王秀君,卢同平,徐明岗.黄土肥力提升与土壤无机碳固存互作对土壤健康的调控:机遇和挑战[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(5):1-8.
Wang X J, Lu T P, Xu M G.Synergistic regulation of soil health via loess fertility enhancement and inorganic carbon sequestration: prospects and challenges[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(5):1-8.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202507040

黄土肥力提升与土壤无机碳固存互作对土壤健康的调控:机遇和挑战

王秀君[1,2],卢同平[3,4],徐明岗[1,2]

(1.山西农业大学 生态环境产业技术研究院/土壤健康山西省实验室,山西 太原,030031;2.山西农业大学 资源环境学院,山西 晋中,030801;3.中国科学院 新疆生态与地理研究所,干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室,新疆 乌鲁木齐,830011;4.中国科学院 新疆阜康荒漠生态系统国家野外科学观测研究站,新疆 阜康,831599)

摘　要:土壤有机碳(SOC)与无机碳(SIC)是陆地生态系统的2个重要碳库,其互作机制对维持碳平衡、调控土壤健康与农业可持续发展有着极其重要的意义。近年来,有关SOC-SIC之间协同关系的研究越来越多,显示其在增强团聚体稳定性、改善水肥保持能力、提升微生物活性及碳固存效率等方面均具有潜在的作用。虽然目前在研究SOC、SIC动态变化及其对农田管理措施的响应方面已取得一定进展,但对解析SOC-SIC的互作及其区域差异性仍面临理论框架不完善与实践路径不清晰等挑战。本文系统阐述了SOC-SIC互作的主要路径与调控机制,重点分析了施肥制度、耕作方式、秸秆还田等农业管理措施对SOC-SIC协同效应的影响机理,结合黄土高原等典型区域的研究进展,对其提升生态脆弱区土壤健康的应用潜力进行了探讨。本文认为未来亟须加强多学科交叉融合,构建涵盖物理、化学、生物过程的SOC-SIC耦合模型,发展区域差异化的碳协同调控技术体系,为实现农业可持续发展与土壤健康目标提供更为精准的科学依据。

关键词:土壤有机碳; 土壤无机碳; 有机—无机协同; 黄土农田; 土壤健康
中图分类号:S-1;S158　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)05-0001-08

Synergistic regulation of soil health via loess fertility enhancement and inorganic carbon sequestration: prospects and challenges

Wang Xiujun[1,2], Lu Tongping[3,4], Xu Minggang[1,2]

(*1.Soil Health Laboratory in Shanxi Province, Institute of Eco-environment and Industrial Technology, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China; 2.College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China; 3.State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Ecosystem Security and Sustainable Development in Arid Regions, Urumqi 830011, China; 4.Fukang Station of Desert Ecology, Chinese Academy of Sciences, Fukang 831505, China*)

Abstract: Soil organic carbon (SOC) and inorganic carbon (SIC), as two key carbon pools, play critical roles in maintaining carbon balance, regulating soil health, and promoting agricultural sustainability through their interactive mechanisms. In recent years, increasing research has focused on the synergistic relationships between SOC and SIC, demonstrating their potential roles in enhancing aggregate stability, improving water and nutrient retention, boosting microbial activity, and increasing carbon sequestration potential. Although certain progress has been made in understanding the dynamics of SOC and SIC and their responses to farmland management practices, challenges remain due to incomplete theoretical frameworks and unclear practical

收稿日期:2025-07-20　　**修回日期**:2025-09-28
基金项目:国家自然科学基金项目(42301051,42177341);山西省科技重大专项计划揭榜挂帅项目课题(202201140601028-1)
作者简介:王秀君(ORCID: 0000-0002-2859-8011),教授,博士生导师,获澳大利亚墨尔本大学、塔斯马尼亚大学双博士学位,研究方向:碳循环。E-mail: xjwang@sxau.edu.cn

pathways for elucidating SOC-SIC interactions and their regional variability. This paper systematically elaborates on the main pathways and regulatory mechanisms of SOC - SIC interactions, with a focus on the impacts of agricultural management practices such as fertilization regimes, tillage practices, and straw return on the synergistic effects of SOC and SIC. Incorporating research progress from typical regions like the Loess Plateau, the paper explores their application potential in enhancing soil health in ecologically fragile areas. There is an urgent need to strengthen multidisciplinary integration, develop coupled SOC-SIC models encompassing physical, chemical, and biological processes, and establish regionally differentiated technical systems for synergistic carbon regulation. These efforts will provide more precise scientific foundations for achieving agricultural sustainability and soil health goals.

Keywords: Soil organic carbon, Soil inorganic carbon, Synergistic relationships, Loess agricultural land, Soil Health

土壤健康涵盖土壤物理结构、化学属性、生物活性与生态功能等多项关键要素,是农业可持续发展的基础保障。这些要素之间相互作用,深刻影响着作物生产力、养分循环效率及生态系统稳定性[1]。作为土壤肥力的核心组成,土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)通过促成团聚体结构[2],增强微生物活性与抑制养分流失,能够有效提升耕层土壤的养分供给力与环境适应性[3]。在干旱与半干旱区域,尤其是黄土高原,受限于特殊的地质构造与气候背景,土壤普遍存在结构松散、有机质贫乏、水肥保持能力低下及微生物活性受抑等问题[4],严重制约了区域土壤健康水平的提升,成为区域农业可持续发展的关键难题。但由于作物产量偏低、有机碳源输入有限及水土流失严重,SOC积累缓慢且稳定性较差,黄土高原的土壤健康状况也难以在短期内得到显著的改善。尽管诸多不利因素导致土壤退化,但黄土高原土体中富集的土壤无机碳(Soil Inorganic Carbon, SIC)[5],为提升土壤质量提供了潜在的突破口。在此背景下,科学调控土壤碳库结构,尤其是碳形态间的互作机制,可能成为改善土壤质量与增强生态系统服务能力的关键路径。

目前,诸如有机肥施用、秸秆还田及免耕等措施已被广泛应用于提高SOC水平[2,6]。同时,作为干旱区一个可调控的"潜在碳库",SIC也逐渐受到了关注[7-8]。SIC不仅具有较高的稳定性和固碳潜力,其累积过程与SOC之间还存在着紧密关联[9]。研究表明,SIC的沉积有助于SOC与矿物颗粒结合形成稳定的有机-无机复合体,从而改善土壤团聚结构,增强SOC的物理保护效应[10-11],提升土壤的水稳性及抗侵蚀能力。这种有机碳与无机碳的协同机制,为突破以有机碳输入为核心的传统,创新土壤培肥策略,提供了新的理论依据与技术路径,在SIC资源丰富的黄土区,具备实践基础与扩展潜力。

基于上述背景,本文围绕"碳互作—结构重塑—健康提升"的核心链条,以SOC-SIC关系及其对环境因素的响应为主题,深入剖析SIC的形成机制及其与SOC之间的相互作用机理,系统梳理SOC与SIC互作过程对黄土区土壤健康的调控机制。这对于提升黄土区土壤功能、拓展土壤健康管理的新范式,以及支撑国家生态安全与可持续发展战略具有重要意义。

1 干旱、半干旱地区农田土壤有机碳与无机碳的关系

在干旱与半干旱地区,由于干旱气候条件、植被覆盖稀疏以及有机质输入相对有限等因素的综合作用,SOC储量普遍低于湿润地区。通常情况下,上述区域的SIC含量高于SOC。以中国北方典型干旱区为例,SIC密度可达SOC的2~10倍[12-13]。从垂直分布来看,SOC主要集中在表层0~30 cm的土壤中,SIC则多沉积于30 cm以下的中深层土壤中[5,14]。研究显示,在干旱梯度变化过程中,SOC与SIC呈现出"互补型"的响应模式:随着干旱程度的加剧,SOC含量逐渐减少,而SIC含量则显著增加,这种变化在一定程度上维持了土壤总碳库的相对稳定(图1)。

近十年来,国内关于SIC与SOC关系的研究逐渐增多。研究表明,在中国北方不同的土地利用类型中,SIC与SOC普遍呈现出显著的正相关关系[7,15-16]。就农田生态系统而言,SIC与SOC之间的关系并非完全一致。在华北平原农田土壤中,SIC与SOC多呈现正相关关系[17-18],这反映出农田耕作和培肥措施对这2类碳库具有协同驱动作用。在黄土高原农田中,SIC与SOC之间的关系则较为复杂,在不同空间尺度和地理单元中,可

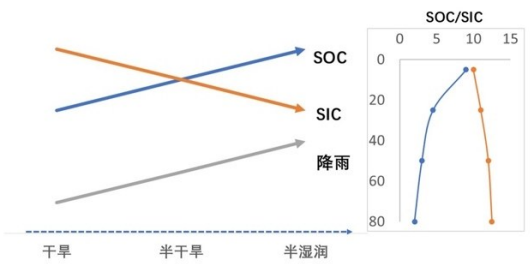

图1　土壤无机碳(SIC)、有机碳(SOC)在气候带及垂直分布上的关系

Fig.1　The relationship between soil inorganic carbon (SIC) and organic carbon (SOC) across climatic zone and vertical profile

能呈现正相关、负相关或无显著相关性[19-20]。例如,Lu等[19]在黄土高原东部开展的研究发现,SOC与SIC的相关性具有显著的空间异质性:两者在临汾盆地呈显著负相关,但在相邻的运城盆地则无显著关系。墨美玲等[21]进一步研究指出,在华北平原,SIC储量与SOC的耦合关系主要受到施肥、灌溉等农田管理措施的调节;而在黄土高原,二者的关系更多归因于地形地貌特征及其与之相关的土壤侵蚀—再沉积过程引起的SOC、SIC在空间上的再分配。

综上,干旱与半干旱地区农田土壤中SOC与SIC的空间分布格局及其耦合关系呈现出明显的区域差异性,这种差异受到气候条件、水文过程以及施肥灌溉等农田管理措施的多重影响。因此,SOC与SIC之间的关系不仅仅表现为统计上的相关性,更透射出其相互影响的复杂生物地球化学过程及其耦合机制。因此,深入研究SOC与SIC之间的动态互作机制,对于科学评估区域碳汇潜力、优化碳管理策略以及提升黄土高原土壤健康水平具有重要理论价值。

2　SOC—SIC互作过程及农田土壤影响机制

在土壤碳循环体系中,SOC与SIC之间并非独立存在,二者之间存在着复杂且紧密的互作与耦合关系,这种关系深刻影响着土壤碳库的动态变化以及农田生态系统的功能。

2.1　SOC对SIC的影响

SOC的分解过程及微生物代谢活动直接影响土壤中碳酸-重碳酸-二氧化碳缓冲体系的化学平衡,进而调控碳酸盐的沉淀—溶解动态。其核心反应过程如下:

$$2CO_2 + 2H_2O \leftrightarrow 2HCO_3^- + 2H^+ \quad (1)$$

$$Ca^{2+} + 2HCO_3^- \leftrightarrow CaCO_3 + H_2O + CO_2 \quad (2)$$

在SOC分解过程中,会释放出CO_2。一方面,CO_2进入土壤溶液后,会促进重碳酸根(HCO_3^-)的生成,为碳酸盐沉淀提供了必要的碳源。当土壤中具备足够的Ca^{2+}、Mg^{2+}时,会与HCO_3^-结合形成碳酸盐沉淀(图2),从而增加SIC的含量[21]。另一方面,高浓度的CO_2可能会引发土壤局部的酸化现象,促进已有碳酸盐的水解,导致SIC水平的降低[22]。碳酸盐的沉淀—溶解平衡受到多种因素的调控。其中土壤pH是关键变量之一:较低的pH值会引起碳酸盐的溶解,而较高的pH值则促进碳酸盐的沉淀。水分状况对碳酸盐的迁移和沉淀也有重要影响:湿润的环境有利于SIC水解及离子扩散,而干旱条件有利于碳酸盐的沉淀积累[9]。

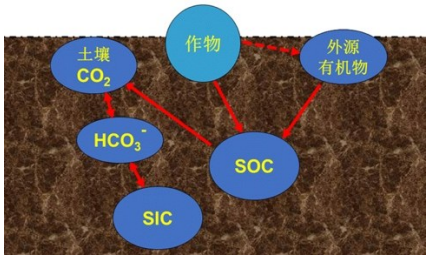

图2　土壤有机碳(SOC)的分解与土壤中无机碳(SIC)的化学平衡示意图

Fig.2　A conceptual diagram of the coupled processes between the decomposition of soil organic carbon (SOC) and chemical equilibrium of soil inorganic carbon (SIC)

2.2　SIC对SOC的影响

已有研究表明,土壤中高水平的钙离子(Ca^{2+})有利于SOC累积[23-25],说明土壤中钙的存在对SOC的固存及稳定性有积极影响。在自然条件下,土壤中SIC主要以碳酸钙或者碳酸镁形式存在。多项在不同区域和土壤类型中的研究证实,碳酸钙等SIC或者钙镁离子的存在能够促进土壤团聚体的形成与稳定性,从而为SOC提供物理保护屏障[26]。这种保护作用可能通过以下路径实

现:(1)SIC可在土壤中充当胶结物质,将细小颗粒粘结为稳定的团聚体结构,减少SOC与微生物或酶的直接接触,降低其矿化速率,提高其在土壤中的滞留时间与稳定性[27-28];(2)Ca^{2+}可以通过阳离子桥联作用增强有机质与矿物颗粒之间的结合,形成稳定的"有机质-阳离子-矿物"复合体,从而将有机质固定于矿物表面[29],显著延缓其矿化进程,并减少其因淋溶或氧化而造成的损失。

在黄土及其衍生土中,SIC对SOC稳定性的调控机制表现得尤为显著。研究发现,黄土剖面中广泛存在的碳酸钙可通过"包裹-桥接"作用,促进土壤团聚体的形成,并增强其稳定性(图3),从而提升SOC的物理保护程度,其结果不但能够有效抑制微生物对SOC的分解,还能降低风蚀、水蚀对土壤有机质的破坏/溶解及淋失[30]。Chi等[31]通过扫描电镜与孔隙结构分析发现,碳酸盐富集区域的土体通常具有较强的颗粒结合性与较低的孔隙度,这种微结构有助于抑制微生物对有机质的接触与分解,从而减缓SOC的矿化速率。因此,无论在典型石灰性土壤还是黄土区,SIC均可以通过增强团聚体稳定性与调节微环境条件,为SOC提供物理、化学保护。

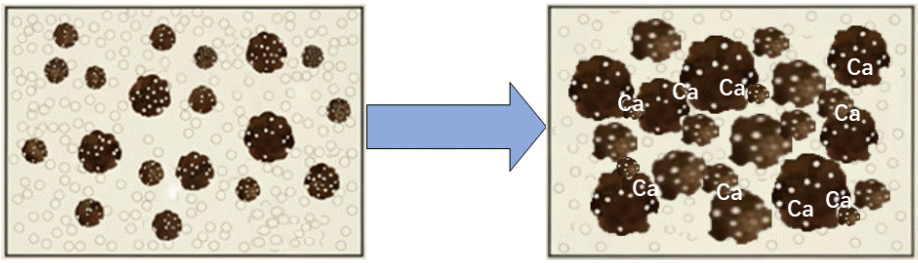

图3 土壤无机碳(SIC)或钙离子对土壤团聚体形成的作用

Fig.3 Effects of soil inorganic carbon (SIC) or calcium on soil aggregate formation

2.3 农田生态系统中SOC—SIC互作对农业管理措施的响应

在农田生态系统中,SOC-SIC的互作路径受到农业管理措施的影响。施肥措施、耕作/轮作制度、灌溉方式与水质等不但直接影响碳源输入,还直接、间接影响碳酸盐的累积-转化平衡过程[32-33]。西北干旱地区的研究显示,随着农作年限的增加,0~40 cm土层中的SIC含量有所下降,但较深土层中的SIC含量却有所增加[33]。Bughio等[34]在华北平原的研究发现,富含Ca^{2+}的灌溉水为碳酸盐沉淀提供阳离子来源,同时由于灌溉水下渗,促进了中下土层中SIC的沉淀/积累,改变了SOC-SIC在土壤垂直方向上的关系。Wang等[33]在长期定位试验中发现,通过免耕与秸秆还田措施减少土壤扰动、增强团聚体结构及根系碳输入,显著提高了颗粒有机碳含量,并促进O-烷基C与芳香C等功能团的积累。这种"碳输入-封闭-转化"过程的协同增强,有助于提升SOC稳定性,同时维持SIC的转化平衡,从而优化SOC-SIC的耦合关系。

近期研究表明,长期施用氮肥可引发局地土壤酸化,导致根层SIC的溶解和流失[35-36]。比如,Song等[36]报道,自20世纪80年代以来,由于长期施用化肥引起的酸化作用,我国农田土壤0~30 cm土层SIC含量平均下降近30%。而SIC的下降可能削弱其对SOC的物理保护作用,降低根层SOC的稳定性[27]。相比之下,有机肥与化肥配施可增强土壤缓冲能力并提供Ca^{2+},在提升SOC水平的同时,有助于维持SIC含量,实现有机碳-无机碳的协同固存[32]。SIC的成矿过程能够改善土壤的理化性状,提高土壤结构的稳定性[37-39],为长期固存SOC提供有利条件。前期研究显示,在我国北方中低肥力农田土壤中,长期配施有机、无机肥显著提高了SOC及SIC水平[7],持续投入外源有机碳不仅提升了SOC水平,也在一定程度上增加了SIC的储量[40-41]。基于我国北方3个长期定位试验结果的分析发现,氮磷钾平衡施肥下SOC和SIC的累积速率分别达到21和101 $gC/m^2/y$,而氮磷钾-有机肥配施使得SOC、SIC累积速率提高到94、145 $gC/m^2/y$[40]。这些研究证实了合理农田管理措施下有机碳与无机碳具有协同固存的作用

机制。

3　SOC－SIC协同对土壤健康的影响

土壤健康是农田生态系统维持生产力、实现环境调节与推动可持续发展的核心基础。近年来,越来越多研究表明,SOC与SIC之间的协同关系在维持和提升这些土壤质量及生态功能方面发挥着一定的作用。在土壤结构层面,SOC与SIC的相互作用有助于增强团聚体的稳定性[27]。SOC/SOM的环状结构,具有胶粘和吸附能力,是土壤微团聚体形成的基础物质;SIC则通过碳酸钙等矿物组分的"包裹-桥接"效应,促进土壤'骨架'结构及有机-无机复合团聚体的形成。这种结构不仅提升了土壤抵御物理扰动的能力,还能对SOC形成有效的物理屏障,阻碍微生物直接作用,从而延缓其分解与流失[42-43]。

在水分保持与养分供给方面,SOC-SIC协同机制也展现出多维功能。一方面,稳定的团聚结构优化了土壤孔隙性,提高水分渗透与保水能力;另一方面,SIC释放的Ca^{2+}、Mg^{2+}等碱性阳离子有助于提升土壤的阳离子交换容量(CEC),增强养分的保存与缓释能力。同时,SOC与SIC共同作用于土壤pH调节过程,增强其缓冲性能,有效减缓酸化趋势,为稳定土壤碳及提升微生物活性提供适宜的环境。此外,SOC-SIC的协同效应在调节土壤生物群落方面亦具有显著影响。持续稳定的碳源输入,加之微团聚体构建所带来的微环境改善,有助于维持微生物群落结构的稳定与功能的多样性。Lopes等[44]指出,在SIC含量较高的土壤中,微生物群落结构更为稳定,代谢胁迫响应更弱,表明SIC具有潜在的生物生境调节功能。

在黄土高原地区,SOC-SIC的协同对土壤健康的有利影响尤为显著。由于区域内水土流失问题长期存在,该区域土壤表层SOC水平难以提升[21],严重影响土壤质量、微生物功能及生态服务功能。但由于该区域土壤母质中富含SIC,可增强土壤团聚体胶结能力,提升坡地土体结构的稳定性与抗侵蚀能力[45],从一定程度上减弱了水土流失对SOC的不利影响。因此,在典型黄土区,不仅需要探寻如何提升SOC的途径,也需要关注SIC的动态变化;SOC及SIC均为稳定土壤结构的关键因子,是促进团聚体形成与功能发挥的重要协同力量,其互作机制对提升黄土高原农田土壤健康具有重要作用。

4　SOC－SIC互作过程中的机遇与挑战

随着全球气候变化背景下农业碳管理需求的提高,深入解析SOC与SIC之间的互作机制,已成为提升土壤碳汇功能与健康水平的重要突破口。SOC-SIC协同不仅有助于增强土壤结构稳定性、提升碳固存能力,还可能在调控土壤酸碱平衡、优化微生物生境等方面发挥复合效应[46],是实现农田生态系统可持续发展的关键机制之一。

在农业绿色发展背景下,秸秆还田、有机肥替代、保护性耕作及合理灌溉等管理措施的推广,不仅影响SOC和SIC的输入与转化过程,也对二者之间的关系产生影响[40,47]。例如,有机肥与化肥配施可增强土壤缓冲能力并提供Ca^{2+},在提升SOC水平的同时促进SIC的形成,实现SOC-SIC的协同固存;而秸秆还田不仅能够促进团聚体形成、提升SOC水平,还能为形成SIC提供碳源及钙源;免耕措施则通过减少扰动,维持土体结构的稳定,减少SOC的分解/溶解及SIC的水解。

黄土高原作为我国典型的干旱-半干旱农业生态区,具有独特的SOC-SIC互作背景,既蕴含丰富的协同调控潜力,也面临诸多机制解析与技术应用的挑战。从机遇角度看,通过因地制宜的合理施肥与灌溉措施,有望提升土壤固存SOC、SIC的能力,并改善土壤健康整体状况。例如,有机-无机配肥不仅可提升SOC水平,还能通过增强土壤缓冲能力,抑制酸化过程和碳酸盐的水解,维持SIC水平的稳定[40]。此外,保育性耕作措施如免耕与少耕,通过减少土壤扰动、增强团聚体稳定性[48-49],有效保存SOC及SIC,同时改善微环境条件,为微生物群落提供稳定栖息空间[50]。

尽管黄土高原在SOC-SIC协同调控方面具备显著潜力,但其实际应用仍面临多重挑战。首先,SOC与SIC各自的累积转化过程具有高度的空间异质性及时间滞后性[21],受土壤类型、地形地貌与农业管理措施的综合影响[19],导致其互作机制过程复杂、响应机制不明确,增加了理论建模与机制解析的难度。另一方面,现有观测数据在时空覆盖上仍显不足,在SIC的沉淀-溶解-迁移动态方面认识有限,难以准确捕捉其与SOC之间的双

向反馈关系[8,51]。此外,SOC-SIC协同调控的生态—环境效应(如温室气体排放调节、土壤酸化缓冲、生物多样性维持等)尚未被系统纳入碳循环及土壤健康管理策略中[52]。

综上所述,SOC与SIC之间存在多路径、多尺度的协同机制,在提升土壤结构、水肥调控能力与碳汇潜力方面展现出积极作用。未来研究可聚焦于以下方向:(1)微生物驱动的碳酸盐生成与稳定机制,解析微生物代谢产物在SIC形成中的作用路径;(2)构建长期定位试验平台,积累不同管理措施下SOC与SIC动态演变的时序数据;(3)融合过程模型与遥感监测技术,实现SOC-SIC互作过程的区域尺度模拟与动态评估;(4)探索SOC-SIC互作对温室气体排放、生物多样性及土壤缓冲能力的综合影响,推动其纳入农业碳管理及土壤健康多功能评价体系。

5 结论

本文系统梳理了农田生态系统中SOC与SIC之间的互作机制及其对土壤健康与农业可持续发展的多重调控作用。研究表明,SOC-SIC协同效应通过以下维度显著提升土壤功能:(1)增强团聚体结构稳定性,改善水肥保持能力;(2)优化微生物生境,促进碳—养分耦合循环;(3)提升土壤系统对侵蚀、酸化等外界扰动的生态韧性。农业管理措施,尤其是施用有机肥、秸秆还田、保护性耕作及灌溉等,可通过调节碳输入与离子供给,影响SOC-SIC的耦合关系与协同效率。就区域而言,作为典型的干旱-半干旱农业区,黄土高原母质中SIC含量丰富,其SOC受侵蚀与再沉积影响又十分显著,具备研究SOC-SIC互作的独特土壤背景及及挑战农业措施协同水平的管理基础,深入探讨研究SOC-SIC的空间协同调控对提升该地区土壤健康多功能平衡具有重要意义。

未来研究应聚焦于以下几个方面:一是构建涵盖物理、化学和生物过程的SOC-SIC耦合机制模型;二是发展适用于不同区域的碳协同调控技术体系;三是将SOC-SIC协同效应纳入农业碳达峰与碳中和战略框架中,明确其在土壤健康评价体系中的权重。通过多学科交叉融合、长期定位观测与模型构建相结合,有望实现黄土农田"肥力提升-碳固存增强-土壤健康改善"的可持续循环,为干旱区中低肥力土壤健康管理提供理论依据。

参 考 文 献

[1]Smith P, Adams J, Beerling D J, et al. Land-management options for greenhouse gas removal and their impacts on ecosystem services and the sustainable development goals[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2019, 44: 255-286.

[2]Qi J Y, Jensen J L, Christensen B T, et al. Soil structural stability following decades of straw incorporation and use of ryegrass cover crops[J]. Geoderma, 2022, 406: 115463.

[3]Wiesmeier M, Urbanski L, Hobley 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.

[4]傅伯杰,刘彦随,曹智,等. 黄土高原生态保护和高质量发展现状、问题与建议[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(8): 1110-1117.
Fu B J, Liu Y S, Cao Z, et al. Current conditions, issues, and suggestions for ecological protection and high-quality development in Loess Plateau [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(8): 1110-1117.

[5]Zhang F, Wang X J, Guo T W, et al. Soil organic and inorganic carbon in the loess profiles of Lanzhou area: implications of deep soils[J]. CATENA, 2015, 126: 68-74.

[6]Yang J J, Li A Y, Yang Y F, et al. Soil organic carbon stability under natural and anthropogenic-induced perturbations [J]. Earth-Science Reviews, 2020, 205: 103199.

[7]Wang X J, Wang J P, Xu M G, et al. Carbon accumulation in arid croplands of northwest China: pedogenic carbonate exceeding organic carbon [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 11439.

[8]Batool M, Cihacek L J, Alghamdi R S. Soil inorganic carbon formation and the sequestration of secondary carbonates in global carbon pools: a review[J]. Soil Systems, 2024, 8(1): 15.

[9]Lu T P, Wang X J, Xu M G, et al. Dynamics of pedogenic carbonate in the cropland of the North China Plain: influences of intensive cropping and salinization[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 292: 106820.

[10]Fernández-Ugalde O, Virto I, Barré P, et al. Effect of carbonates on the hierarchical model of aggregation in calcareous semi-arid Mediterranean soils [J]. Geoderma, 2011, 164(3-4): 203-214.

[11]Huang X L, Jia Z X, Guo J J, et al. Ten-year long-term organic fertilization enhances carbon sequestration and calcium-mediated stabilization of aggregate-associated organic carbon in a reclaimed Cambisol[J]. Geoderma, 2019, 355: 113880.

[12]Wu H B, Guo Z T, Gao Q, et al. Distribution of soil inorganic carbon storage and its changes due to agricultural land use activity in China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 129(4): 413-421.

[13]Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Distribution and storage of soil organic carbon in China[J]. Global Biogeochemical Cycles,

2003,17(2): 2001GB001844.

[14]Wang J P, Wang X J, Zhang J, et al. Soil organic and inorganic carbon and stable carbon isotopes in the Yanqi Basin of northwestern China[J]. European Journal of Soil Science, 2015,66(1):95-103.

[15]张旭博,李雄,徐梦,等. 不同土地利用方式下我国北方土壤有机、无机碳库的变化趋势及原因分析[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(8):1440-1450.
Zhang X B, Li X, Xu M, et al. Vertical distribution of soil organic and inorganic carbon pools in soils of northern China and their relationship under different land use types[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(8): 1440-1450.

[16]Gao Y, Dang P, Zhao Q X, et al. Effects of vegetation rehabilitation on soil organic and inorganic carbon stocks in the Mu Us Desert, northwest China[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(4): 1031-1040.

[17]Shi H J, Wang X J, Zhao Y J, et al. Relationship between soil inorganic carbon and organic carbon in the wheat-maize cropland of the North China Plain[J]. Plant and Soil, 2017, 418(1): 423-436.

[18]Zhang W X, Wang X J, Lu T P, et al. Influences of soil properties and hydrological processes on soil carbon dynamics in the cropland of North China Plain[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 295: 106886.

[19]Lu T P, Wang X J, Zhang W X. Total and dissolved soil organic and inorganic carbon and their relationships in typical loess cropland of Fengu Basin[J]. Geoscience Letters, 2020, 7(1): 17.

[20]Zhang L, Zhao W, Zhang R, et al. Profile distribution of soil organic and inorganic carbon following revegetation on the Loess Plateau, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(30): 30301-30314.

[21]Wang X J, Wang J P, Shi H J, et al. Carbon sequestration in arid lands: a mini review[M]//Carbon Cycle in the Changing Arid Land of China. Singapore: Springer Singapore, 2018: 133-141.

[22]墨美玲,王秀君,徐明岗,等. 黄土母质典型农田土壤无机碳与有机碳的关系及影响因素[J]. 土壤,2025,57(1):35-46.
Mo M L, Wang X J, Xu M G, et al. Relationship of soil inorganic and organic carbon and main regulating factors in typical loess farmlands[J]. Soils, 2025, 57(1): 35-46.

[23]O'Brien S L, Jastrow J D, Grimley D A, et al. Edaphic controls on soil organic carbon stocks in restored grasslands [J]. Geoderma, 2015, 251-252: 117-123.

[24]Whittinghill K A, Hobbie S E. Effects of pH and calcium on soil organic matter dynamics in Alaskan tundra [J]. Biogeochemistry, 2012, 111(1): 569-581.

[25]Zhang K J, Wang X J, Wu L P, et al. Impacts of salinity on the stability of soil organic carbon in the croplands of the Yellow River Delta[J]. Land Degradation & Development, 2021, 32(4): 1873-1882.

[26]Barreto M S C, Elzinga E J, Ramlogan M, et al. Calcium enhances adsorption and thermal stability of organic compounds on soil minerals[J]. Chemical Geology, 2021, 559: 119804.

[27]Rowley M C, Grand S, Verrecchia É P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon[J]. Biogeochemistry, 2018, 137(1-2): 27-49.

[28]Totsche K U, Amelung W, Gerzabek M H, et al. Microaggregates in soils[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2018, 181(1): 104-136.

[29]Clough A, Skjemstad J O. Physical and chemical protection of soil organic carbon in three agricultural soils with different contents of calcium carbonate[J]. Australian Journal of Soil Research, 2000, 38(5): 1005-1016.

[30]Meng J, Li X. Effects of carbonate on the structure and properties of loess and the corresponding mechanism: an experimental study of the Malan loess, Xi'an area, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(7): 4965-4976.

[31]Chi J L, Zhang W J, Wang L J, et al. Direct observations of the occlusion of soil organic matter within calcite[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(14): 8097-8104.

[32]Dong X L, Hao Q Y, Li G T, et al. Contrast effect of long-term fertilization on SOC and SIC stocks and distribution in different soil particle-size fractions[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(4): 1054-1063.

[33]Wang Y G, Jiang J, Niu Z R, et al. Responses of soil organic and inorganic carbon vary at different soil depths after long-term agricultural cultivation in Northwest China[J]. Land Degradation & Development, 2019, 30(10): 1229-1242.

[34]Bughio M A, Wang P L, Meng F Q, et al. Neoformation of pedogenic carbonates by irrigation and fertilization and their contribution to carbon sequestration in soil[J]. Geoderma, 2016, 262: 12-19.

[35]Raza S, Miao N, Wang P Z, et al. Dramatic loss of inorganic carbon by nitrogen-induced soil acidification in Chinese croplands[J]. Global Change Biology, 2020, 26(6): 3738-3751.

[36]Song X D, Yang F, Wu H Y, et al. Significant loss of soil inorganic carbon at the continental scale[J]. National Science Review, 2021, 9(2): nwab120.

[37]Atashgahi S, Tabarsa A, Shahryari A, et al. Effect of carbonate precipitating bacteria on strength and hydraulic characteristics of loess soil[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(9): 4749-4763.

[38]Jiang N J, Tang C S, Hata T, et al. Bio-mediated soil improvement: the way forward[J]. Soil Use and Management, 2020, 36(2): 185-188.

[39]Mujah D, Shahin M A, Cheng L. State-of-the-art review of biocementation by microbially induced calcite precipitation (MICP) for soil stabilization[J]. Geomicrobiology Journal, 2017, 34(6): 524-537.

[40]Wang X J, Xu M G, Wang J P, et al. Fertilization enhancing carbon sequestration as carbonate in arid cropland: assessments

of long-term experiments in northern China[J]. Plant and Soil,2014,380(1):89-100.

[41]Dong X L, Singh B P, Li G T, et al. Biochar increased field soil inorganic carbon content five years after application[J]. Soil and Tillage Research,2019,186:36-41.

[42]Virto I, Gartzia-Bengoetxea N, Fernández-Ugalde O. Role of organic matter and carbonates in soil aggregation estimated using laser diffractometry[J]. Pedosphere, 2011, 21(5): 566-572.

[43]Kharitonova G V, Kot F S, Krutikova V O. Carbonate and concomitant microaggregation in irrigated Mediterranean soils of Israel[J]. Irrigation Science,2020,38(4):431-447.

[44]Lopes L D, Hao J J, Schachtman D P. Alkaline soil pH affects bulk soil, rhizosphere and root endosphere microbiomes of plants growing in a Sandhills ecosystem[J]. FEMS Microbiology Ecology,2021,97(4):fiab028.

[45]Yao Y F, Tang B Z, Kong W B, et al. Soil organic and inorganic carbon distribution driven by erosion at various spatial scales on the Loess Plateau of China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2025,389:109708.

[46]Hu P L, Zhang W, Nottingham A T, et al. Lithological controls on soil aggregates and minerals regulate microbial carbon use efficiency and necromass stability[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(48): 21186-21199.

[47]Lu T P, Wang X J, Du Z L, et al. Impacts of continuous biochar application on major carbon fractions in soil profile of North China Plain's cropland: in comparison with straw incorporation[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021,315:107445.

[48]Du Z L, Han X, Wang Y Q, et al. Changes in soil organic carbon concentration, chemical composition and aggregate stability as influenced by tillage systems in the semi-arid and semi-humid area of North China[J]. Canadian Journal of Soil Science,2018,98(1):91-102.

[49]Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation:a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology and Biochemistry,2000,32(14):2099-2103.

[50]Marchuk A, Rengasamy P, McNeill A. Influence of organic matter, clay mineralogy, and pH on the effects of CROSS on soil structure is related to the *Zeta* potential of the dispersed clay[J]. Soil Research,2013,51(1):34-40.

[51]Zamanian K, Kuzyakov Y. Soil inorganic carbon: stocks, functions, losses and their consequences[C]//Rumpel C. Understanding and fostering soil carbon sequestration. London: Burleigh Dodds Science Publishing, 2022: 209-236.

[52]Naorem A, Jayaraman S, Dalal R C, et al. Soil inorganic carbon as a potential sink in carbon storage in dryland soils—a review[J]. Agriculture,2022,12(8):1256.

(编辑:马荣博)



本文作者:王秀君,获澳大利亚墨尔本大学、塔斯马尼亚大学双博士学位,美国加州大学和马里兰大学博士后,2010年马里兰大学副教授,2010-2014年入选中国科学院百人计划,2015-2023年担任北京师范大学全球变化研究院首席科学家。长期从事陆地生态系统中碳循环,曾主持3项美国NASA碳循环项目和科技部、基金委3项碳循环课题/项目,具备实地观测、同位素技术应用和模型模拟等研究技能。发表高质量SCI论文近百篇,出版专著2部,引用次数4000次以上。IPCC报告和近20个SCI期刊审稿人,多个期刊编辑/编委,现任亚洲-大洋洲地学学会(AOGS)学术战略指导委员会成员。