

外源改良物质添加下盐渍土固碳效应及保护机制

王嘉缘

浙江师范大学地理与环境科学学院, 浙江 金华

收稿日期: 2026年1月12日; 录用日期: 2026年2月7日; 发布日期: 2026年2月24日

摘要

土壤固碳(SCS)是应对气候变化的关键途径, 通过农业实践将大气中的二氧化碳转化为土壤有机碳(SOC)。然而, 土壤盐渍化对SOC的稳定与积累构成了巨大的挑战。本研究综述了外源物质添加下盐渍土的固碳效应及保护机制。研究发现, 施用秸秆、生物炭等可显著提升盐碱地的SOC含量, 而生物有机肥和微生物肥料的添加则通过改善土壤结构和微生物活性, 增强了土壤的固碳能力。此外, 本综述还探讨了土壤有机碳的物理保护、矿物保护和微生物保护三种主要保护机制, 以及环境因子的驱动机制。最后强调了改良剂添加在降低盐渍化土壤盐度、提高有机碳含量中的作用以及温度等环境因素对微生物固碳活性的影响。

关键词

土壤固碳, 盐渍土, 微生物固碳, 有机碳

Carbon Sequestration Effects and Protective Mechanisms of Saline Soil under the Addition of Exogenous Amendment Materials

Jiayuan Wang

School of Geography and Environmental Science, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: January 12, 2026; accepted: February 7, 2026; published: February 24, 2026

Abstract

Soil carbon sequestration (SCS) is a key approach to addressing climate change, converting atmo-

spheric carbon dioxide into soil organic carbon (SOC) through agricultural practices. However, soil salinization poses significant challenges to SOC stabilization and accumulation. This study reviews the carbon sequestration effects and protective mechanisms of saline soils under exogenous material amendments. Research findings indicate that applying straw, biochar, and similar materials can significantly increase SOC content in saline-alkali soils, while the addition of bio-organic fertilizers and microbial fertilizers enhances soil carbon sequestration capacity by improving soil structure and microbial activity. Additionally, this review explores the three primary protective mechanisms of soil organic carbon—physical protection, mineral protection, and microbial protection—as well as the driving mechanisms of environmental factors. Finally, it emphasizes the role of ameliorants in reducing soil salinity and increasing organic carbon content, as well as the impact of environmental factors such as temperature on microbial carbon sequestration activity.

Keywords

Soil Carbon Sequestration, Saline Soil, Microbial Carbon Sequestration, Organic Carbon

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球气候变化是当今世界面临的重大挑战之一，其中大气中二氧化碳(CO₂)浓度的增加是导致全球变暖的主要原因[1]。土壤作为地球上最大的陆地碳库之一，通过土壤固碳(Soil Carbon Sequestration, SCS)过程在缓解气候变化中扮演着关键角色[2]。SCS通过农业实践，如施用有机肥料、秸秆还田、轮作等，将大气中的CO₂转化为土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)，从而减少大气中的温室气体含量，提高土壤的肥力与生物活性，促进农业的可持续发展[3]。尽管土壤固碳具有重要的环境和生态效益，但全球范围内的土壤盐渍化问题却对土壤有机碳的固定与维持构成了严重威胁。土壤盐渍化导致土壤有机碳(SOC)损失，损失量约3.47 t·hm²[4]。盐渍土中有机质含量低，抑制了土壤团聚体的形成和稳定，不利于碳的有效固定。因此，寻找有效的措施以增强盐渍化土壤的固碳潜力，对于应对全球气候变化和保障粮食安全具有重要意义[5]。本综述旨在探讨外源物质添加下盐渍土的固碳效应，分析不同外源物质如秸秆、生物炭、豆饼、生物有机肥和微生物肥料在提高盐渍土SOC含量和稳定性方面的潜力。此外，本综述还探讨了土壤有机碳的保护机制，包括物理保护、矿物保护和微生物保护，以及环境因子如盐分、温度和水分驱动机制。明确这些机制对于优化土壤管理实践、提高土壤固碳效率和促进农业可持续发展具有重要的理论和实践价值。

2. 外源物质添加下土壤的固碳效应

盐碱地中，在施用秸秆、秸秆生物炭和豆饼的土壤有机碳含量分别比单独施用矿物肥提高了7.6%、17.3%和12.7% [5]。生物炭的添加大大促进了盐碱地中有机碳的稳定，这归因于土壤团聚体的物理保护增强[6]。生物有机肥作为改良剂可改善盐渍土的结构，降低土壤碱化度和含盐量，提高土壤保肥性[7]。同时，生物有机肥作为一种功能菌肥料，含有多种有益微生物，可提高土壤中微生物种群和数量[8]。盐碱土中微生物肥料的添加对土壤有机碳的稳定作用随盐渍化程度而存在差异[9]。土壤微生物接种也会对盐渍化土壤团聚体产生影响，如枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*) [10]、丛植菌根真菌以及植物生长促进菌

等,且微生物接种对团聚体的促进作用随盐度的升高而降低[11]。微生物也可以改变土壤活性碳库、缓性碳库和惰性碳库所占比例[12]。例如在北亚热带长江中下游平原区典型潮土的研究中,施用生物有机肥可提高作物连作过程中土壤有机碳各组分含量,且增加了土壤惰性碳库比例[7]。另外,矿物肥也能增加土壤有机碳的含量。有学者在无机肥料对土壤微生物的长期影响的研究中得出,添加矿物施肥使土壤有机碳的含量平均提高了12.8% [13]。且施用矿质肥料使固碳效率平均提高到45.6% [14]。脱硫石膏是最常用的改良剂之一[15],在盐渍土中,脱硫石膏与秸秆联合添加,既可以促进土壤中 Na^+ 的淋失,又能增加土壤有机质含量,促进团聚体形成和稳定[16]。但也有研究持相反的观点,他们认为在传统耕作方式下,矿质肥料不足以维持较高的有机碳水平[1] [3]。

3. 外源物质添加下土壤有机碳的保护机制

土壤有机碳稳定性是指土壤避免碳丢失的能力,稳定性高的土壤不易通过矿化(气态形式的 CO_2 和 CH_4)和淋溶(液态形式的溶解性有机碳)等途径释放碳[17]。保持和提高土壤有机碳的稳定性是实现土壤固碳、减缓全球气候变化的重要途径之一。Six等(2002)提出有机碳与土壤团聚体结合固存的三种稳定机制:与微团聚体结合的物理保护型、与粉粘粒结合的化学稳定型以及与有机质本身化学成分有关的生物化学稳定型。

3.1. 物理保护机制

游离颗粒有机碳被胶结剂包裹形成团聚体,内部孔隙降低,有机碳与矿物颗粒的接触更紧密,从而降低团聚体内的有机碳分解,这就是团聚体的有机碳物理保护机制[18]。团聚体有不同级别,作用强度各异。有机碳受到各个级别团聚体物理保护的程度由大到小依次为:粘砂粒、微团聚体、大团聚体[19]。虽然大团聚体中的有机碳稳定性较低[20],但大团聚体在微团聚体的形成过程中起重要作用,因此大团聚体是微团聚体长期固碳的基础[21]。另外,有研究采用物理化学联合分组的方法表明增温情况下会降低团聚体稳定性,不利于土壤有机碳的物理保护[22]。

3.2. 矿物保护机制

越来越多的研究强调矿物结合有机碳在土壤有机碳稳定性中的关键作用[23]。低分子量有机碳自身稳定性很低,但可以通过与矿物结合,形成有机-无机复合体,具有较强的稳定性[24]。许多研究证实了这一点。例如,衡利沙等(2010)通过将不同形态的铁氧化物、铝氧化物与稳定性有机碳进行线性相关分析,所有线性关系都达到了极显著水平[25]。McConkey等(2003)对美国温带地区免耕土壤的研究结果也表明土壤有机碳增加和粘粒含量呈显著正相关[26]。

研究表明,有机碳和矿物的结合机制主要包括表面吸附和中微孔吸附。表面吸附主要通过范德瓦尔斯力、氢键、共价键、络合作用和阳离子桥5种主要方式结合[27] [28]。范德瓦尔斯力是原子或中性分子相互靠近时所产生的微弱电磁引力,是一个较为普遍的物理结合力。氢键是矿物颗粒与有机碳中正负电荷相互吸引的作用力。共价键是二者配体交换的结合过程。络合作用与阳离子桥都是通过土壤溶液中的游离金属阳离子的作用和有机碳结合在一起,前者形成络合物,后者形成稳定矿物结合有机碳[29]。值得注意的是,某个有机碳分子与矿物结合的方式并非只有一种,因为一个有机碳分子具有多个结合位点,因此可以通过多种方式与矿物结合。例如,有研究证明葡萄糖酸既可以通过氢键和共价键与矿物结合,也可以通过阳离子桥与矿物结合[28]。结合方式也会随土壤性质而发生改变。随着土壤pH的升高,有机碳和矿物的结合方式会倾向于氢键和范德华力[30]。另外,五种结合方式会在矿物表面形成多种矿物结合有机碳,形成复层结构[31]。

中微孔吸附的原理是当矿物表面的孔隙小于 50 nm 时阻断微生物对有机碳的分解[32]-[34]。Vidal (2020)等人通过量化的生物地球化学分析和微观尺度的元素及同位素信息(使用 NanoSIMS 分析),研究了有机改良剂对根际土壤中碳转移的影响[35]。结果显示,使用蒙脱石作为添加剂能减轻未成熟有机物料料的负面影响,显著增加植物生物量,并促进根源碳在根际土壤中的释放,为微生物提供丰富的能量来源,可能在长期内增强土壤碳储存。Niu (2023)等人使用 Nano-SIMS 分析等方法,揭示了在稻田土壤湿润和干燥的交替周期中,铁(水)氧化物吸附相对较小可溶的有机分子,促进催化氧化和聚合,从而加速较大有机分子的形成[36]。这些过程对于矿物相关土壤有机碳的形成和碳固定在稻田土壤中的增强具有重要作用。Xiao (2016)等人通过使用纳米级二次离子质谱(NanoSIMS)等技术,发现有机肥料处理的土壤中高反应性铝和铁矿物的含量以及它们的土壤碳结合能力均高于化肥处理。这些矿物元素与土壤有机碳的结合促进了土壤有机碳的稳定和储存,进而对长期土壤碳储存能力产生积极影响[37]。

总之,矿物种类多样,土壤有机碳也不尽相同,二者的结合对温度、pH 等环境因素具有不同的响应,涉及一系列复杂的物理化学过程[28]。但在盐渍土中阳离子主要是 Na^+ , 多价阳离子较强的阳离子桥作用无法发挥,而 Na^+ 不仅是一种强分散剂[38],而且能加快有机碳的矿化分解;另外,盐渍土 pH 值较高,导致黏土颗粒表面负电荷增加,颗粒间排斥作用增强。盐渍土的这些特殊的理化性质,都对有机碳的矿物保护具有障碍作用[39]。

3.3. 微生物保护机制

微生物介导的碳循环过程在土壤有机碳稳定中发挥着重要作用[40]。研究表明,土壤微生物固碳机制可以分为两种:1) 直接机制:土壤微生物通过同化植物来源的碳、贡献微生物生物量并产生顽固性有机物,在土壤固碳中发挥直接作用。微生物分解释放二氧化碳,而微生物残留物有助于稳定土壤碳库。2) 间接机制:微生物通过促进植物生长、养分吸收和根系分泌来间接影响土壤碳固存[41]。微生物通过发酵和呼吸过程释放多种形式的有机碳,如 CO_2 以及用于二次发酵的丙酮酸、乳酸、甘油和乙醇[42]。

在土壤碳循环中发挥作用的微生物有多种,如细菌、真菌、古菌、病毒和原生动物等。其中细菌和真菌占土壤微生物数量的 90% 以上,因此细菌和真菌主导微生物对土壤有机碳的影响[18]。具有固碳能力的主要土壤微生物包括绿藻门的两个门、蓝藻菌门、阿尔法变形菌的两个属和贝塔变形菌门,变形菌门被分为属级,其余的则在门级别上进行分类[43]。Mason (2023)等人[41]对关键微生物类群固碳机制的相关研究做了系统的整合(图 1),深绿色图形代表已经确定该微生物类群对相应的固碳机制有贡献,浅绿色图形代表存在新证据或假设该微生物类群对相应的固碳机制有贡献,灰色图形代表没有足够的证据来判断该微生物类群对相应固碳机制是否有贡献。许多菌类产生庞大的营养菌丝网络,这些结构含有碳水化合物,在死亡后可以通过聚集或吸附到矿物表面转化为难以分解的碳库。菌根真菌可以提高植物的健康和恢复力,因此受到了广泛关注。在已发现的菌根真菌中,对土壤碳循环作用最重要的是丛枝菌根真菌[44]。丛枝菌根真菌约占已鉴定真菌物种的 10%,通过分泌球囊霉素相关蛋白(glomalin-related protein, GRP)产生黏结作用,使其能固碳的重要特性[45]。而盐渍土中球囊霉素相关蛋白含量很低,因而对土壤有机碳的固定产生抑制作用[11]。

部分微生物有自身的调整机制,使其对盐度具有了耐受性,但此耐受性存在阈值,超过阈值后仍对固碳有阻碍作用[46]。丝状细菌,又称放线菌,既能促进植物生长,又对土壤碳的保持和稳定有一定作用,通过产生丝状结构来贡献土壤生物量。该类群还包括产乙酸细菌种类,能够利用氢气将二氧化碳转化为乙酸盐,也就是 Wood-Lungdahl 过程(WLP) [47]。黑化真菌也具有固碳潜力,黑化真菌中的黑色素可以降低真菌细胞壁受到的环境负面影响,可能会影响土壤碳的积累和稳定[48]。可以通过间接机制稳定有机碳的微生物主要是两个微生物类群:植物生长促进菌(PGPB)和菌根真菌[49] [50]。Kang (2024)等人利用

PLFA-SIP、DNA-SIP 和高通量测序技术，结合稳定同位素探针方法，探讨了在不同状态的桂林恢弘岩溶湿地土壤中，哪些微生物参与无机碳向有机碳的转化以及土壤碳固定速率[51]。研究发现，无机碳转化为有机碳的活跃微生物主要是细菌，包括 *Allochromatium*、*Methylorubrum*、*Methyloversatilis*、*Bradyrhizobium* 和 *Bosea*。光合自养微生物相比于暗固定过程中的化能自养微生物，具有更高的无机碳利用能力。土壤中的放线菌、变形菌和拟杆菌在吸收水稻根残留物衍生的碳方面起主导作用[52]。Kong (2018)等人使用 DNA-SIP 技术结合高通量测序，研究发现细菌在葡萄糖的初期利用中比真菌更为活跃[53]。特定的细菌和真菌群落与葡萄糖的同化密切相关，其中包括属于 *Firmicutes* 和 *Proteobacteria* 门的细菌，以及属于 *Fusarium*、*Cylindrocarpon* 和 *Paralomus* 等属的真菌。盐渍化土壤盐分离子含量高，养分缺乏，导致微生物群落结构和活性低，不利于土壤有机碳的固定[54] [55]。改良剂的添加能够降低盐渍化土壤盐度，增加有机质含量，提高土壤微生物活性，从而减弱盐渍化的阻碍[56]。微生物群落的相互作用也会影响土壤有机碳的固定。无论是积极的或消极的，直接的或间接的，微生物互作都可以影响化学成分和有机物流动，导致资源分配的变化，最终影响碳的分布[57]。

微生物介导机制	直接作用							间接作用			
	支持碳从易分解库向难分解库的转移		土壤团聚体		提高植物生长和恢复能力			支持碳从易分解库向难分解库的转移	土壤团聚体	提高植物生长和恢复能力	提高植物投入的质量
微生物作用	生物量中碳化合物的积累	微生物分泌物	菌丝活性	微生物分泌物	微生物分泌物	菌丝活性(增强营养获取)	养分矿化提高养分的可利用性	促进根系分泌物释放	促进根系分泌物释放	植物激素的调控	植物化学计量比的变化(例如C:N比)
丛枝菌根真菌 (AMF)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
植物促生细菌 (PGPB)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
丝状细菌	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
黑化真菌	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Figure 1. Schematic diagram illustrating the contribution levels of key microbial taxa to various mechanisms of soil carbon sequestration [41]

图 1. 关键微生物类群对土壤固碳各个机制的贡献水平示意图[41]

环境因子如何驱动土壤微生物固碳也是目前的热点话题。特别是盐渍土中土壤盐分影响土壤微生物量、微生物呼吸、酶活性和群落结构等的研究近年来备受关注，且盐分对微生物固碳的驱动机制没有形成系统的理论，存在许多争议[58]。盐分通过离子产生的渗透势效应和毒害抑制了微生物的活动。高盐环境中，为了防止细胞脱水，微生物也必须参与到调节过程中，通过在细胞之中积累离子或氨基酸和多糖等小分子有机物来降低渗透压[59]，能量消耗也会增加[60]。另外，盐渍土中盐分和水分的相对含量不断波动，导致微生物也要根据环境的变化改变调节策略，以适应外界环境的水势，导致能量消耗增加，代谢熵(qCO_2)增加，最终降低微生物碳的利用效率，有机物质更多地用于呼吸作用，从而增加了有机碳的消耗[61]。盐分与微生物数量的关系存在争议，有研究结果表明微生物数量与盐分呈正相关[57] [62] [63]，

也有研究表明呈负相关[64] [65], 这可能是由于土壤类型不同, 含盐量不同, 微生物数量差异大, 对土壤有机碳的积累贡献差异大所导致, 具体原因还有待研究[66]。高盐环境可能降低微生物活性并改变微生物群落结构, 抑制微生物呼吸和土壤有机碳矿化, 增加土壤有机碳含量; 但是同时也抑制了外源有机碳向土壤有机碳的转化过程, 降低了土壤有机碳含量[58] [67]。因此, 明确盐分如何驱动微生物影响土壤有机碳的固定是非常重要的。除了盐渍土中盐分对微生物参与固碳有明显的影响外, 其他环境因子也会通过影响微生物而间接影响土壤有机碳稳定性。Liu (2022)等人使用 DNA-SIP (DNA 稳定同位素探针技术)来识别活跃的化能自养微生物。研究发现, 夏季相比冬季, 暗碳固定(DCF)效率平均高出 60%, 这表明温度可能显著影响化能自养微生物的活性, 从而影响暗碳固定效率。高温可能促进硫酸盐还原细菌的活动, 从而提供更多的硫化物, 进一步促进 DCF [68]。Fu (2021)等人使用 DNA-SIP 方法评估在 8°C 或 16°C 孵化的苔原土壤中, 蛋氨酸(一种易获得的碳和氮源)和纤维素(一种长链碳生物聚合物)对原核和真菌群落的影响, 发现在升高的温度下, 蛋氨酸主要贡献于微生物碳的即时利用和土壤有机物分解的启动, 而纤维素与土壤中潜在碳稳定的优势和活跃微生物群落有关[69]。有研究发现, 生物炭改良提高了土壤湿度和 pH 值, 从而塑造了细菌和真菌群落的组成和相互作用。研究强调, 生物炭引起的与关键物种的竞争增强了微生物多样性, 进而降低了碳水化合物的分解和土壤代谢熵, 有助于减少土壤有机碳的矿化, 通过负向启动效应促进土壤有机碳的固存[70]。

4. 结论

外源物质的添加对盐渍化土壤的固碳效应具有显著的正面影响。秸秆、生物炭等的应用不仅提高了土壤有机碳含量, 而且通过增强土壤团聚体的物理保护作用, 促进了有机碳的稳定。生物有机肥和微生物肥料的施用通过改善土壤理化性质和微生物活性, 进一步提升了土壤的固碳潜力。此外, 土壤有机碳的稳定性受到物理保护、矿物保护和微生物保护三种主要机制的调控, 这些机制受到环境因子如盐分、温度和水分等的影响。本综述强调了改良剂在盐渍土固碳中的重要作用, 以及深入理解环境因子如何驱动微生物固碳对于提升土壤有机碳固定效率的重要性。未来的研究需要进一步探索不同环境条件下, 外源物质添加与土壤有机碳稳定机制之间的相互作用, 以及这些相互作用对全球碳循环的长期影响。

参考文献

- [1] Paustian, K., Andren, O., Janzen, H.H., *et al.* (1997) Agricultural Soils as a Sink to Mitigate CO₂ Emissions. CIFOR-ICRAF.
- [2] Malal, H., Garcia, J.A., Marrs, A., Ait Hamza, M., Emerson, C., Nocco, M., *et al.* (2025) Organic and Inorganic Fertilizers Modulate the Response of the Soil Microbiome to Salinity Stress. *Frontiers in Microbiology*, **16**, Article ID: 1551586. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1551586>
- [3] Su, Y., Wang, F., Suo, D., Zhang, Z. and Du, M. (2006) Long-Term Effect of Fertilizer and Manure Application on Soil-Carbon Sequestration and Soil Fertility under the Wheat-Wheat-Maize Cropping System in Northwest China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **75**, 285-295. <https://doi.org/10.1007/s10705-006-9034-x>
- [4] Setia, R., Gottschalk, P., Smith, P., Marschner, P., Baldock, J., Setia, D., *et al.* (2013) Soil Salinity Decreases Global Soil Organic Carbon Stocks. *Science of the Total Environment*, **465**, 267-272. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.028>
- [5] Cheng, Z., Guo, J., Jin, W., Liu, Z., Wang, Q., Zha, L., *et al.* (2024) Responses of SOC, Labile SOC Fractions, and Amino Sugars to Different Organic Amendments in a Coastal Saline-Alkali Soil. *Soil and Tillage Research*, **239**, Article ID: 106051. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106051>
- [6] Zheng, H., Wang, X., Luo, X., Wang, Z. and Xing, B. (2018) Biochar-Induced Negative Carbon Mineralization Priming Effects in a Coastal Wetland Soil: Roles of Soil Aggregation and Microbial Modulation. *Science of the Total Environment*, **610**, 951-960. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.166>
- [7] 曲成闯, 陈效民, 张志龙, 等. 施用生物有机肥对黄瓜连作土壤有机碳库和酶活性的持续影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(9): 3147-3154.

- [8] 孟婷婷, 杨亮彦, 孔辉, 等. 生物有机肥施用量对土壤有机碳组分及酶活性的影响[J]. 北方园艺, 2022(17): 86-91.
- [9] Cong, P., Ouyang, Z., Hou, R. and Han, D. (2017) Effects of Application of Microbial Fertilizer on Aggregation and Aggregate-Associated Carbon in Saline Soils. *Soil and Tillage Research*, **168**, 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.12.005>
- [10] 侯亚玲, 周蓓蓓, 王全九, 等. 枯草芽孢杆菌对盐碱土水分运动和水稳性团聚体的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 105-111, 147.
- [11] Kohler, J., Caravaca, F. and Roldán, A. (2010) An AM Fungus and a PGPR Intensify the Adverse Effects of Salinity on the Stability of Rhizosphere Soil Aggregates of *Lactuca Sativa*. *Soil Biology and Biochemistry*, **42**, 429-434. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.11.021>
- [12] Mooshammer, M., Wanek, W., Schneckler, J., Wild, B., Leitner, S., Hofhansl, F., *et al.* (2012) Stoichiometric Controls of Nitrogen and Phosphorus Cycling in Decomposing Beech Leaf Litter. *Ecology*, **93**, 770-782. <https://doi.org/10.1890/11-0721.1>
- [13] Geisseler, D. and Scow, K.M. (2014) Long-Term Effects of Mineral Fertilizers on Soil Microorganisms—A Review. *Soil Biology and Biochemistry*, **75**, 54-63. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.03.023>
- [14] Balík, J., Suran, P., Sedlář, O., Černý, J., Kulhánek, M., Procházková, S., *et al.* (2023) The Effect of Long-Term Farmyard Manure and Mineral Fertilizer Application on the Increase in Soil Organic Matter Quality of Cambisols. *Agronomy*, **13**, Article No. 2960. <https://doi.org/10.3390/agronomy13122960>
- [15] Chi, C.M., Zhao, C.W., Sun, X.J. and Wang, Z.C. (2012) Reclamation of Saline-Sodic Soil Properties and Improvement of Rice (*Oriza sativa* L.) Growth and Yield Using Desulfurized Gypsum in the West of Songnen Plain, Northeast China. *Geoderma*, **187**, 24-30. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.04.005>
- [16] Kim, Y., Choo, B. and Cho, J. (2017) Effect of Gypsum and Rice Straw Compost Application on Improvements of Soil Quality during Desalination of Reclaimed Coastal Tideland Soils: Ten Years of Long-Term Experiments. *Catena*, **156**, 131-138. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.04.008>
- [17] Sollins, P., Homann, P. and Caldwell, B.A. (1996) Stabilization and Destabilization of Soil Organic Matter: Mechanisms and Controls. *Geoderma*, **74**, 65-105. [https://doi.org/10.1016/s0016-7061\(96\)00036-5](https://doi.org/10.1016/s0016-7061(96)00036-5)
- [18] 陈建国, 田大伦, 闫文德, 等. 土壤团聚体固碳研究进展[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(5): 74-80.
- [19] Carter, M.R. and Gregorich, E.G. (2007) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. CRC Press.
- [20] 杨长明, 欧阳竹, 杨林章, 等. 农业土地利用方式对华北平原土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报, 2006(12): 4148-4155.
- [21] Balabane, M. and Plante, A.F. (2004) Aggregation and Carbon Storage in Silty Soil Using Physical Fractionation Techniques. *European Journal of Soil Science*, **55**, 415-427. <https://doi.org/10.1111/j.1351-0754.2004.0608.x>
- [22] 王茹, 张永清, 宗宁, 等. 长期增温对西藏高寒草甸土壤团聚体周转和稳定性影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(3): 596-605.
- [23] Lugato, E., Lavallee, J.M., Haddix, M.L., Panagos, P. and Cotrufo, M.F. (2021) Different Climate Sensitivity of Particulate and Mineral-Associated Soil Organic Matter. *Nature Geoscience*, **14**, 295-300. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00744-x>
- [24] 周正虎, 刘琳, 侯磊. 土壤有机碳的稳定和形成: 机制和模型[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(10): 11-22.
- [25] 衡利沙, 王代长, 蒋新, 等. 黄棕壤铁铝氧化物与土壤稳定性有机碳和氮的关系[J]. 环境科学, 2010, 31(11): 2748-2755.
- [26] McConkey, B. (2003) Crop Rotation and Tillage Impact on Carbon Sequestration in Canadian Prairie Soils. *Soil and Tillage Research*, **74**, 81-90. [https://doi.org/10.1016/s0167-1987\(03\)00121-1](https://doi.org/10.1016/s0167-1987(03)00121-1)
- [27] Lützw, M.V., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., *et al.* (2006) Stabilization of Organic Matter in Temperate Soils: Mechanisms and Their Relevance under Different Soil Conditions—A Review. *European Journal of Soil Science*, **57**, 426-445. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x>
- [28] Kleber, M., Bourg, I.C., Coward, E.K., Hansel, C.M., Myneni, S.C.B. and Nunan, N. (2021) Dynamic Interactions at the Mineral-Organic Matter Interface. *Nature Reviews Earth & Environment*, **2**, 402-421. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00162-y>
- [29] Kunhi Mouvenchery, Y., Kučerik, J., Diehl, D. and Schaumann, G.E. (2011) Cation-Mediated Cross-Linking in Natural Organic Matter: A Review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, **11**, 41-54. <https://doi.org/10.1007/s11157-011-9258-3>
- [30] Ni, J. and Pignatello, J.J. (2018) Charge-Assisted Hydrogen Bonding as a Cohesive Force in Soil Organic Matter: Water Solubility Enhancement by Addition of Simple Carboxylic Acids. *Environmental Science: Processes & Impacts*, **20**,

- 1225-1233. <https://doi.org/10.1039/c8em00255j>
- [31] Rowley, M.C., Grand, S. and Verrecchia, É.P. (2017) Calcium-Mediated Stabilisation of Soil Organic Carbon. *Biogeochemistry*, **137**, 27-49. <https://doi.org/10.1007/s10533-017-0410-1>
- [32] Kaiser, K. and Guggenberger, G. (2007) Sorptive Stabilization of Organic Matter by Microporous Goethite: Sorption into Small Pores vs. Surface Complexation. *European Journal of Soil Science*, **58**, 45-59. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00799.x>
- [33] Mayer, L.M., Schick, L.L., Hardy, K.R., Wagai, R. and McCarthy, J. (2004) Organic Matter in Small Mesopores in Sediments and Soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **68**, 3863-3872. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.03.019>
- [34] Mayer, L.M. (1994) Surface Area Control of Organic Carbon Accumulation in Continental Shelf Sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **58**, 1271-1284. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90381-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90381-6)
- [35] Vidal, A., Lenhart, T., Dignac, M.F., Biron, P., Höschen, C., Barthod, J., *et al.* (2020) Promoting Plant Growth and Carbon Transfer to Soil with Organic Amendments Produced with Mineral Additives. *Geoderma*, **374**, Article ID: 114454. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114454>
- [36] Niu, C., Weng, L., Lian, W., Zhang, R., Ma, J. and Chen, Y. (2023) Carbon Sequestration in Paddy Soils: Contribution and Mechanisms of Mineral-Associated SOC Formation. *Chemosphere*, **333**, Article ID: 138927. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138927>
- [37] Xiao, J., He, X., Hao, J., Zhou, Y., Zheng, L., Ran, W., *et al.* (2016) New Strategies for Submicron Characterization the Carbon Binding of Reactive Minerals in Long-Term Contrasting Fertilized Soils: Implications for Soil Carbon Storage. *Biogeosciences*, **13**, 3607-3618. <https://doi.org/10.5194/bg-13-3607-2016>
- [38] Tedeschi, A. and Dell'Aquila, R. (2005) Effects of Irrigation with Saline Waters, at Different Concentrations, on Soil Physical and Chemical Characteristics. *Agricultural Water Management*, **77**, 308-322. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.036>
- [39] Haynes, R.J. and Beare, M.H. (1997) Influence of Six Crop Species on Aggregate Stability and Some Labile Organic Matter Fractions. *Soil Biology and Biochemistry*, **29**, 1647-1653. [https://doi.org/10.1016/s0038-0717\(97\)00078-3](https://doi.org/10.1016/s0038-0717(97)00078-3)
- [40] 秦泽峰, 谢沐希, 张运龙, 等. 丛枝菌根真菌介导的土壤有机碳稳定机制研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(4): 756-766.
- [41] Mason, A.R.G., Salomon, M.J., Lowe, A.J. and Cavagnaro, T.R. (2023) Microbial Solutions to Soil Carbon Sequestration. *Journal of Cleaner Production*, **417**, Article ID: 137993. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137993>
- [42] Wu, H., Cui, H., Fu, C., Li, R., Qi, F., Liu, Z., *et al.* (2024) Unveiling the Crucial Role of Soil Microorganisms in Carbon Cycling: A Review. *Science of the Total Environment*, **909**, Article ID: 168627. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168627>
- [43] Thauer, R.K. (2007) A Fifth Pathway of Carbon Fixation. *Science*, **318**, 1732-1733. <https://doi.org/10.1126/science.1152209>
- [44] Hawkins, H., Cargill, R.I.M., Van Nuland, M.E., Hagen, S.C., Field, K.J., Sheldrake, M., *et al.* (2023) Mycorrhizal Mycelium as a Global Carbon Pool. *Current Biology*, **33**, R560-R573. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.02.027>
- [45] Emran, M., Doni, S., Macci, C., Masciandaro, G., Rashad, M. and Gispert, M. (2020) Susceptible Soil Organic Matter, SOM, Fractions to Agricultural Management Practices in Salt-Affected Soils. *Geoderma*, **366**, Article ID: 114257. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114257>
- [46] Wichern, J., Wichern, F. and Joergensen, R.G. (2006) Impact of Salinity on Soil Microbial Communities and the Decomposition of Maize in Acidic Soils. *Geoderma*, **137**, 100-108. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.08.001>
- [47] Jiao, J., Fu, L., Hua, Z., Liu, L., Salam, N., Liu, P., *et al.* (2021) Insight into the Function and Evolution of the Wood Ljungdahl Pathway in Actinobacteria. *The ISME Journal*, **15**, 3005-3018. <https://doi.org/10.1038/s41396-021-00935-9>
- [48] Mukasa Mugerwa, T.T. and McGee, P.A. (2016) Potential Effect of Melanised Endophytic Fungi on Levels of Organic Carbon within an Alfisol. *Soil Research*, **55**, 245-252. <https://doi.org/10.1071/sr16006>
- [49] Malgioglio, G., Rizzo, G.F., Nigro, S., Lefebvre du Prey, V., Herforth-Rahmé, J., Catara, V., *et al.* (2022) Plant-Microbe Interaction in Sustainable Agriculture: The Factors That May Influence the Efficacy of PGPM Application. *Sustainability*, **14**, Article No. 2253. <https://doi.org/10.3390/su14042253>
- [50] Hakim, S., Naqqash, T., Nawaz, M.S., Laraib, I., Siddique, M.J., Zia, R., *et al.* (2021) Rhizosphere Engineering with Plant Growth-Promoting Microorganisms for Agriculture and Ecological Sustainability. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, **5**, Article ID: 617157. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.617157>
- [51] Kang, W., Xiao, Y., Li, W., Cheng, A., Cheng, C., Jia, Z., *et al.* (2024) Paddy Cultivation in Degraded Karst Wetland Soil Can Significantly Improve the Physiological and Ecological Functions of Carbon-Fixing Resident Microorganisms. *Science of the Total Environment*, **909**, Article ID: 168187. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168187>
- [52] Guo, T., Zhang, Q., Ai, C., He, P. and Zhou, W. (2020) Microbial Utilization of Rice Root Residue-Derived Carbon

- Explored by DNA Stable-Isotope Probing. *European Journal of Soil Science*, **72**, 460-473. <https://doi.org/10.1111/ejss.12970>
- [53] Kong, Y., Zhu, C., Ruan, Y., Luo, G., Wang, M., Ling, N., *et al.* (2018) Are the Microbial Communities Involved in Glucose Assimilation in Paddy Soils Treated with Different Fertilization Regimes for Three Years Similar? *Journal of Soils and Sediments*, **18**, 2476-2490. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-1961-z>
- [54] Amundson, R., Berhe, A.A., Hopmans, J.W., *et al.* (2015) Soil and Human Security in the 21st Century. *Science*, **348**, Article ID: 1261071.
- [55] Zhang, T., Wang, T., Liu, K., Wang, L., Wang, K. and Zhou, Y. (2015) Effects of Different Amendments for the Reclamation of Coastal Saline Soil on Soil Nutrient Dynamics and Electrical Conductivity Responses. *Agricultural Water Management*, **159**, 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.002>
- [56] 魏守才, 谢文军, 夏江宝, 等. 盐渍化条件下土壤团聚体及其有机碳研究进展[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 369-376.
- [57] Sardinha, M., Müller, T., Schmeisky, H. and Joergensen, R.G. (2003) Microbial Performance in Soils along a Salinity Gradient under Acidic Conditions. *Applied Soil Ecology*, **23**, 237-244. [https://doi.org/10.1016/s0929-1393\(03\)00027-1](https://doi.org/10.1016/s0929-1393(03)00027-1)
- [58] Rath, K.M. and Rousk, J. (2015) Salt Effects on the Soil Microbial Decomposer Community and Their Role in Organic Carbon Cycling: A Review. *Soil Biology and Biochemistry*, **81**, 108-123. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.11.001>
- [59] Empadinhas, N. and da Costa, M.S. (2008) Osmoadaptation Mechanisms in Prokaryotes: Distribution of Compatible Solutes. *International Microbiology: The Official Journal of the Spanish Society for Microbiology*, **11**, 151-161.
- [60] Oren, A. (1999) Bioenergetic Aspects of Halophilism. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, **63**, 334-348. <https://doi.org/10.1128/mmb.63.2.334-348.1999>
- [61] Schimel, J., Balsler, T.C. and Wallenstein, M. (2007) Microbial Stress-Response Physiology and Its Implications for Ecosystem Function. *Ecology*, **88**, 1386-1394. <https://doi.org/10.1890/06-0219>
- [62] Muhammad, S., Müller, T. and Joergensen, R.G. (2005) Decomposition of Pea and Maize Straw in Pakistani Soils along a Gradient in Salinity. *Biology and Fertility of Soils*, **43**, 93-101.
- [63] 操庆, 曹海生, 魏晓兰, 等. 盐胁迫对设施土壤微生物量碳氮和酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 300-304.
- [64] Wong, V.N.L., Dalal, R.C. and Greene, R.S.B. (2008) Salinity and Sodicity Effects on Respiration and Microbial Biomass of Soil. *Biology and Fertility of Soils*, **44**, 943-953. <https://doi.org/10.1007/s00374-008-0279-1>
- [65] Mavi, M.S. and Marschner, P. (2012) Drying and Wetting in Saline and Saline-Sodic Soils—Effects on Microbial Activity, Biomass and Dissolved Organic Carbon. *Plant and Soil*, **355**, 51-62.
- [66] 董心亮, 王金涛, 田柳, 等. 盐渍化土壤团聚体和微生物与有机质关系研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(3): 364-372.
- [67] Rath, K.M., Fierer, N., Murphy, D.V. and Rousk, J. (2018) Linking Bacterial Community Composition to Soil Salinity along Environmental Gradients. *The ISME Journal*, **13**, 836-846. <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0313-8>
- [68] Liu, B., Hou, L., Zheng, Y., Zhang, Z., Tang, X., Mao, T., *et al.* (2022) Dark Carbon Fixation in Intertidal Sediments: Controlling Factors and Driving Microorganisms. *Water Research*, **216**, Article ID: 118381. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118381>
- [69] Fu, H., Li, M., Bao, K., *et al.* (2021) Microbial Carbon Use and Associated Changes in Microbial Community Structure in High-Arctic Tundra Soils under Elevated Temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, **162**, Article ID: 108419.
- [70] Chen, L., Jiang, Y., Liang, C., Luo, Y., Xu, Q., Han, C., *et al.* (2019) Competitive Interaction with Keystone Taxa Induced Negative Priming under Biochar Amendments. *Microbiome*, **7**, Article No. 77. <https://doi.org/10.1186/s40168-019-0693-7>