

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.03.004

常琳溪, 梁新然, 王磊, 等. 中国稻田土壤有机碳汇特征与影响因素的研究进展. 土壤, 2023, 55(3): 487–493.

中国稻田土壤有机碳汇特征与影响因素的研究进展^①

常琳溪, 梁新然, 王磊, 李祖然, 湛方栋, 何永美*

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘要: 稻田是中国面积最大的耕地之一, 稻田土壤有机碳(SOC)是重要的农业碳库, 被认为在减缓大气二氧化碳浓度上升和全球变暖中起着重要作用。明确中国稻田土壤有机碳汇特征与影响因素, 有助于制定合理的农业管理措施, 科学地增强稻田土壤固碳潜力。研究发现: 在空间分布上, 中国稻田 SOC 含量具有地域性差异, 总体表现为华南、西南高于华北、西北, 长江中游高于下游, 且稻田 SOC 含量沿海海拔升高而增加, 随土壤深度增加而减少; 在组成上, 稻田土壤活性碳比例低于 5.3%, 惰性碳比例远大于活性碳, 高达 60% 以上, 稻田固碳重点在于惰性组分; 在影响因素上, 人为管理措施是导致稻田碳汇变化的主要原因, 并与自然因素密切相关。为充分发挥稻田土壤碳汇功能, 未来研究应加强稻田 SOC 稳定机制研究, 制定因地制宜的农业管理方案, 为中国“碳达峰与碳中和”目标的实现提供科学依据。

关键词: 稻田; 土壤有机碳; 碳汇特征; 影响因素; 碳固定

中图分类号: X53 文献标志码: A

Characteristics and Influencing Factors of Soil Organic Carbon Sink in Paddy Fields in China: A Review

CHANG Linxi, LIANG Xinran, WANG Lei, LI Zuran, ZHAN Fangdong, HE Yongmei*

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: Paddy field is one of the largest arable lands in China. Soil organic carbon (SOC) in paddy field is an important agricultural carbon pool, which is considered to play a crucial role in slowing down the rise of atmospheric carbon dioxide (CO₂) concentration and global warming. Therefore, it is necessary to clarify the characteristics and influencing factors of SOC sinks in paddy fields of China, which is beneficial to formulate reasonable agricultural management measures and enhance the soil carbon sequestration potential of paddy fields scientifically. According the previous researches, there are regional differences in the spatial distribution of SOC contents in paddy fields of China. Generally, SOC contents in paddy fields of south and southwest China are higher than that of north and northwest China, and that of the middle reaches are higher than the lower reaches of the Yangtze River. Moreover, SOC contents in paddy fields increase with the increase of altitude but decrease with the increase of soil depth. For the composition of organic carbon in paddy fields, the proportion of inert carbon (more than 60%) is much higher than the activated carbon (less than 5.3%), thus the inert carbon is vital for carbon fixation. For the influencing factors, human management measures are mainly responsible for the change of carbon sink in paddy fields, and which are also closely related to natural factors. In order to maximize the function of carbon sink in paddy fields, the mechanisms of SOC stability should be strengthened in the future research, and the agricultural management should be developed according to local conditions, so as to provide scientific basis for achieving the goal of carbon peak and carbon neutrality in China.

Key words: Paddy field; Soil organic carbon; Carbon sink characteristics; Affecting factors; Carbon fixation

水稻(*Oryza sativa* L.)是最重要的粮食作物之一, 全球水稻种植总面积达 1.8 亿 hm², 其中亚洲高达 90%, 中国占 18.5%^[1]。我国是水稻总产量最高的国

家, 占全球总量的 31%, 占我国粮食总量的 1/3, 养育着我国一半以上的人口^[2], 确保水稻产量对国家粮食安全具有重要意义。稻田面积和土壤肥力对水

①基金项目: 国家自然科学基金项目(32060287)资助。

* 通讯作者(heyongmei06@126.com)

作者简介: 常琳溪(1998—), 女, 云南保山人, 硕士研究生, 主要研究方向为农业环境生态。E-mail: 2363817748@qq.com

稻产量具有重要影响^[3]。我国现有稻田面积约 2 992 万 hm^2 , 占全国耕地总面积的 25%, 是我国面积最大的耕地, 维持稻田土壤质量和生态功能对国家粮食生产和安全至关重要^[2]。

土壤有机碳(SOC)是评价土壤肥力的重要指标之一。近 20 年来, 我国稻田 SOC 含量显著升高, 在吸收大气 CO_2 、缓解温室效应等方面发挥着重要作用, 是应对气候变化的重要“碳汇”^[4-5]。表层土壤碳库是人为活动影响最显著和活跃的土壤碳库, 全国总计 38~39 Pg, 有 6 种土壤的表层有机碳库在 1.0 Pg 以上, 其中稻田土壤表层有机碳库达 1.3 Pg^[6]。稻田土壤碳汇量明显高于相同生态环境条件下的其他耕作土壤, 碳库微小变化将对大气 CO_2 浓度及全球变化产生巨大影响^[7]。因此, 充分发挥稻田土壤固碳潜力, 增强水稻土壤碳汇功能是实现我国“双碳”目标的关键措施。

土壤肥力与 SOC 组分构成与周转密切相关, 不同组分 SOC 由于化学性质不同, 其生物有效性和肥力功能不同。活性 SOC 易被土壤微生物分解矿化, 对植物养分供应具有直接作用; 惰性 SOC 物理化学性质非常稳定, 其含量表征土壤长期累积及固碳能力^[8]。稻田生态系统碳输入来源主要包括水稻残体、水稻根际沉积、微生物残体及外源碳输入等^[9]。投入土壤的有机质通过微生物分解作用要么以腐殖质形式累积, 要么以 CO_2 或 CH_4 的形式矿化损失, 又或者以可溶性碳的方式淋溶。水稻残体作为 SOC 的重要来源之一, 进入土壤后发生一系列物理-化学-微生物转化过程, 其化学成分和微生物转化是稻田 SOC 形成的先决条件^[10]。微生物残体碳对 SOC 平均贡献为 51%, 在 SOC 输入中占主要地位^[11]。稻田生态系统碳组成与转化决定稻田碳汇大小和变化特征, 研究稻田碳汇特征对缓解温室气体增加和全球气候变暖具有重要意义。

近年来, 国内外对土壤有机碳汇影响因素的研究取得了较好成果, 主要涉及环境因子、土壤因子和农业管理因子等^[12]。碳汇不只受单方面因子的影响, 而是多种因素共同作用的结果。在自然因素和人类耕作管理双重作用下, 稻田碳汇储量和质量变化差异显著, 这种变化不仅影响土壤肥力, 还影响土壤碳库和大气碳库之间的碳循环平衡, 对气候变化产生直接影响^[13]。研究发现, 秸秆还田可以提高土壤总有机碳、颗粒有机碳、水溶性有机碳含量^[14]; 施肥对水稻土活性有机碳含量均有促进作用^[15]; 节水灌溉稻田中施加秸秆有利于提高稻田 SOC 含量, 改善土壤活性

碳组分^[16]。因此, 在全球气候变化背景下, 深入理解稻田土壤碳汇的主要影响因子, 对加强农业碳汇相关技术体系研究及制定合理的农业管理措施具有重要意义。

综上所述, 稻田土壤有机碳汇特征与影响因素是碳循环研究的关键问题之一。本文综合众多研究成果, 分析了中国稻田土壤碳汇特征; 并从自然因素与人为因素的角度, 探讨了稻田土壤有机碳汇影响因子, 进一步确定了不同因素对稻田土壤碳汇的影响; 最后, 为充分发挥稻田土壤碳汇功能, 对稻田 SOC 稳定机制研究及制定因地制宜的农业管理推广方案提出了展望, 以为我国农业可持续发展及“双碳”目标的实现提供理论基础和科学依据。

1 稻田土壤有机碳汇空间分布特征

SOC 在自然因素和人为管理影响下表现出高度空间异质性。中国各稻作区的 SOC 随空间位置不同呈现明显差异: 华南、西南地区 SOC 含量显著高于华北、西北, 长江中游高于长江下游^[17]。这是由于华南、西南地区属湿润季风气候, 气温高、降水充足, 水热条件适宜, 水稻生产水平较高, 有利于秸秆腐解致使稻田 SOC 含量整体偏高; 而华北、西北地区属干旱与半干旱区, 受水分限制净初级生产力较低, 外源有机碳输入量较少, SOC 含量偏低^[18]。长江中游为我国典型双季稻产区, 长江下游为单季稻产区, 生产力定性代表碳输入, 长江中游较高的碳输入有助于 SOC 积累。

SOC 含量沿海拔升高而增加, 随土层深度增加而减少。一方面, 高海拔地区温度低、湿度大, 不利于微生物生长, 从而抑制微生物对有机质的分解, 减少有机碳输出^[19]; 另一方面, 高海拔区域水稻生长状况较好, 凋落物和根系分泌物储备量增加, 促进有机碳输入, 最终导致 SOC 含量随海拔升高而增加^[20]。此外, SOC“表聚”特征明显, 同海拔梯度 SOC 含量沿土层深度递减, 这是由于大量凋落物及根系分泌物腐解后直接进入表层土壤, 表层土与外界进行物质交换, 增加了 SOC 累积^[21]; 且表层土与深层土相比, 土质更疏松, 孔隙度更大, 土壤温度、水分等环境因子较适宜, 良好的通气和养分状况更利于凋落物分解与腐殖化, 进而增加 SOC 含量^[22]。另外, 随土层加深, 凋落物减少, 紧实的土体与较低的孔隙度使土壤有机质向下迁移受限, 导致下层 SOC 含量低于表层土壤。

2 稻田土壤有机碳汇组成与转化

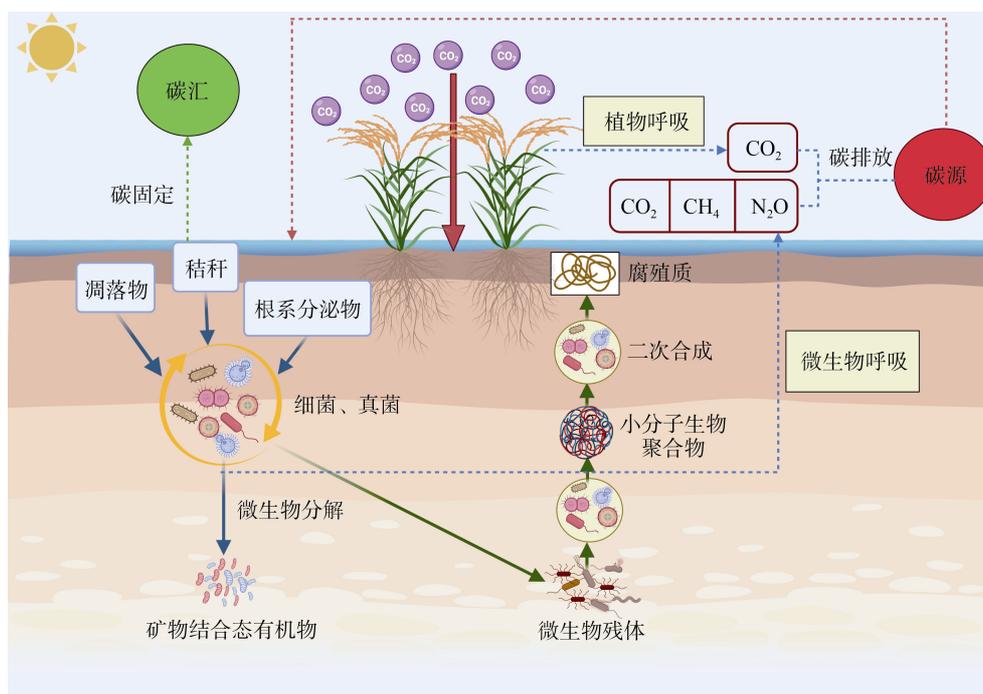
SOC 依据分解速率可分为活性有机碳和惰性有机碳两大类。活性有机碳是指土壤中受环境影响强烈、易被土壤微生物分解矿化且对植物和微生物活性较高的碳素^[23]。活性有机碳在总有机碳中比例较少，但分解和周转速率较快，与土壤理化性质显著相关，能敏感反映不同处理下 SOC 变化情况。活性有机碳含量反映潜在养分含量，其分解和周转速率反映养分循环和供应状况。活性有机碳包括可溶性有机碳、微生物生物量碳、易氧化有机碳等^[24]。惰性有机碳在土壤中较稳定、难分解，能稳定储存在土壤中维持土壤肥力，对土壤结构具有保护作用。由于其分解较慢可长期保留在土壤中，对减缓全球变暖作用也更为积极。惰性有机碳包括难氧化有机碳、重组有机碳、矿质结合态有机碳等^[25]。土壤中惰性有机碳占比 65%~68%，活性有机碳占比 3.3%~10%，新输入的有机碳多为活性有机碳^[26]。水稻土活性有机碳构成比例不超过 5.3%，惰性有机碳比例显著高于活性有机碳，高达 60% 以上^[27]。

此外，SOC 组分构成特征随剖面深度存在差异，下层土壤惰性有机碳比例显著高于上层土壤，而活性有机碳比例不受土层深度影响；总有机碳变异主要来源于惰性组分变异，水稻土固碳重点在于惰性组分^[27]。SOC 组分易受不同因子影响，温度越

低，土壤活性有机碳比例越小，有机碳库越稳定；水分含量与活性有机碳在土壤中的驻留时间显著相关；土壤粉黏粒含量可增加惰性有机碳平均驻留时间^[28]。因此，弄清 SOC 组分构成特征及其驱动力是评价土壤有机碳库质量的关键，有利于揭示农业措施对 SOC 的影响机制。

稻田 SOC 转化过程极其复杂，充分认识 SOC 转化是科学认知土壤碳汇功能的基础。水稻通过光合作用将大气中的 CO₂ 固定为有机物质，其中一部分碳元素通过植物呼吸作用转化为 CO₂ 释放到大气，一部分以植被生物量的形式储存起来，剩余部分则通过凋落物、秸秆、根系分泌物等进入土壤^[29]。进入土壤的碳大多会经过微生物的分解，再次以 CO₂ 的形式回到大气，从而完成稻田生态系统碳循环过程。氮循环与碳循环密切耦合，氮累积对于提高稻田 SOC 含量起着积极作用，土壤淋溶、侵蚀及细菌的反硝化作用等均会造成土壤中氮素的损失。目前关于氮循环中各环节对碳储量的贡献尚不清楚，有待进一步研究。

SOC 转化包括矿化和腐殖化过程(图 1)。矿化过程产生 CO₂、CH₄ 和 N₂O，为作物生长提供营养元素，为腐殖质形成提供基本材料，是腐殖化形成的前提；腐殖化过程是有机碳在分解转化过程中重新合成腐殖质，从一种有机碳转化为另一种有机碳的过程^[32]。



(本图参照文献[30]模拟矿化过程，参照文献[31]模拟腐殖质形成过程)

图 1 稻田土壤碳汇形成过程

Fig. 1 Formation process of soil carbon sink in paddy field

矿化过程通过植物残体或根际沉积碳逐级分解由微生物分解代谢;腐殖化过程通过生物量周转由微生物合成代谢。SOC 转化由 3 个基本要素构成:一是土壤有机物碳输入;二是有机碳各组分分解和矿化;三是有机碳各组分在分解过程中相互转化。这三要素相互作用决定 SOC 累积水平^[33]。此外,土壤微生物是推动 SOC 分解、转化的动力,其自身周转也是 SOC 转化的重要方面。

3 稻田土壤有机碳汇影响因素

3.1 自然因素

3.1.1 气候 稻田 SOC 受多种环境因素的制约,气候变化已经成为最主要、最强大的营力。气象记录数据表明,气温升高及降水波动成为气候变化的主要特征。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告指出,1880—2012 年全球平均地面气温升高了 0.85℃,21 世纪末全球平均地面温度可能升高超过 1.5℃^[34]。温度升高促进土壤呼吸,加速有机碳分解,导致全球尺度上土壤碳库减少,释放更多的 CO₂ 和 CH₄ 等温室气体,进而加剧全球变暖^[35]。此外,温度在很大程度上影响微生物活性,微生物分子具有较高温度敏感性,温度过高或过低均会抑制有机碳分解。

水分影响水稻生长从而决定 SOC 输入,潮湿条件更利于 SOC 累积^[36]。土壤水分充足导致土壤通气性较差,水稻土呼吸作用减弱,SOC 分解与外源有机碳降解受抑制,有利于 SOC 储存。大量研究表明,SOC 在低温、潮湿土壤中储量较高,在温暖、潮湿土壤中储量适中,在高温、干燥区域储量较低^[37]。这进一步说明温度和水分共同影响稻田 SOC 固碳潜力。此外,温度、水分等环境因子影响稻田种植水稻品种,不同水稻品种的凋落物及根系分泌物种类不同,导致进入土壤的有机质状况存在差异。

3.1.2 土壤理化性质 SOC 矿化与土壤理化性质有关,土壤 pH、粒径、团聚体结构、容重及地形地貌等都会影响有机碳在土壤中的累积^[38]。土壤 pH 影响土壤微生物多样性和活性进而影响有机碳矿化,土壤 pH 越低,土壤矿化速度越快,SOC 含量越低^[39]。土壤粒径是影响 SOC 储存的重要指标,黏粒 SOC 储量显著高于砂粒 SOC 储量,原因有以下两方面:首先,土壤黏粒颗粒较细,表面积较大,暴露更多正电荷与土壤中带负电荷腐殖质结合形成 SOC,同时黏粒孔隙度小,通透性差,微生物活性低,对 SOC 分解具有抑制作用;其次,SOC 易与土壤黏粒结合,

有机碳与土壤中无机成分结合形成有机-无机复合体,该复合体抑制 SOC 与微生物及土壤酶接触,达到保护和储存 SOC 的目的^[40]。

土壤团聚体具有稳定和保护有机碳的作用。团聚体粒径不同储存有机碳能力也不同,土壤在耕作过程中大团聚体不断破碎成微团聚体,有机碳向微团聚体富集,导致微团聚体碳储量显著高于大团聚体^[40]。研究发现,SOC 稳定性除与土壤团聚体有关外,还和土壤中铝氧化物等含量有关。土壤容重作为土壤物理性质的重要指标,反映土壤的通气透水性及孔隙度,能调节土壤中空气和水分运动,从而影响 SOC 含量^[41]。地形可直接或间接影响 SOC 含量。坡度越陡流水侵蚀越强,土壤中有有机质越容易流失,直接导致 SOC 含量降低;陡坡区域土壤浅薄,水分条件差,不利于水稻生长,凋落物向土壤输入量随之减少,间接降低 SOC 含量^[42]。

3.2 人为因素

稻田生态系统是受人类影响和调控的复合系统,相比自然因素对稻田碳汇的影响,人为管理措施对稻田碳汇影响更大。人为因素主要包括种植模式和田间管理。

3.2.1 种植模式 农作物种植模式是调控稻田 SOC 循环和累积的重要因素。冬种、冬闲、水旱轮作、双季稻种植模式下由于根系残留、秸秆种类与土壤理化性质等均不相同,输入土壤中的有机质数量和质量以及有机碳矿化过程存在差异,导致 SOC 含量发生显著变化^[43]。合理有效的种植模式对提高作物产量和 SOC 累积具有重要作用^[44]。中国南方稻区气候适宜,有利于冬季作物种植,但南方稻区一般只进行单季稻或双季稻生产,稻田在冬季多处于休闲状态。目前,我国南方稻区约有 9.3×10^6 hm² 的冬闲田可充分利用^[45]。冬季作物利用冬闲季的温光资源积累有机物,然后随冬季作物秸秆还田进入土壤增加有机碳来源,因此冬季种植与冬闲相比,在一定程度上能提高稻田 SOC 含量^[46]。据统计,冬闲田种植冬作物秸秆还田后可使早晚稻产量平均增加 20.9% ~ 73.4%,且稻田冬种绿肥有利于改善水稻产量构成要素,进而提高水稻产量^[47]。

稻田水旱轮作较双季稻种植 SOC 含量偏高。不同轮作模式通过影响作物根系或残体回归数量和质量来影响有机碳矿化和固定过程。轮作模式中不同作物残体性质和还田量不同导致 SOC 输入种类和含量增加,从而充分发挥有机碳固定能力。水旱轮作种植模式 SOC 稳定性较高,SOC 含量显著高于双季稻种

植模式,这是因为水旱轮作处理在早稻收获种植下一季旱作作物时没有翻耕,减缓了土壤有机质氧化和矿化^[48];而双季稻种植模式中晚稻移栽后需翻耕泡田,破坏了土壤团聚体结构,改变了土壤水分、温度和通气等环境条件,加速了SOC矿化分解,从而降低了SOC含量^[49]。因此,发展多样化的种植模式对增加SOC积累具有促进作用。

3.2.2 田间管理 田间管理措施,如耕作制度、秸秆还田、施肥、灌溉等均对SOC含量有直接影响,不合理耕作被认为是SOC损失的首要原因。耕作主要通过破坏土壤团聚体结构,使SOC原有物理、化学和生物化学保护机制被解除从而降低其稳定性。同时耕作增加土壤孔隙度,改善土壤透气性,从而使土壤呼吸作用增强,加速土壤有机质分解^[50]。据统计,我国由于耕作导致表层SOC损失达 (14.8 ± 15.1) Mg/(hm²·a)^[51]。目前,保护性耕作措施被认为是一种提高稻田土壤潜在碳汇的重要手段,其通过减少对土壤的扰动降低土壤有机质矿化分解而提高SOC含量。保护性耕作措施有利于SOC累积,具有碳汇效应。与传统耕作相比,免耕条件下土壤固碳量增加速率为 (0.42 ± 0.46) Mg/(hm²·a),免耕结合秸秆还田土壤固碳量增加速率为 (0.53 ± 0.45) Mg/(hm²·a),当免耕结合秸秆还田普及率达到50%时,我国农田土壤固碳潜力将达到32.5 Mg/(hm²·a)^[52]。

中国秸秆资源居世界之首,2017年粮食作物秸秆产量为5.98亿t^[53]。生产实践中,秸秆还田是提高土壤碳汇和减少化肥施用量的有效方法^[54]。与仅施化肥相比,秸秆还田配施化肥的稻田SOC增加34%~56%,SOC及其活性组分含量随秸秆还田量增加而显著增加^[55]。此外,秸秆还田可改良土壤结构,增强土壤肥力,提高作物产量,降低农业生产成本,对促进农业可持续发展具有十分重要的意义。目前关于秸秆还田对SOC影响的研究众多,李娇等^[56]对比秸秆直接还田与生物质炭还田,发现生物质炭还田后的土壤CO₂累积释放量显著低于秸秆直接还田,且土壤固碳量均高于秸秆直接还田。汤宏等^[57]认为,在秸秆还田过程中有一个适宜用量问题,高量秸秆还田处理土壤固碳量显著高于低量秸秆还田处理。总体来说,秸秆还田是增加稻田固碳的有效管理措施。

施肥不仅提高作物产量,还促进土壤对碳的固定。众多研究表明,绿肥中含有大量养分及高活性有机碳,能促进SOC转变成易被作物吸收利用的活性有机碳从而提高土壤肥力;施用有机肥能促进土壤微生物生长,增强土壤酶活性,提高土壤保水保肥能力

和SOC含量^[58]。施用化肥可促进植物生长并增加碳在根系和根际分泌物中的传递,氮肥的施用促使有机碳分解,提高土壤微生物活性^[59]。但施用化肥方式不同,碳储存差异显著,化肥的分次施入可显著降低总温室气体排放当量(以CO₂和CH₄计算)。氮磷肥料一次性施入,土壤总温室气体排放当量为CO₂-eq 10.9 g/kg;分批次施入,土壤总温室气体排放当量为CO₂-eq 中9.7 g/kg,与一次性施用相比,减少了CO₂-eq 1.2 g/kg。因此,间歇施肥是降低稻田生态系统温室气体排放,促进稻田土壤有机质积累的有效管理措施^[60]。

为确保农业获得更高产量,除适当施肥外,还需良好的水资源管理,对水稻土实施灌溉。灌溉促进水稻细根生物量和微生物生物量碳增加,灌溉条件下土层表面长期保持水分,土壤保温效果好,土层温度高,加快凋落物腐解速率,导致输入SOC含量增加;与此同时,连续浸水形成的厌氧环境限制土壤微生物活性,降低SOC分解速率^[61]。灌溉与秸秆还田、有机肥施用等碳管理技术相结合对实现稻田水碳资源可持续利用具有促进作用^[62]。因此,科学合理灌溉对我国合理利用水资源、提高农业生产力、减少碳排放具有重要意义。

总之,田间管理措施主要从增加有机碳输入(秸秆还田、施肥、灌溉)和减少有机碳输出(保护性耕作)两方面发挥稻田土壤的固碳潜力。稻田开展冬种及水旱轮作种植模式并实施保护性耕作、秸秆还田配施化肥、间歇施肥、灌溉等科学合理的田间管理是实现土壤固碳减排和农业可持续发展的重要举措。

4 总结与展望

水稻土SOC累积与稳定研究符合当前国际前沿发展,且与国家粮食安全和生态环境建设密切相关。但由于稻田生态系统的开放性、复杂性和多变性,稻田碳汇发展仍存在许多不确定性,还需进一步探讨,未来应在以下几个方面加强研究:

1)关注稻田深层土壤固碳过程。目前多数研究只关注了表层SOC的固定。深层土壤是潜在的巨大“碳汇”,深层土壤有机碳库的变化,同样会影响土壤物理性质、土壤氮素残留和养分运转等多个生态学过程。因此,关注深层SOC固定过程及影响因素对于增加深层土壤有机碳库和作物产量至关重要。

2)明确稻田SOC稳定机制。深入理解稻田SOC稳定性机制有助于控制和加强稻田土壤有机碳库的固碳潜力,改善土壤和环境质量。SOC稳定性受土壤物理性质、环境因子、微生物活动等多种因素的交互影响。未来研究应采用结构方程模型(VPA)等统计

或模型手段量化上述影响因子在有机碳合成与转化过程中的作用机制及其对土壤有机碳库的贡献情况,这可为进一步深入探讨土壤固碳的稳定机制提供新的研究思路。

3)完善稻田土壤人为措施管理,加快稻田固碳关键技术研发。长期以来中国稻田高强度耕作管理模式导致 SOC 损失严重,中国稻田有机碳汇更大的固碳潜力有待进一步挖掘。对不同稻田、不同水稻种植的施肥量、灌溉量等进行科学合理的设定,量化各类措施导致的生态系统碳汇潜力,选取适合不同区域的管理措施提高土壤碳储量。同时加快稻作生态系统固碳增汇关键技术体系(如生物质炭应用、微生物调控、秸秆移除资源化利用等)的研发,强化低碳稻作科技创新集成,构建低碳稻作技术推广体系,助力我国“双碳”目标的早日实现。

参考文献:

- [1] Pachauri R K, Meyer L A, et al. Climate change 2014: Synthesis report[M]. Switzerland: IPCC, 2015: 141(9): 28–28.
- [2] 中华人民共和国 2021 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. 国家统计局. [2022–2–28]. http://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/zxfb2020/202202/t0220228_1827971.html.
- [3] 唐海明, 李超, 肖小平, 等. 不同耕作模式对双季稻田生态系统净碳汇效应及收益的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(2): 215–222.
- [4] Liu Y L, Ge T D, van Groenigen K J, et al. Rice paddy soils are a quantitatively important carbon store according to a global synthesis[J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2(1): 1–9.
- [5] Kögel-Knabner I, Amelung W, Cao Z H, et al. Biogeochemistry of paddy soils[J]. *Geoderma*, 2010, 157(1/2): 1–14.
- [6] Pan G X, Li L Q, Wu L S, et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(1): 79–92.
- [7] Luo Z K, Feng W T, Luo Y Q, et al. Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(10): 4430–4439.
- [8] 韩晓日, 苏俊峰, 谢芳, 等. 长期施肥对棕壤有机碳及各组分的影响[J]. *土壤通报*, 2008, 39(4): 730–733.
- [9] Kögel-Knabner I, Rumpel C. Advances in molecular approaches for understanding soil organic matter composition, origin, and turnover: A historical overview[J]. *Advances in Agronomy*, 2018, 149: 1–48.
- [10] Cotrufo M F, Wallenstein M D, Boot C M, et al. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter?[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(4): 988–995.
- [11] Wang B R, An S S, Liang C, et al. Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 162: 108422.
- [12] Liu M Y, Liu M M, Li P, et al. Variations in soil organic carbon decompositions of different land use patterns on the tableland of Loess Plateau[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(4): 4337–4352.
- [13] 丁雪丽, 韩晓增, 乔云发, 等. 农田土壤有机碳固存的主要影响因子及其稳定机制[J]. *土壤通报*, 2012, 43(3): 737–744.
- [14] 尤锦伟, 王俊, 胡红青, 等. 秸秆还田对再生稻田土壤有机碳组分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(8): 1451–1458.
- [15] 陈小云, 郭菊花, 刘满强, 等. 施肥对红壤性水稻土有机碳活性和难降解性组分的影响[J]. *土壤学报*, 2011, 48(1): 125–131.
- [16] 丁洁, 杨士红, 金元林, 等. 秸秆还田对节水灌溉稻田土壤有机碳及其组分的影响[J]. *节水灌溉*, 2019(9): 14–18.
- [17] 李冬初, 黄晶, 马常宝, 等. 中国稻田土壤有机质时空变化及其驱动因素[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(12): 2410–2422.
- [18] 孙中林, 吴金水, 葛体达, 等. 土壤质地和水分对水稻土有机碳矿化的影响[J]. *环境科学*, 2009, 30(1): 214–220.
- [19] 张彦军, 郭胜利. 环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(3): 1446–1456.
- [20] Wang Y, Huang L M, Jia X X, et al. Distribution characteristics and controls of soil organic carbon at different spatial scales in China's Loess Plateau[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 293: 112943.
- [21] 向慧敏, 温达志, 张玲玲, 等. 鼎湖山森林土壤活性碳及惰性碳沿海拔梯度的变化[J]. *生态学报*, 2015, 35(18): 6089–6099.
- [22] 董玉清, 官鹏, 卢瑛, 等. 猫儿山不同海拔土壤有机碳组分构成及含量特征[J]. *土壤通报*, 2020, 51(5): 1142–1151.
- [23] 王平, 李凤民, 刘淑英. 长期施肥对土壤生物活性有机碳库的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 224–228.
- [24] Chen S, Xu C M, Yan J X, et al. The influence of the type of crop residue on soil organic carbon fractions: An 11-year field study of rice-based cropping systems in southeast China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 223: 261–269.
- [25] Wang W, Lai D Y F, Wang C, et al. Effects of rice straw incorporation on active soil organic carbon pools in a subtropical paddy field[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 152: 8–16.
- [26] Jha P, De A, Lakaria B L, et al. Soil carbon pools, mineralization and fluxes associated with land use change in vertisols of central India[J]. *National Academy Science Letters*, 2012, 35(6): 475–483.
- [27] 王玺洋, 于东升, 廖丹, 等. 长三角典型水稻土有机碳组分构成及其主控因子[J]. *生态学报*, 2016, 36(15): 4729–4738.
- [28] Wiesmeier M, Schad P, von Lütow M, et al. Quantification of functional soil organic carbon pools for major soil units and land uses in southeast Germany (Bavaria)[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 185: 208–220.
- [29] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 中国及全球陆地生态系统

- 碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J]. 中国科学: 生命科学, 2022, 52(4): 534–574.
- [30] 祝贞科, 肖谋良, 魏亮, 等. 稻田土壤固碳关键过程的生物地球化学机制及其碳中和对策[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4): 592–602.
- [31] 徐英德. 基于保护性农业的土壤固碳过程研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4): 658–670.
- [32] 王健波, 张燕卿, 严昌荣, 等. 干湿交替条件下土壤有机碳转化及影响机制研究进展[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 998–1004.
- [33] 张维理, KOLBE H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. 中国农业科学, 2020, 53(2): 317–331.
- [34] Change Intergovernmental Panel on Climate. Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [35] 苏宏新, 李广起. 模拟蒙古栎林生态系统碳收支对非对称性升温的响应[J]. 科学通报, 2012, 57(17): 1544–1552.
- [36] Koven C D, Hugelius G, Lawrence D M, et al. Higher climatological temperature sensitivity of soil carbon in cold than warm climates[J]. Nature Climate Change, 2017, 7(11): 817–822.
- [37] Wiesmeier M, Urbanski L, Hobbey E, et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales[J]. Geoderma, 2019, 333: 149–162.
- [38] Wiesmeier M, Hübner R, Barthold F, et al. Amount, distribution and driving factors of soil organic carbon and nitrogen in cropland and grassland soils of southeast Germany (Bavaria)[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 176: 39–52.
- [39] Qian J, Liu J J, Wang P F, et al. Riparian soil physicochemical properties and correlation with soil organic carbon of an inflowing river of Taihu Lake[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 59: 012053.
- [40] 唐贤, 黄伟濠, 卢瑛, 等. 广东省赤红壤区土壤团聚体有机碳和铁氧化物特征及稳定性[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 200–209.
- [41] 林成芳, 郭剑芬, 陈光水, 等. 森林细根分解研究进展[J]. 生态学杂志, 2008, 27(6): 1029–1036.
- [42] Doetterl S, Berhe A A, Nadeu E, et al. Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 154: 102–122.
- [43] Zeng Y H, Wu J F, He H, et al. Soil carbon pool management index under different straw retention regimes[J]. Agricultural Science & Technology, 2012, 13(4): 818–822.
- [44] 唐海明, 程凯凯, 肖小平, 等. 不同冬季覆盖作物对双季稻田土壤有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 465–473.
- [45] 张珺潼, 曹卫东, 徐昌旭, 等. 种植利用紫云英对稻田土壤微生物及酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(1): 19–25.
- [46] 肖小平, 唐海明, 聂泽民, 等. 冬季覆盖作物残茬还田对双季稻田土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(10): 1202–1208.
- [47] 杨滨娟, 黄国勤, 王超, 等. 稻田冬种绿肥对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(10): 1209–1216.
- [48] 袁嘉欣, 杨滨娟, 胡启良, 等. 长江中游稻田种植模式对土壤有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(7): 1205–1214.
- [49] 彭华, 纪雄辉, 吴家梅, 等. 不同稻草还田模式下双季稻土壤有机碳及碳库管理指数研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(4): 563–568.
- [50] 曹丽花, 刘合满, 杨东升. 农田土壤固碳潜力的影响因素及其调控[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(10): 16–20.
- [51] Song G H, Li L Q, Pan G X, et al. Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation[J]. Biogeochemistry, 2005, 74(1): 47–62.
- [52] Yan H M, Cao M K, Liu J Y, et al. Potential and sustainability for carbon sequestration with improved soil management in agricultural soils of China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2007, 121(4): 325–335.
- [53] Li H, Cao Y, Wang X M, et al. Evaluation on the production of food crop straw in China from 2006 to 2014[J]. BioEnergy Research, 2017, 10(3): 949–957.
- [54] Lehtinen T, Schlatter N, Baumgarten A, et al. Effect of crop residue incorporation on soil organic carbon and greenhouse gas emissions in European agricultural soils[J]. Soil Use and Management, 2014, 30(4): 524–538.
- [55] Zhang M, Cheng G, Feng H, et al. Effects of straw and biochar amendments on aggregate stability, soil organic carbon, and enzyme activities in the Loess Plateau, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(11): 10108–10120.
- [56] 李娇, 田冬, 黄容, 等. 秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(9): 4338–4347.
- [57] 汤宏, 曾掌权, 沈健林, 等. 秸秆与水分管理稻田的温室气体排放和碳固定[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(1): 41–48.
- [58] Tong C L, Xiao H A, Tang G Y, et al. Long-term fertilizer effects on organic carbon and total nitrogen and coupling relationships of C and N in paddy soils in subtropical China[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 106(1): 8–14.
- [59] 杨馨逸, 刘小虎, 韩晓日, 等. 不同品种小麦下土壤微生物量和可溶性有机物对不同施氮量的响应[J]. 中国农业科学, 2016, 49(7): 1315–1324.
- [60] Wang D D, Zhu Z K, Shahbza M, et al. Split N and P addition decreases straw mineralization and the priming effect of a paddy soil: a 100-day incubation experiment[J]. Biology and Fertility of Soils, 2019, 55: 701–712.
- [61] Liu S L, Huang D Y, Chen A L, et al. Differential responses of crop yields and soil organic carbon stock to fertilization and rice straw incorporation in three cropping systems in the subtropics[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 184: 51–58.
- [62] 马晨蕾, 裴自伟, 李伏生. 灌溉方式及施氮对双季稻田甲烷排放及有机碳组分的影响[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(5): 41–49.