon stocks in terrestrial ecosystems[J]. *Science Advances*, 2017, 3(4): 1602008.
- [32] Bangroo S A, Najar G R, Rasool A. Effect of altitude and aspect on soil organic carbon and nitrogen stocks in the Himalayan Mawer Forest Range[J]. *Catena*, 2017, 158: 63–68.
- [33] Wu M H, Chen S Y, Chen J W, et al. Reduced microbial stability in the active layer is associated with carbon loss under alpine permafrost degradation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(25): e2025321118.
- [34] Grace J B, Anderson T M, Seabloom E W, et al. Integrative modelling reveals mechanisms linking productivity and plant species richness[J]. *Nature*, 2016, 529(7586): 390–393.
- [35] Ibisch P L, Hoffmann M T, Kreft S, et al. A global map of roadless areas and their conservation status[J]. *Science*, 2016, 354(6318): 1423–1427.
- [36] 陈静文. 丹江口库区侧柏人工林凋落物输入调控对土壤不同组分有机碳氮的影响[D]. 武汉: 中国科学院大学(中国科学院武汉植物园), 2018: 43–44.
- [37] Mayer M, Prescott C E, Abaker W E A, et al. Tamm review: influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: a knowledge synthesis[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 466: 118127.
- [38] 习 丹, 余泽平, 熊 勇, 等. 江西官山常绿阔叶林土壤有机碳组分沿海拔的变化[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(10): 3349–3356.
- [39] 郭洁芸, 王雅歆, 李建龙. 氮添加对中国陆地生态系统植物 – 土壤碳动态的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(12): 4823–4833.
- [40] 简俊楠, 刘伟超, 朱玉帆, 等. 短期氮添加对黄土高原人工刺槐林土壤有机碳组分的影响[J]. *环境科学*, 2023, 44(5): 2767–2774.
- [41] 姚易寒, 张少博, 周家树, 等. 氮磷添加对毛竹林土壤有机碳矿化及其激发效应的影响[J/OL]. *土壤学报*. (2002–11–12) [2023–01–10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20220923.20220835.20220002.html>.
- [42] Ye C, Chen D, Hall S J, et al. Reconciling multiple impacts of nitrogen enrichment on soil carbon: plant microbial and geochemical controls[J]. *Ecology Letters*, 2018, 21: 1162–1173.
- [43] Chen J G, Xiao W, Zheng C Y, et al. Nitrogen addition has contrasting effects on particulate and mineral associated soil organic carbon in a subtropical forest[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2022, 142: 107708.
- [44] Lu X K, Mao Q G, Wang Z H, et al. Long – term nitrogen addition decreases soil carbon mineralization in an n – rich primary tropical forest[J]. *Forests*, 2021, 12(6): 734–734.
- [45] Averill C, Turner B L, Finzi A C. Mycorrhiza – mediated competition between plants and decomposers drives soil carbon storage[J]. *Nature*, 2014, 505(7484): 543–545.
- [46] Ashworth A J, Adams T, Kharel T, et al. Root decomposition in silvopastures is influenced by grazing, fertility, and grass species[J]. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 2021, 4(3): 20190.
- [47] Li T T, Zhang Y L, Bei S K, et al. Contrasting impacts of manure and inorganic fertilizer applications for nine years on soil organic carbon and its labile fractions in bulk soil and soil aggregates[J]. *Catena*, 2020, 194: 104739.
- [48] Yu L, Zhuang T, Bai J H, et al. Effects of water and salinity on soil labile organic carbon in estuarine wetlands of the Yellow River Delta, China[J]. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2020, 20(4): 556–569.
- [49] Cai A D, Xu M G, Wang B, et al. Manure acts as a better fertilizer for increasing crop yields than synthetic fertilizer does by improving soil fertility[J]. *Soil & Tillage Research*, 2019, 189: 168–175.
- [50] 陈 磊, 郝小雨, 马星竹, 等. 黑土根际土壤有机碳及结构对长期施肥的响应[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(8): 72–78.
- [51] Sun Z C, Qin W L, Wang X, et al. Effects of manure on topsoil and subsoil organic carbon depend on irrigation regimes in a 9 – year wheat – maize rotation[J]. *Soil & Tillage Research*, 2021, 205: 104790.
- [52] Sinclair T R. “Transpiration and crop yields” by C. T. de Wit, 1958, Institute of biological and chemical research of field crops and herbage, No. 64. 6, Wageningen, the Netherlands [J]. *Crop Science*, 2020, 60(1): 29–31.
- [53] Schmidt J E, Peterson C, Wang D, et al. Agroecosystem tradeoffs associated with conversion to subsurface drip irrigation in organic systems[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 202: 1–8.
- [54] Sokol N W, Kuebbing S E, Karlsen – Ayala E, et al. Evidence for

- the primacy of living root inputs, not root or shoot litter, in forming soil organic carbon[J]. *New Phytologist*, 2019, 221(1): 233–246.
- [55] Gross C D, Harrison R B. The case for digging deeper: Soil organic carbon storage, dynamics, and controls in our changing world[J]. *Soil Systems*, 2019, 3(2): 28.
- [56] Nielsen U N, Ball B A. Impacts of altered precipitation regimes on soil communities and biogeochemistry in arid and semi-arid ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1407–1421.
- [57] Huang L, Shao Q Q, Liu J Y. Forest restoration to achieve both ecological and economic progress, Poyang Lake basin, China[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 44: 53–60.
- [58] Dong L B, Fan J W, Li J W, et al. Forests have a higher soil C sequestration benefit due to lower C mineralization efficiency: evidence from the central loess plateau case[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2022, 339: 108144.
- [59] Augusto L, De Schrijver A, Vesterdal L, et al. Influences of evergreen gymnosperm and deciduous angiosperm tree species on the functioning of temperate and boreal forests[J]. *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2015, 90(2): 444–466.
- [60] Hoosbeek M R, Remme R P, Rusch G M. Trees enhance soil carbon sequestration and nutrient cycling in a silvopastoral system in south-western Nicaragua[J]. *Agroforestry Systems*, 2016, 92(2): 263–273.
- [61] Gupta M M, Rao D H. On the principles of fuzzy neural networks[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1994, 61(1): 1–18.
- [62] Gurmessia B, Ashworth A J, Yang Y C, et al. Soil bacterial diversity based on management and topography in a silvopastoral system[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 163: 103918.
- [63] Niyigena V, Ashworth A J, Nieman C, et al. Factors affecting sugar accumulation and fluxes in warm- and cool-season forages grown in a silvopastoral system[J]. *Agronomy*, 2021, 11(2): 354.
- [64] 孙悦, 徐兴良, Kuzyakov Y. 根际激发效应的发生机制及其生态重要性[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(1): 62–75.
- [65] 胡凯, 陶建平, 黄科, 等. 模拟根系分泌物碳输入对凋落叶分解中微生物群落动态的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(2): 417–424.
- [66] Keiluweit M, Bougoure J J, Nico P S, et al. Mineral protection of soil carbon counteracted by root exudates[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(6): 588–595.
- [67] 马云华, 王秀峰, 魏珉, 等. 黄瓜连作土壤酚酸类物质积累对土壤微生物和酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(11): 145–149.
- [68] Deng H, Li X F, Cheng W D, et al. Resistance and resilience of Cu-polluted soil after Cu perturbation, tested by a wide range of soil microbial parameters[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2009, 70(2): 137–148.
- [69] Gai X P, Liu H B, Liu J, et al. Long-term benefits of combining chemical fertilizer and manure applications on crop yields and soil carbon and nitrogen stocks in North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 208: 384–392.
- [70] Lepsch H C, Brown P H, Peterson C A, et al. Impact of organic matter amendments on soil and tree water status in a California orchard[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 222: 204–212.
- [71] 张翰林, 郑尧清, 何七勇, 等. 不同秸秆还田年限对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 216–220.
- [72] 陆畅, 徐畅, 黄容, 等. 秸秆和生物炭对油菜—玉米轮作下紫色土有机碳及碳库管理指数的影响[J]. *草业科学*, 2018, 35(3): 482–490.
- [73] Xue B, Huang L, Li X K, et al. Effect of clay mineralogy and soil organic carbon in aggregates under straw incorporation[J]. *Agronomy*, 2022, 12(2): 534–534.
- [74] Zhao J, Ni T, Li Y, et al. Responses of bacterial communities in arable soils in a rice-wheat cropping system to different fertilizer regimes and sampling times[J]. *PLoS ONE*, 2018, 9(1): 85031.
- [75] 何甜甜, 王静, 符云鹏, 等. 等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物生物量碳氮的影响[J]. *环境科学*, 2021, (1): 450–452.
- [76] 于雅茜, 裴久渤, 刘维, 等.  $^{13}\text{C}$  富集玉米根、茎、叶添加对长期不施肥和施肥处理棕壤土壤呼吸的影响及其激发效应[J/OL]. *土壤学报*. [2022-12-11]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20220914.20221750.20220002.html>.
- [77] Wang B, Brewer P E, Shugart H H, et al. Soil aggregates as biogeochemical reactors and implications for soil-atmosphere exchange of greenhouse gases - A concept[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(2): 373–385.
- [78] 罗玉叶, 邱龙霞, 龙军, 等. 不同秸秆还田率情境下亚热带水田土壤的“碳汇”贡献模拟研究[J/OL]. *土壤学报*. [2022-12-11]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.p.20220916.20221340.20220002.html>.
- [79] 霍启煜, 马丽娟, 徐悦轩, 等. 秸秆还田方式及施氮量对滴灌棉田土壤有机碳氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(3): 207–212.
- [80] 王永栋, 武均, 蔡立群, 等. 秸秆还田量对陇中旱作麦田土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(2): 232–239, 249.
- [81] 宋依依, 阳曹, 段鑫盈, 等. 秸秆还田深度对土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(2): 344–350.
- [82] Wang X X, Li J Q, Wang D L, et al. Straw incorporation effects on net photosynthetic carbon assimilation and maize growth[J/OL]. *Frontiers in Agronomy*. [2022-12-11]. <http://www.researchsquare.com/article/rs-656233/v1>.
- [83] 柳开楼, 胡惠文, 余喜初, 等. 香根草秸秆覆盖和化肥减施对红壤花生生产量的影响[J]. *生态科学*, 2022, 41(2): 220–226.
- [84] 佟小刚, 韩新辉, 李娇, 等. 黄土丘陵区不同退耕还林地土壤颗粒结合态碳库分异特征[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(21): 170–176.
- [85] Wang H Y, Wu J Q, Li G, et al. Changes in soil carbon fractions and enzyme activities under different vegetation types of the northern Loess Plateau[J]. *Ecology and evolution*, 2020, 10(21): 12211–



- 12223.
- [86] 刘红梅,张海芳,赵建宁,等. 氮添加对贝加尔针茅草原土壤活性有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 草业学报,2020,29(8): 18–26.
- [87] 王一诺,徐志伟,王升忠. 白江河天然和排水泥炭沼泽土壤活性有机碳组分含量及其影响因素研究[J]. 湿地科学,2021,19(6):691–701.
- [88] 董洪芳,于君宝,管博. 黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征[J]. 环境科学,2013,34(1):288–292.
- [89] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000:106–109.
- [90] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000: 25–38.
- [91] Jenkinson D S, Powlson D S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil – V: a method for measuring soil biomass[J]. Soil Biology and Biochemistry,1976,8(3):209–213.
- [92] Blair G, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Journal of Agricultural Research, 1995,46(7):393–406.
- [93] Golchin A, Oades J M, Skjemstad J O, et al. Soil structure and carbon cycling[J]. Soil Research,1994,32(5):1043–1068.
- [94] 苏梓锐,曾发旭,郑成洋. 氮添加对亚热带常绿阔叶林土壤有机碳及土壤呼吸的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版),2022, 58(3):517–525.
- [95] 唐光木,徐万里,盛建东,等. 新疆绿洲农田不同开垦年限土壤有机碳及不同粒径土壤颗粒有机碳变化[J]. 土壤学报,2010, 47(2):279–285.
- [96] Gregorich E G, Monreal C M, Schnitzer M, et al. Transformation of plant residues into soil organic matter: chemical characterization of plant tissue, isolated soil fractions, and whole soils[J]. Soil Science,1996,161(10):680–693.
- [97] 高继伟,谢英荷,李廷亮,等. 不同培肥措施对矿区复垦土壤活性有机碳的影响[J]. 灌溉排水学报,2018,37(5):6–12.
- [98] 郭亚军,邱慧珍,张玉娇,等. 不同施肥方式对马铃薯农田土壤有机碳组分和碳库管理指数的影响[J]. 土壤通报,2021,52(4):912–919.
- [99] 陈晓东,吴景贵. 不同有机物料施用下土壤颗粒有机碳红外光谱特征[J]. 分析化学,2021,49(3):468–473.
- [100] 李欢,王艳玲,殷丹,等. 水稻秸秆/根系添加对稻田红壤发生层颗粒态及矿物结合态有机碳的影响[J]. 土壤通报, 2022,53(2):384–391.
- [101] 汉光昭,曹广超,曹生奎,等. 高寒地区生态修复草地和林地土壤颗粒有机碳分解特征[J]. 中国沙漠,2022,42(5):36–43.
- [102] Xiao W, Feng S Z, Liu Z F, et al. Interactions of soil particulate organic matter chemistry and microbial community composition mediating carbon mineralization in karst soils[J]. Soil Biology & Biochemistry,2017,107:85–93.
- [103] 赵搏,丁雪丽,汪景宽,等. 地膜覆盖和施肥对棕壤剖面溶解性有机碳分布的影响[J]. 土壤通报,2019,50(4):847–853.
- [104] Ritson J P, Graham N J D, Templeton M R, et al. The impact of climate change on the treatability of dissolved organic matter (DOM) in upland water supplies: a UK perspective[J]. Science of the Total Environment,2014,473:714–730.
- [105] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review[J]. Soil Science,2000, 165(4):277–304.
- [106] Li X M, Chen Q L, He C, et al. Organic carbon amendments affect the chemodiversity of soil dissolved organic matter and its associations with soil microbial communities[J]. Environmental Science and Technology,2019,53:50–59.
- [107] Guo Z Y, Wang Y H, Wan Z M, et al. Soil dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: global budget, spatial distribution and controls[J]. Global Ecology and Biogeography, 2020, 29(12):2159–2175.
- [108] 曹建华,潘根兴,袁道先. 不同植物凋落物对土壤有机碳淋失的影响及岩溶效应[J]. 第四纪研究,2000,20(4):359–366.
- [109] 柳敏,宇万太,姜子绍,等. 土壤溶解性有机碳(DOC)的影响因子及生态效应[J]. 土壤通报,2007,38(4):758–764.
- [110] 刘江伟,徐海东,林同岳,等. 海涂围垦区不同林分土壤活性有机碳垂直变化特征[J]. 林业科学研究,2022,35(3):18–26.
- [111] 彭艳,刘佳佳,王林均,等. 植被类型和管理方式对4种经济林土壤活性碳氮及碳通量的影响[J]. 浙江林业科技,2019,39(6):12–18.
- [112] Wu H H, Xu X K, Cheng W G, et al. Dissolved organic matter and inorganic N jointly regulate greenhouse gases fluxes from forest soils with different moistures during a freeze–thaw period[J]. Soil Science and Plant Nutrition,2020,66(1):163–176.
- [113] Lau D C P, Jonsson A, Isles P D F, et al. Lowered nutritional quality of plankton caused by global environmental changes[J]. Global Change Biology,2021,27(23):6294–6306.
- [114] Aitkenhead J A, McDowell W H. Soil C:N ratio as a predictor of annual riverine DOC flux at local and global scales[J]. Global Biogeochemical Cycles,2000,14(1):127–138.
- [115] 郑永红,张治国,胡友彪,等. 淮南矿区煤矸石风化物特性及有机碳分布特征[J]. 水土保持通报,2014,34(5):18–24.
- [116] 白潇,张世熔,钟钦梅,等. 中国东部区域土壤活性有机碳分布特征及其影响因素[J]. 生态环境学报,2018,27(9): 1625–1631.
- [117] 倪进治,徐建民,谢正苗. 有机肥料施用后潮土中活性有机质组分的动态变化[J]. 农业环境科学学报,2003,22(4):416–419.
- [118] Sun Y Q, Xiong X N, He M J, et al. Roles of biochar–derived dissolved organic matter in soil amendment and environmental remediation: a critical review[J]. Chemical Engineering Journal, 2021,424:130387.
- [119] Chang Chien S W, Wang H H, Chen Y M, et al. Removal of heavy metals from contaminated paddy soils using chemical reductants coupled with dissolved organic carbon solutions[J]. Journal of Hazardous Materials,2021,403:123549–123549.
- [120] 孙涛,孙约兵,贾宏涛,等. 虾壳生物炭对Cd–As复合污染土壤修复效应及土壤可溶性有机碳含量的影响[J]. 农业环境科学学报,2021,40(8):1675–1685,1606.

- [121] Cook B D, Allan D L. Dissolved organic carbon in old field soils: compositional changes during the biodegradation of soil organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, 24(6): 595–600.
- [122] Li M, Drosos M, Hu H L, et al. Organic amendments affect dissolved organic matter composition and mercury dissolution in pore waters of mercury – polluted paddy soil[J]. *Chemosphere*, 2019, 232: 356–365.
- [123] Song C F, Shan S D, Yang C, et al. The comparison of dissolved organic matter in hydrochars and biochars from pig manure[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 720: 137423.
- [124] Yan Z X, Zhang W Y, Wang Q S, et al. Changes in soil organic carbon stocks from reducing irrigation can be offset by applying organic fertilizer in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 266: 107539.
- [125] 王良梅, 周立祥, 占新华, 等. 水田土壤中水溶性有机物的产生动态及对土壤中重金属活性的影响: 田间微区试验[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(5): 858–864.
- [126] 梁远宇, 王小利, 徐明岗, 等. 长期不同施肥土壤对可溶性有机碳的吸附特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 29(11): 1915–1925.
- [127] Chen X D, Wu J G, Opoku K Y. Rationalizing the use of agricultural organic waste: Effects on soil dissolved organic carbon in primary saline – alkali soil[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2021, 52(2): 102–115.
- [128] Gmach M R, Scarpore F V, Cherubin M R, et al. Sugarcane straw removal effects on soil water storage and drainage in Southeastern Brazil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 74: 466–476.
- [129] 魏早强, 罗珠珠, 牛伊宁, 等. 土壤有机碳组分对土地利用方式响应的 Meta 分析[J]. *草业科学*, 2022, 39(6): 1115–1128.
- [130] 姜文婷, 高翔菲, 宋锦浩, 等. 不同土地利用方式土壤有机碳组分及微生物群落对植物残体输入的响应[J/OL]. *土壤通报*. [2023–01–10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1172.S.20220927.2231.001.html>.
- [131] Larsen K S, Jonasson S, Michelsen A. Repeated freeze – thaw cycles and their effects on biological processes in two arctic ecosystem types[J]. *Applied Soil Ecology*, 2002, 21(3): 187–195.
- [132] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 513–519.
- [133] 李亚林, 张旭博, 任凤玲, 等. 长期施肥对中国农田土壤溶解性有机碳氮含量影响的整合分析[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(6): 1224–1233.
- [134] 朱宣霖, 朱长伟, 陈琛, 等. 轮耕对豫北潮土速效养分及可溶性有机碳结构特性的影响[J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2022, 30(4): 683–693.
- [135] 杜映妮, 李天阳, 何丙辉. 不同施肥和耕作处理紫色土坡耕地碳、氮、磷流失特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(12): 2149–2159.
- [136] 曹小闯, 刘晓霞, 马超, 等. 干湿交替灌溉改善稻田根际氧环境进而促进氮素转化和水稻氮素吸收[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(1): 1–14.
- [137] Ullah R, Lone M I, Khan M B, et al. Effect of cropping systems and seasonal variations on soil microbial biomass and enzymatic activities in arid soils[J]. *Report and Opinion*, 2014, 6(12): 1741–1761.
- [138] Luo G W, Xue C, Jiang Q H, et al. Soil carbon, nitrogen, and phosphorus cycling microbial populations and their resistance to global change depend on soil C : N : P stoichiometry[J]. *mSystems*, 2020, 5(3): 00162.
- [139] Taylor L A, Arthur M A, Yanai R D. Forest floor microbial biomass across a northern hardwood successional sequence[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(3): 431–439.
- [140] 李品, 木勒德·吐尔汗拜, 田地, 等. 全球森林土壤微生物量碳氮磷化学计量的季节动态[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(6): 532–542.
- [141] He L Y, Mazza Rodrigues J L, Soudzilovskaia N A, et al. Global biogeography of fungal and bacterial biomass carbon in topsoil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 151: 108024.
- [142] 何越, 李春涛, 俞元春, 等. 亚热带森林土壤微生物量及群落功能特征的城乡梯度变化[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(1): 93–102.
- [143] 王晓荣, 雷蕾, 曾立雄, 等. 抚育间伐对马尾松林土壤活性有机碳的短期影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(4): 1049–1061.
- [144] 张蛟, 崔士友, 陈澎军, 等. 沿海滩涂水稻种植对土壤微生物量碳和水溶性有机碳的影响[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(17): 222–228.
- [145] Miltner A, Bombach P, Schmidt – Brücken B, et al. SOM genesis: microbial biomass as a significant source[J]. *Biogeochemistry*, 2012, 111(1/2/3): 41–55.
- [146] 宋佳坤, 张晓丽, 孔凡磊, 等. 生物质调理剂对川西北高寒草地沙化土壤养分和微生物群落特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(6): 2217–2226.
- [147] 王翠丽, 王军强, 陈亮, 等. 不同耕作方式对绿洲区农田土壤团聚体中微生物生物量碳、氮含量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(12): 246–251.
- [148] Hagedorn F, Bruderhofer N, Ferrari A, et al. Tracking litter – derived dissolved organic matter along a soil chronosequence using C – 14 imaging: Biodegradation, physico – chemical retention or preferential flow? [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 88: 333–343.
- [149] 张雅柔, 安慧, 刘秉儒, 等. 短期氮磷添加对荒漠草原土壤活性有机碳的影响[J]. *草业学报*, 2019, 28(10): 12–24.
- [150] 阎欣, 刘任涛, 安慧. 土壤易氧化有机碳与溶解性有机碳对荒漠草地沙漠化过程中土壤碳库变异的表征[J]. *草业学报*, 2018, 27(11): 15–25.
- [151] 李少辉, 王邵军, 张哲, 等. 蚂蚁筑巢对西双版纳热带森林土壤易氧化有机碳时空动态的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 413–419.
- [152] 张哲, 王邵军, 李霁航, 等. 土壤易氧化有机碳对西双版纳热带森林群落演替的响应[J]. *生态学报*, 2019, 39(17): 6257–6263.