

李甜甜, 朱奇, 沈李东, 朱田桑, 张佳凯, 马煜春, 夏龙. 有机粪肥施入对农田剖面土壤固碳潜力的影响[J]. 土壤学报, 2025,

LI Tiantian, ZHU Qi, SHEN Lidong, ZHU Tianshen, ZHANG Jiakai, MA Yuchun, XIA Longlong. Study on the Potential of Manure Application for Carbon Sequestration in Cropland Soil Profiles[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025,

有机粪肥施入对农田剖面土壤固碳潜力的影响*

李甜甜¹, 朱奇¹, 沈李东¹, 朱田桑¹, 张佳凯¹, 马煜春^{1†}, 夏龙²

(1.南京信息工程大学生态与应用气象学院, 南京 210044; 2.土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135)

摘要: 农田土壤有机碳(SOC)是陆地生态系统碳库的重要组成部分, 施用有机粪肥作为一种重要的农业管理措施, 已被广泛证实可以显著提升SOC储量。但目前大多数研究主要集中在0~20 cm表层土壤的SOC固定及机制, 深层土壤的固碳潜力亟待深入研究。本研究采用Meta分析方法, 系统分析有机粪肥施入对全球农田土壤剖面SOC分布及储量的影响。结果表明, 施用有机粪肥处理表层土层(0~20 cm)SOC储量从28.3 t·hm⁻²增加至36.4 t·hm⁻², 增幅为28.6%; 20~40 cm土层SOC储量从23.6 t·hm⁻²增长至27.5 t·hm⁻², 增幅为16.5%; 而在>40 cm土层SOC储量从45.6 t·hm⁻²增长至48.7 t·hm⁻², 增幅为6.8%。新SOC固存效率表现为0~20 cm土层最高(14.1%), 显著高于20~40 cm(10.0%)和>40 cm土层(2.9%)。土壤固碳效率受自然因素(年均温度、年均降水量)和人为因素(施肥类型、氮肥用量、土地利用方式、施用年限)的共同调控。其中年均温度、年均降水量对固碳效率的影响在不同土层存在差异, 而有机粪肥配施氮肥可显著提升表层土壤SOC储量。本研究为制定基于土壤剖面特征的差异化固碳策略提供了理论依据, 对优化农业管理增强土壤碳储存和缓解气候变化, 实现农业可持续发展具有重要意义。

关键词: 土壤剖面; 土壤有机碳; 有机粪肥; 农田土壤固碳

中图分类号: S158.2 文献标志码: A

Study on the Potential of Manure Application for Carbon Sequestration in Cropland Soil Profiles

LI Tiantian¹, ZHU Qi¹, SHEN Lidong¹, ZHU Tianshen¹, ZHANG Jiakai¹, MA Yuchun^{1†}, XIA Longlong²

(1. School of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China)

Abstract: 【Objective】Soil organic carbon (SOC) in cropland is an important component of the terrestrial ecosystem carbon pool. The application of organic manure, as a critical agricultural management practice, has been extensively validated to significantly enhance soil organic carbon (SOC) content and stock. However, Current research mainly focuses on the SOC fixation and mechanisms in the 0~20 cm surface soil layer, with little attention given to the carbon sequestration potential of deeper soil layers. 【Method】This study used a meta-analysis method to systematically analyze the impact of animal manure application on SOC distribution and stock in the soil profile of global croplands. 【Result】The results showed that the application of animal manure increased SOC stock in

* 江苏省碳达峰碳中和专项科技创新基金资助 (BE2023398) Supported by the Special Technology Innovation Fund of Carbon Peak and Carbon Neutrality in Jiangsu Province (No.BE2023398)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: mayc@nuist.edu.cn

作者简介: 李甜甜(2001-), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事农田土壤固碳研究。E-mail: 202312070016@nuist.edu.cn

收稿日期: 2025-02-26; 收到修改稿日期: 2025-06-10; 网络首发日期:

different soil layers. In the surface layer (0~20 cm), SOC stock increased from 28.3 t·hm⁻² to 36.4 t·hm⁻², with an increase of 28.6%. In the 20~40 cm layer, SOC stock increased from 23.6 t·hm⁻² to 27.5 t·hm⁻², with an increase of 16.5% while in the >40 cm layer, SOC stock increased from 45.6 t·hm⁻² to 48.7 t·hm⁻² (6.8%). The new SOC sequestration efficiency (NCE) was highest in the 0~20 cm layer (146.0%), significantly higher than in the 20~40 cm layer (117.2%) and the >40 cm layer (64.3%). Also, it was observed that soil carbon sequestration efficiency was co-regulated by both natural factors (annual mean temperature, annual mean precipitation) and anthropogenic factors (fertilizer type, nitrogen application rate, land use type, and application duration). Specifically, the impacts of annual mean temperature and annual mean precipitation on sequestration efficiency vary across different soil layers. Moreover, the combined application of animal manure and an appropriate amount of nitrogen fertilizer significantly enhanced SOC stock in the surface soil layer. 【Conclusion】 This study provides a theoretical basis for developing differentiated carbon sequestration strategies based on soil profile characteristics. Furthermore, the study highlights the significance of optimizing agricultural management to enhance soil carbon stock, mitigate climate change, and achieve sustainable agricultural development.

Key words: Soil profile; Soil organic carbon; Organic manure; Cropland carbon sequestration

土壤有机碳库作为陆地生态系统中最大的碳库，其碳储量大约为大气碳储量的 2 倍到 3 倍，超过了大气与植被碳库的总和^[1]。土壤有机碳库的微小变化会直接影响大气中温室气体浓度，进而加剧气候变化^[2]。农田土壤碳库占陆地土壤总碳库的 8%~10%^[3]，因此促进农田土壤固碳能力成为减缓气候变化的关键措施之一。土壤有机碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 是土壤的重要组成部分，主要由动物和植物残体、根系分泌物及微生物残体构成。作为土壤肥力的重要指标，SOC 不仅影响土壤肥力、作物产量和地球碳循环，对调节全球碳循环和应对气候变化也至关重要^[4]。因此，土壤有机碳库的稳定性及其机制已成为当下的研究热点之一。

早期研究将土壤视为均匀整体，认为不同深度土层碳库对环境变化的响应具有一致性^[5]。然而，这一观点未能充分考虑土壤剖面的异质性特征以及自然条件和人为活动上的差异。事实上，土壤碳库对环境变化的响应呈现出明显的层次性特征。因此，将土壤简单视为均质体的研究方法难以准确评估气候变暖对土壤碳库及全球生态系统的潜在影响。在农田生态系统中，农业管理措施使表层土壤更易受到人为干扰，且在短时间尺度上表现出更显著的变化^[6]。表层土壤 (0~20 cm) 作为人类活动的主要作用区域，其碳库动态已得到广泛关注^[7]。然而，深层有机碳的环境和稳定机制与表层有机碳存在显著差异。深层 SOC 的循环过程受非生物和生物因素的调控，这些因素均随土壤深度呈现梯度变化。研究表明，SOC 含量与土层深度呈指数下降趋势，土壤的理化指标，比如微生物活性等，也在垂直剖面上呈现出明显的分层特征^[8]。目前大多数研究聚焦于 0~20 cm 表层土壤的 SOC 固持机制，对深层 SOC 的转化和固定的关注相对不足。深层土壤作为陆地生态系统的重要碳储库，约占全球总碳储量的 50%，其在全球碳循环和气候变化响应中的作用不容忽视^[9]。从长远来看，深层 SOC 的缓慢更替对于陆地对气候变化的反馈至关重要^[10]。然而，目前针对深层土壤碳库的研究仍较为有限，厘清深层土壤碳库对全球气候变化的响应问题亟待解决。

施用有机粪肥作为一项重要的农田土壤固碳措施，可以显著提升 SOC 含量和储量。有机粪肥的施用不仅直接为土壤提供外源有机碳输入，促进碳的固定过程，还能优化土壤团聚体结构，增强微生物活性^[11]，从而为碳的稳定固存创造有利条件。从农业生产和减缓气候变化的角度来看，有机粪肥的施用不仅能为作物生长提供必需养分，还能通过促进植物生物量的积累，增加碳的固定与返还，进而间接推动 SOC 的积累和土壤质量的提升^[11]。长期施用有机粪肥可显著增加 SOC 储量，主要在于有机粪肥中的有机碳更易被土壤微生物利用，促进稳定的有机-无机复合体形成。此外，有机粪肥中的养分均衡释放，有利于维持土壤生态系统的碳固定功能。多项 Meta 研究已证实，有机粪肥能够显著提高 SOC 的固存速率^[12]。

^{13]}, 且大多默认土壤为均匀整体, 未能充分考虑有机粪肥施入土壤后对不同土层产生的差异化影响。有机粪肥影响深层土壤有机碳(SOC)的动态机制主要包含以下三个方面作用路径: 首先, 粪肥中的可溶性有机碳及矿质养分通过土壤水分下渗向深层迁移^[14], 直接参与深层SOC库的构建与稳定化过程; 其次, 有机养分的持续供给显著促进植物根系生物量增加及垂直延伸, 由此产生的根系分泌物在剖面上的分布深度和通量均显著提升, 为深层土壤微生物群落提供有效碳源, 进而通过微生物代谢产物的再合成途径强化SOC固持^[15]; 再者, 粪肥输入可改善土壤团粒结构, 通过降低容重和增加孔隙度来优化土壤三相比例, 形成更适宜微生物活动的微域环境, 从而促进微生物量有机碳(MBC)积累转化, 最终实现深层SOC储量的提升^[14]。基于上述机制解析, 本研究提出以下科学假设: 有机粪肥对土壤剖面SOC储量的提升效应存在显著空间异质性, 其影响强度随土层深度增加呈梯度递减趋势; 区域气候要素(年均温度、年均降水量)通过调控有机碳矿化速率与农田管理措施(有机粪肥类型、施用量、持续时间等)形成交互效应, 共同决定剖面SOC的累积模式与分布特征。

本研究采用Meta分析方法, 重点分析了不同土层(0~20 cm、20~40 cm和>40 cm)SOC含量及储量的时空变化特征, 探讨施用有机粪肥对农田SOC储量的影响, 通过量化评估自然因素(如气候条件)和人为管理措施(如施肥方式、氮肥用量等)对各土层SOC储量的动态影响, 揭示土壤剖面SOC储量分布差异的驱动机制, 为构建合理的碳库管理策略, 为农田土壤固碳减排和应对气候变化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 文献检索

本研究系统收集了截止2023年已发表的相关文献数据, 其中中文文献主要来自中国知网(<https://www.cnki.net/index>), 英文文献主要来自Web of Science核心合集数据库(<https://www.webofscience.com/wos/>)。本研究所用中文检索词包括有机粪肥、土壤有机碳等, 所用英文检索词包括organic fertilizer, manure, soil organic carbon。为确保研究的准确性, 本研究所用文献均严格满足以下筛选标准: 1) 试验类型限定为大田试验, 排除盆栽或温室试验; 2) 试验设计需包含至少1对处理组(M)和对照组(CK), 具体而言, 当试验组仅施用单一有机粪肥时, 对照组采用空白对照; 而当试验组是将氮磷钾与有机粪肥配施时, 对照组则为施用等量氮磷钾的处理; 3) 文献需提供或可通过计算获得不同土层SOC储量数据。基于以上标准严格筛选, 共获得符合要求的文献74篇, 共获得有效试验数据462对。

1.2 数据收集、分组与换算

在文献数据收集与处理过程中, 提取文献中试验点的土壤容重(BD)、SOC含量、SOC储量、采样深度等数据, 包括各个试验处理的重复数以及有机粪肥施用信息(包括有机粪肥类型、施用量、持续时间等)数据。其中, 土壤有机碳(SOC)数据若以土壤有机质(SOM)形式, 则利用公式 $SOC = SOM/1.724$ 转化。每组数据均应包括平均值(M)、样本量(n)和标准差(SD)。本研究采用GetData Graph Digitizer软件对文献图表数据进行数字化提取, 并将其录入数据库, 若为表格形式数据则直接录入数据库。

为深入分析不同土层SOC储量的影响因素, 本研究将土壤剖面划分为三个层次: 0~20 cm(表层)、20~40 cm(中层)和>40 cm(深层, 最深至100 cm)。基于各土层SOC含量与土壤容重的相关关系^[16], 构建趋势线模型, 推算出部分文献中缺失的表层和深层土壤容重数值。通过式(1)计算得出SOC储量。

$$SOC_{\text{储量}} = \sum_{i=1}^n (C_i \times \rho_i \times T_i) \times 10^{-1} \quad (1)$$

式中, $SOC_{\text{储量}}$ 为土壤有机碳储量, $t \cdot hm^{-2}$; C_i 为第*i*层土壤有机碳含量, $g \cdot kg^{-1}$; ρ_i 为第*i*层土壤容重, $g \cdot cm^{-3}$; T_i 为土壤深度, cm。

本研究使用 MetaWin2.1 进行 Meta 分析, 以响应比 (R) 的自然对数为效应值 (lnR) [17] :

$$\ln R = \ln \left(\frac{X_t}{X_c} \right) = \ln X_t - \ln X_c \quad (2)$$

式中, X_t 为施有机粪肥处理下土壤有机碳含量, 以 C 计, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; X_c 为未施有机粪肥处理下土壤有机碳含量, 以 C 计, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。通过式 (3) 得到各效应值对应权重:

$$\text{Weight} = \frac{(n_t \times n_c)}{(n_t + n_c)} \quad (3)$$

式中, Weight 为权重; n_t 施有机粪肥处理的试验重复次数; n_c 为未施有机粪肥处理的试验重复次数。

利用重抽样法计算效应值得 95% 置信区间, 如果效应值的 95% 置信区间不与 0 重合, 那么则认为效应值显著, 即若置信区间全部 > 0, 则说明有机粪肥施入显著增加农田土壤有机碳储量 ($P < 0.05$); 若置信区间全部 < 0, 则说明有机粪肥施入能够显著降低农田土壤有机碳储量 ($P < 0.05$)。若置信区间包含 0, 则说明有机粪肥施入对农田土壤有机碳储量无显著影响。

本文采用失安全数 (fail-safe number 或 FSN) 对数据偏移进行量化。若失安全数大于临界值 ($5n+10$, n 为文献收集到的案例数), 则代表数据显著性结果可信度高, 不存在发表偏移。

施用有机粪肥后农田中新形成的 SOC 被认为是缓解气候变化的一个重要途径。新 SOC 固存效率 (New SOC Sequestration Efficiency, NCE) 是评估土壤碳固存效果的关键指标, 定义为施有机粪肥处理下 SOC 储量与未施有机粪肥处理下 SOC 储量的差值与投入总碳量之比 [18], 公式如下:

$$\text{Cropland NCE} = \frac{\text{SOC}_{\text{储量,t}} - \text{SOC}_{\text{储量,c}}}{C_{\text{input,t}}} \quad (4)$$

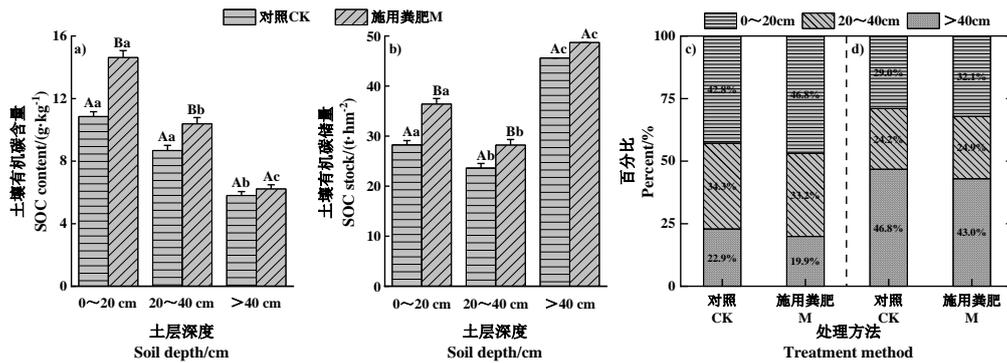
式中, Cropland NCE 为农田新 SOC 固存效率, %; $\text{SOC}_{\text{储量,t}}$ 为施有机粪肥处理下 SOC 储量, $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$; $\text{SOC}_{\text{储量,c}}$ 为未施有机粪肥处理 SOC 储量, $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$; $C_{\text{input,t}}$ 为总 C 输入率, $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

本研究采用 Microsoft Excel 2016 建立标准化信息数据表, 记录并整理文献中的关键信息, 包括试验点地理信息、农田管理措施、气候条件参数, 以及土壤初始理化性质等基础数据。采用 Metawin2.1 软件对所提取的试验数据进行整合分析; 采用 Origin Pro 2017 对整合分析结果进行绘图; 采用 SPSS22.0 进行相关分析和显著性检验。

2 结果

2.1 农田土壤剖面有机碳含量及有机碳储量对有机粪肥施入的响应

如图 1 所示, 有机粪肥施用显著提高了各层土壤剖面的 SOC 含量和储量, 提升效应表层土壤 (0~20 cm) 中表现最为显著。与对照处理相比, 表层 SOC 含量为 $10.9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 施肥后为 $14.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 增幅为 33.9% ($P < 0.01$); 表层 SOC 储量从 $28.3 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加至 $36.4 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 增幅为 28.6% ($P < 0.01$)。有机粪肥对 SOC 的增效随土层深度增加呈现明显的递减趋势。在 20~40 cm 土层, 未施有机粪肥时 SOC 含量为 $8.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 施肥后为 $10.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 增幅为 19.5% ($P < 0.001$); SOC 储量从 $23.6 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增长至 $27.5 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 增幅为 16.5% ($P < 0.01$)。在 >40 cm 深层土壤中, 有机粪肥的增效作用进一步减弱, SOC 含量从 $5.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增长至 $6.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 仅增加了 6.9%; SOC 储量从 $45.6 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增长至 $48.7 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 仅增加了 6.8%, 但均未达到显著水平。

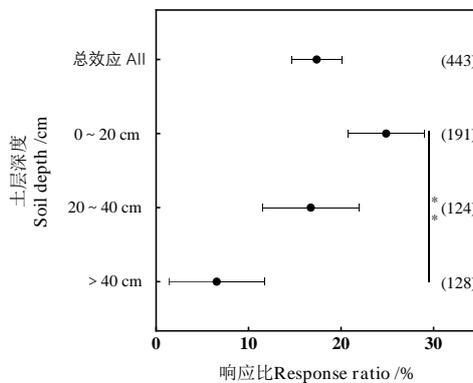


注：CK 表示不施肥；M 表示施用有机粪肥；不同小写字母表示同一处理下剖面间差异显著；不同大写字母表示同一剖面下不同处理间差异显著；误差线表示标准误 (SE)。Note: CK means no fertilization; M means applying organ manure; The lowercase letter abc indicates the significance of the soil profile under the same treatment; The capital letter ABC indicates the significance of different treatments in the same profile; Error bars represent the Standard Error (SE).

图 1 有机粪肥施入前后剖面有机碳含量与有机碳储量的变化(a、b)及比例 (c、d)

Fig. 1 Changes of SOC content and SOC stock in soil profile before and after organic manure application (a, b) and proportion (c, d)

图 2 定量揭示了有机粪肥施用对土壤有机碳 (SOC) 剖面分布的梯度效应。土层 SOC 储量增幅呈现显著垂直分异特征 ($P<0.01$)：表层土壤 (0~20 cm) 提升幅度达 24.9%，显著高于 20~40 cm 土层的 16.7% (降幅 8.2%) 及 >40 cm 土层的 6.6% (降幅 18.3%)。深层土壤 (>40 cm) SOC 储量的增量较 20~40 cm 土层降低 10.1%，其与表层的差异达到极显著水平 (降幅为 18.3%， $P<0.01$)。



注：括号内数值代表样本数，误差棒代表 95% 置信区间，下同。Note: The digitals in parentheses represent independent sample size. Error bars are the 95% confidence intervals. The same below.

图 2 剖面有机碳储量对有机粪肥施入的响应

Fig. 2 Response of SOC stock in profile to organic manure application

2.2 气候条件下剖面有机碳储量对有机粪肥施入的响应

如图 3 所示，年均温度显著影响有机粪肥施用对 SOC 储量的提升效果。年均温为 0~10°C 时，有机粪肥施用显著提高了各土层 SOC 储量，其中 0~20 cm、20~40 cm 和 >40 cm 土层分别增加了 22.6%、16.4% 和 10.0% ($P<0.05$)，且增效随土层加深呈递减趋势。在年均温为 10~15°C 时，>40 cm 土层 SOC 储量增幅最小，仅为 5.5%，而 0~20 cm 和 20~40 cm 土层分别显著增加了 31.8% 和 16.7% ($P<0.001$)。当年均温 >15°C 时，有机粪肥施用对 40 cm 以下土层 SOC 储量的提升作用不显著，0~20 cm 和 20~40 cm 土层表现出显著增效 ($P<0.05$)。

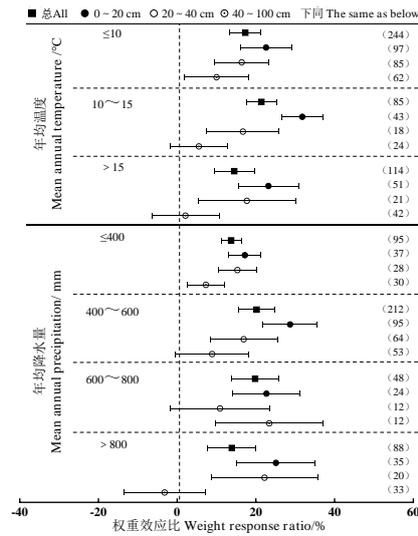


图3 不同年均温度和年均降水量条件下剖面有机碳储量对有机粪肥施入的响应

Fig. 3 Response of SOC stock in the soil profile to organic manure application under annual mean temperature and annual mean precipitation

不同年均降水量条件下，有机粪肥施用对SOC储量的提升效果基本随土层深度增加而减弱。降水量 ≤ 400 mm时，有机粪肥施用对SOC储量的增幅为13.7%，对0~20 cm和20~40 cm土层增幅分别为17.2%和15.3%，对 > 40 cm土层增幅仅为7.3% ($P < 0.05$)。降水量为400~600 mm时，有机粪肥施用对SOC储量的增幅为20.2%，对0~20 cm和20~40 cm土层增幅分别为28.7%和16.9% ($P < 0.05$)，对 > 40 cm土层增幅仅为8.9%。降水量 > 800 mm时，有机粪肥施用对全土层SOC储量的增幅为13.9%，对0~20 cm和20~40 cm土层增幅分别为25.1%和22.2% ($P < 0.05$)，对 > 40 cm土层SOC储量无显著影响。降水量为600~800 mm时，有机粪肥施用对SOC储量的提升效果随土层深度增加先减弱后增强， > 40 cm土层SOC储量的提升效果与0~20 cm土层相当，增幅分别为23.4%和22.7%，高于对20~40 cm土层SOC储量的提升效果。

2.3 不同施肥类型、施氮量和土地利用方式下剖面有机碳储量对有机粪肥施入的响应

如图4所示，施肥类型对SOC储量的影响因土层深度不同而异。单施有机粪肥(M)的提升效果最为显著，较未施有机粪肥增加了19.7%；其次为氮磷钾+有机粪肥(NPK+M)及氮+有机粪肥(N+M)，较施用NPK增加了16.8%及16.7%。在0~20 cm表层土层，SOC储量的增幅依次为： $M > NM > NPKM > NPM$ ；在20~40 cm土层土壤中为： $NM > NPKM > M > NPM$ ；在 > 40 cm深层土壤中则为： $NPKM > NM > M > NPM$ 。单施有机粪肥条件下，0~20 cm和20~40 cm土层的SOC储量分别增加了29.0%和16.5% ($P < 0.001$)，但对 > 40 cm土层的SOC储量的提升效果无显著影响，仅为6.2%。

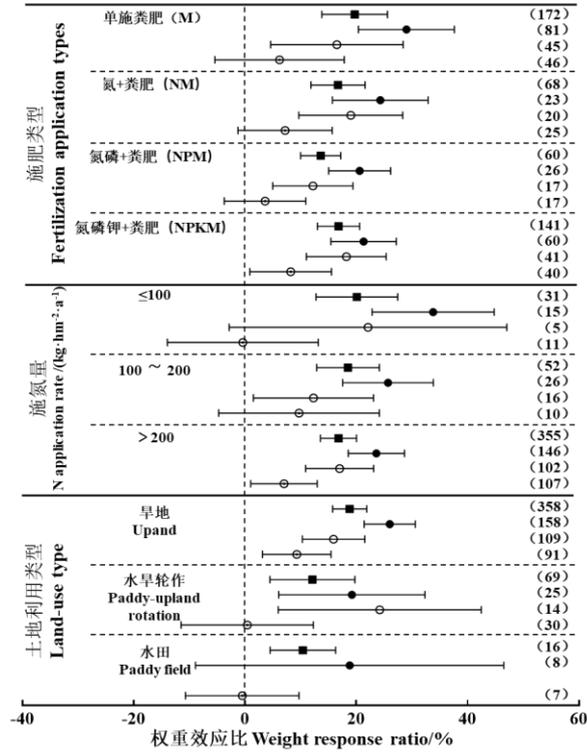


图 4 不同施肥类型、施氮量和土地利用方式下剖面有机碳储量对有机粪肥施入的响应

Fig. 4 Response of SOC stock in the soil profile to organic manure application under different fertilization types, nitrogen application rates, and land use patterns

氮肥施用量显著影响有机粪肥的固碳效果。当氮肥施用量 $\leq 100 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 时，SOC 储量的提升效果最为显著，增幅达 33.8%，但对 $>40 \text{ cm}$ 土层的 SOC 储量有负面影响。在氮肥施用量为 $100\sim 200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 时，有机粪肥对 SOC 储量的提升效果显著，增幅为 18.5%，其中 $0\sim 20 \text{ cm}$ 土层的增幅为 25.7%，对 $20\sim 40 \text{ cm}$ 和 $>40 \text{ cm}$ 土层无显著差异；当氮肥施用量超过 $200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 时，有机粪肥对 $0\sim 20 \text{ cm}$ 、 $20\sim 40 \text{ cm}$ 和 $>40 \text{ cm}$ 土层 SOC 储量分别增加 23.6%、17.0%和 7.0% ($P<0.001$)。

在不同土地利用类型旱地系统中，有机粪肥施用显著提升了全土层 SOC 储量，且随土层加深效应逐渐减弱，其中 $0\sim 20 \text{ cm}$ 土层增幅最大，为 26.0% ($P<0.001$)。在水旱轮作系统中，有机粪肥对 $>40 \text{ cm}$ 土层 SOC 储量影响不显著，对 $0\sim 20 \text{ cm}$ 和 $20\sim 40 \text{ cm}$ 土层的提升效果基本一致。水田的研究结果表明有机粪肥施用显著增加水田 $0\sim 20 \text{ cm}$ 土层的 SOC 储量，增幅为 18.8%，对 $>40 \text{ cm}$ 土层的 SOC 储量则有负面影响，但均未达到显著水平。

2.4 不同施肥年限、有机粪肥种类和有机粪肥施用量下剖面有机碳储量对有机粪肥施入的响应

图 5 揭示了施肥年限对有机粪肥驱动 SOC 累积效应的阶段性调控规律。结果显示，SOC 储量的提升效果随施肥年限呈现先增强后减弱的特征：短期 (≤ 10 年) 整体 SOC 储量的提升效果最低 (16.3%)，其中 $0\sim 20 \text{ cm}$ 、 $20\sim 40 \text{ cm}$ 及 $>40 \text{ cm}$ 土层增幅分别为 21.7%、13.7%和 7.9% ($P<0.001$)；中期 (11~20 年) 表层 SOC 储量的提升效果提升至 28.2%，但中层增幅下降至 12.8%。长期 (21~30 年) 各土层 SOC 储量的提升效果达峰值 (28.7%、23.0%、5.4%)，而当施肥年限超过 30 年时则呈现新的垂直分异格局：表层 (24.6%) 和中层 (19.5%) 增幅回落，但 $>40 \text{ cm}$ 土层有机粪肥施入对 SOC 储量的增幅显著提升至 13.0%，较前期各阶段增幅分别提高 5.1~7.6 个百分点。

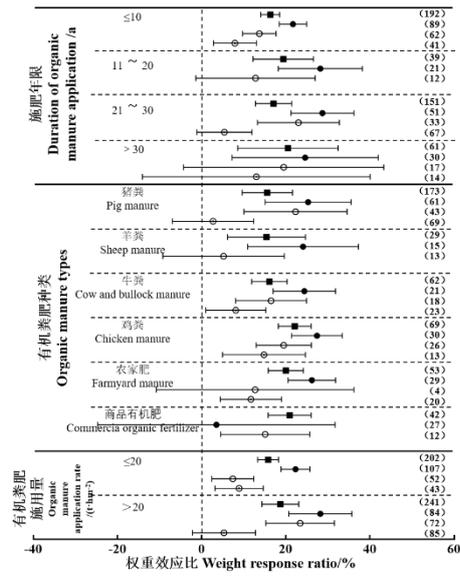


图 5 不同施肥年限、有机粪肥种类和有机粪肥施用量条件下剖面有机碳储量对有机粪肥施入的响应
 Fig. 5 Response of SOC stock in the soil profile to organic manure application under duration of organic manure application, types of organic manure, and application rate of organic manure

有机粪肥类型显著影响 SOC 储量的提升效果。在 0~20 cm 表层土壤中，各类有机粪肥均显著提高了 SOC 储量，效果排序为：鸡粪 > 农家肥 > 猪粪 > 牛粪 > 羊粪 > 商品有机肥。在 20~40 cm 中层土壤中，猪粪、鸡粪和牛粪的提升效果最为显著，增幅分别为 22.3%、19.5%和 16.5%。而在 >40 cm 深层土壤中，鸡粪和农家肥表现出显著的提升效果，增幅分别为 14.8%和 11.7%。综合来看，鸡粪对各土层的 SOC 储量提升效果最佳。

有机粪肥施用量对 SOC 储量的影响也存在差异。在 0~20 cm 土层，低施用量 ($\leq 20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和高施用量 ($> 20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) SOC 储量分别提升 22.3%和 28.2% ($P < 0.001$)。在 20~40 cm 土层，高有机粪肥施用量 SOC 储量提升 23.4%，较低施用量高 16.0% ($P < 0.05$)。在 >40 cm 土层，低施用量和高施用量对 SOC 储量的提升效果分别为 8.9%和 5.3%，但差异不显著。

3 讨论

3.1 剖面有机碳含量和储量的变化

在本研究中，有机粪肥施用显著提高了不同土层 SOC 含量与储量，其垂直分布特征与文献报道的有机粪肥施用对表层 SOC 积累的突出效应具有一致性，表明有机粪肥施用对表层土壤的 SOC 积累具有显著的促进作用^[19]。

有机粪肥对 SOC 的提升主要有两个原因：一是直接碳输入效应。有机粪肥自身含有大量有机碳（平均含量达 35%~45%），直接增加土壤碳库^[20]；二是间接碳输入效应，有机粪肥所含氮、磷等营养元素通过促进作物生物量增长，进而增加根系分泌物和作物残体输入，提高了土壤中的有机碳积累^[21]。此外，施用有机粪肥还可改善土壤结构，促进土壤微团聚体向大团聚体的转化，通过物理保护机制降低 SOC 矿化速率，增强土壤的固碳潜力。

本研究发现，在 0~20 cm 土层中，有机粪肥施用后 SOC 含量的增幅为 29.0%，显著低于蔡岸冬等^[22]研究中 58.4%的增幅。这种差异可能源于试验设计的对照组设置：在本研究中，对照组的设置并非完全统一为绝对空白对照。在垂直分布上，20~40 cm 和 >40 cm 土层 SOC 含量增幅（19.5%和 6.9%）显著低于表层。这可能是由于常规表施使 70%~80%的有机粪肥集中于 0~20 cm 表层，导致深层土壤的 SOC 含量增长较少。随土层深度的增加，大团聚体含量减少，黏粉粒含量增加，表层施用的有机粪肥与土壤颗粒接触更为紧密，有助于有机物

的分解和稳定；深层土壤由于接触面积较小，有机粪肥的效果较差^[23]。此外，表层土壤的水分和氧气供应更为充足，微生物的活跃程度和根系密度较高，有机质的分解和转化较为有效，因此促进了 SOC 的积累^[24]。而深层土壤中水分流动较少，养分的迁移与淋溶作用也降低了有机粪肥对 SOC 积累的影响，导致深层土壤中的 SOC 含量增加较少。

3.2 农田新有机碳固存效率

有机粪肥施用显著提升农田新 SOC 固存效率 (NCE)。研究结果表明，0~20 cm 土层的 NCE (14.1%) 高于 20~40 cm 土层 (10.0%)，显著高于 >40 cm 土层 (2.9%)。空间异质性主要源于以下原因：首先，可能与浅层土壤中有有机物质的积累、微生物活性以及碳源分解性密切相关，而深层土壤主要通过根系分泌物和 DOC 淋溶作用获取碳源。其次，在 0~20 cm 土层中，表层土壤微生物生物量碳和胞外酶活性等指标显著高于深层^[25]，促进易分解碳库 (LPOC) 向稳定碳库 (MAOC) 转化。相比之下，20~40 cm 和 >40 cm 土层中，由于有机物质的输入减少且微生物活性较低，SOC 固存效率明显降低。此外，深层土壤 (>40 cm) 的低 NCE 还与其较低的温度和酸性环境有关，低温-酸性耦合环境降低深层 SOC 矿化速率，进一步抑制了微生物的有机碳分解作用，进而影响 SOC 的积累^[2]。

3.3 各土层有机碳储量对有机肥施入响应的初始土壤性质因素

图 6 中表示土壤初始理化性质对有机粪肥施用的 SOC 储量的影响。在表层土壤中，初始 SOC 含量与有机粪肥施入 SOC 储量的响应呈显著负相关性 ($P < 0.05$)。这可能是因为表层土壤微生物活性较高，有机碳分解速率较快，因此即使初始 SOC 含量较高，但由于分解作用强烈，SOC 储量在有机粪肥施入后并未显著增加。在 20~40 cm 土层中，初始 SOC 含量与 SOC 储量呈微弱的正相关。这表明在该土层中，有机碳分解速率相对较慢，初始 SOC 含量的增加可能有助于 SOC 的积累。有机粪肥施入后，SOC 储量的增加可能与有机碳分解的减缓有关。在 >40 cm 的深层土壤中，初始 SOC 含量与 SOC 储量依然呈负相关性，但相关性不如表层土壤显著。这可能是因为深层土壤的微生物活性较低，有机碳分解速率较慢，SOC 储量的变化更多地受到土壤质地和水分条件的影响，而非初始 SOC 含量^[32]。

在表层土壤中，较高的初始 pH 与 SOC 储量呈正相关性。这可能是因为较高的 pH 有利于好氧微生物的增殖，加速养分矿化并促进植物根系分泌物的积累，从而提高外源有机碳的输入^[33]。此外，有机粪肥施入后，表层土壤中的新鲜有机质更容易被微生物分解，较高的 pH 可能进一步增强了这一过程，导致 SOC 储量的增加。在 20~40 cm 土层中，较高的初始 pH 与 SOC 储量呈负相关。这可能是因为，相对于酸化土壤，较高的 pH 下，土壤微生物活性增加，加速了有机碳的分解，尤其是在有机碳分解速率较慢的深层土壤中，导致 SOC 的流失^[2]。有机粪肥施入后，这一层的有机碳分解可能进一步加剧，pH 较高条件下显著减少 SOC 储量。在 >40 cm 的深层土壤中，较高的初始 pH 与 SOC 储量呈正相关性。这可能是因为较高的 pH 促进了矿物质（特别是黏土矿物）与有机碳的结合，形成稳定的有机-矿物复合物，从而减少碳的流失^[34]。有机粪肥施入后，深层土壤中的矿物质含量较高，能够与有机碳形成更稳定的复合物，较高的 pH 可能通过改善土壤结构和微生物群落的稳定性，促进 SOC 的长期积累。

在 0~20 cm 和 >40 cm 土层中，初始全氮 (TN) 含量与 SOC 储量呈显著负相关性 ($P < 0.05$)。较高的 TN 含量可能通过加速氮矿化作用，缓解了有机肥碳投入下微生物的氮限制，促进有机碳分解，从而减少 SOC 储量。有机粪肥施入显著增加表层 SOC 储量，这是因为表层土壤微生物活性较高，且有机粪肥中的有机物质可以直接补充 SOC。20~40 cm 土层由于水分和温度等环境因素对微生物活性和有机碳分解的影响较小，初始 TN 含量对 SOC 储量的影响不显著，由于环境因素对微生物活性的限制，有机粪肥施入对 SOC 储量的影响不显著。有机粪肥施入对 >40 cm 土层的 SOC 储量影响较小，因为深层土壤的微生物活性较低，且有机碳输入有限。

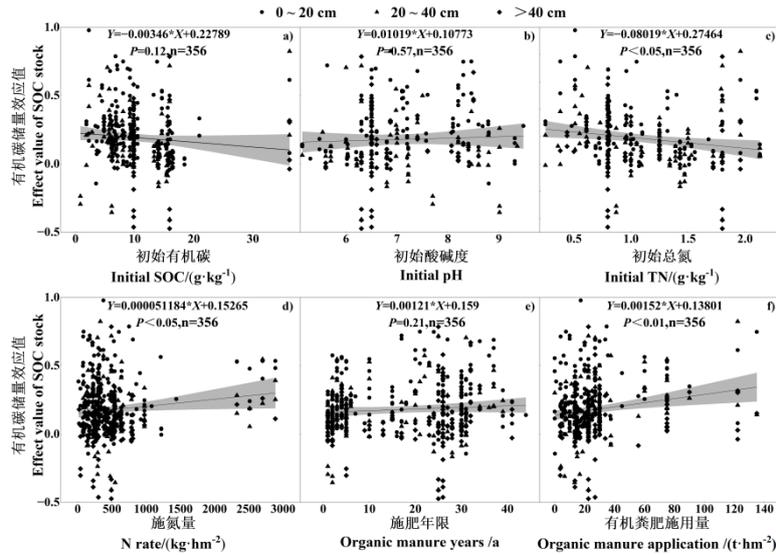
3.4 各土层有机碳储量对有机粪肥施入响应的自然因素

本研究系统分析了有机粪肥施用对不同土层 SOC 储量的影响，年均温度和年均降水量显著影响有机粪肥施用后 SOC 储量的提升效果（图 3）。在低温区（0~10°C），有机粪肥对全剖面 SOC 储量提升效应显著（ $P<0.05$ ），且呈现随土层深度增加而表现出梯度衰减的特征（图 6）。这主要归因于低温减缓了微生物活性和有机碳分解速率，从而延长了外源碳在土壤中的滞留时间^[26]。然而，当温度升至中温区（10~15°C）时，深层土壤（>40 cm）SOC 储量的增幅较表层土壤降低 4.5%（ $P<0.001$ ），温度超过 15°C 后，深层 SOC 固持效应消失，暗示高温引发的加速矿化过程，可能完全抵消粪肥输入的固碳效果^[11]。降水梯度分析进一步证实水热耦合机制对 SOC 动态的协同调控。在 400~600 mm 及 >800 mm 降水区间，表层土壤（0~20 cm）SOC 储量增幅达 28.7% 和 25.1%，而深层响应微弱，与既有研究结论相吻合^[10]。而降水量过低（≤400 mm）或过高（>800 mm）可能限制植物生长或降低土壤通气性，不利于有机碳固存。

3.5 各土层有机碳储量对有机粪肥施入响应的人为管理因素

本研究系统解析了农业管理措施对有机粪肥介导 SOC 剖面分布格局的调控机制。施肥类型、施氮量和土地利用方式显著影响有机粪肥提升 SOC 储量的效果，且这种影响在不同土层深度存在差异（图 4）。单施有机粪肥（M）处理对 SOC 储量的提升效果最为显著（ $P<0.05$ ），这主要归因于其直接输入的可矿化有机质为微生物代谢提供有效碳源，同时腐殖化过程增强了有机碳的化学稳定性^[14]。施氮量调控分析（图 6）证实，施氮量与 0~20 cm 土层 SOC 储量呈正相关关系，但无显著性水平，其机制在于适量氮素供应通过促进作物生物量积累，提升碳输入，但过量施氮引发土壤酸化，导致微生物碳利用效率下降^[27]。在表层土壤中，施氮对植物生长和微生物活性的促进作用更为显著，因此对 SOC 的积累具有更直接的影响。土地利用类型比较研究表明，旱地系统中有机粪肥施用对全土层 SOC 储量的提升效果最为显著，且呈现典型 SOC 剖面衰减模式（0~20 cm > 20~40 cm > 40 cm 以下）。水旱轮作系统因耕作扰动促进碳垂直迁移，使 20~40 cm 土层 SOC 储量的增效与表层差异不显著。而水田系统深层土壤（>40 cm）出现 SOC 损失趋势，这可能与淹水条件改变氧化还原状态，削弱有机-矿物复合体稳定性有关。

施肥年限、有机粪肥类型和施用量对 SOC 储量提升效果的影响存在显著差异（图 5）。施肥年限分析显示，SOC 累积效应呈现非线性动态：短期（≤10 年）显著提升主要源于外源碳输入激发的微生物代谢活性；中期（11~20 年）SOC 储量提升效果增强，其机制可能涉及土壤团聚体发育增强有机碳物理封存^[28]；长期（≥21 年）增速趋缓可能与微生物底物利用效率下降有关^[29]。30 年以上持续施肥促使深层土壤（>40 cm）SOC 增量显著提升（ $P<0.05$ ），暗示长期碳输入可能通过溶解性有机碳（DOC）淋溶途径强化深层碳库建设。有机肥类型效应呈现显著垂直分异：表层土壤（0~20 cm）以鸡粪处理效果最优，这与其高比例易矿化有机质促进微生物同化作用密切相关；中层（20~40 cm）牛粪和猪粪处理分别通过纤维素组分改善孔隙结构、菌群互作提升碳转化效率^[30]；深层土壤（>40 cm）中鸡粪与农家肥的显著效应可能源于腐殖质-黏土矿物复合体的稳定性增强^[11]。有机粪肥施用量对 SOC 储量具有显著影响，结果表明，在 0~20 cm 土层，有机粪肥施用量与 SOC 储量呈显著相关关系（ $P<0.01$ ），该效应在 20~40 cm 土层逐步减弱（ $P<0.01$ ），而 >40 cm 土层无统计学显著性（图 6），这与 Liu 等^[31]的研究结果一致，表明有机粪肥显著影响表层土壤 SOC。有机粪肥中富含有机物质，施用后能够增加土壤中的有机碳输入，从而显著提升 SOC 储量。随着土壤深度的增加，有机粪肥与土壤的接触面积及混合程度逐渐减少，导致其对 SOC 储量的影响逐渐减弱，尤其是在 >40 cm 土层中，有机粪肥与 SOC 储量之间不再呈现显著相关性。



注：黑实线为有机碳储量的响应与土壤中初始有机碳、初始酸碱度、初始总氮、施氮量、施肥年限及有机粪肥施用量的相关回归曲线，灰色阴影区间为95%置信区间；n 为数据的样本量；P 为显著性检验。Note: The solid black line is the correlation regression curve of SOC stock response change, soil initial SOC, initial pH, initial TN, N rate, Organic manure years, and Organic manure application. The gray-shaded interval is a 95% confidence interval. n is the sample size of the data; P stands for the significance test.

图6 土壤有机碳储量的响应与土壤初始有机碳 (a)、初始酸碱度 (b)、初始全氮 (c)、施氮量 (d)、施肥年限 (e) 及有机粪肥施用量 (f) 的关系

Fig. 6 Relationship between the response of soil organic carbon stock and the initial SOC (a), initial pH (b), initial TN (c), N application rate (d), organic manure years (e), and organic manure application rate (f)

4 结论

本研究系统评估了有机粪肥施用对不同土层 SOC 含量和储量的影响，施用有机粪肥显著提高了各土层的 SOC 含量和储量，尤其在表层土壤（0~20 cm）中效果最为明显。气候因素如年均温度和年均降水量显著影响 SOC 储量对有机粪肥施用的响应。土壤固碳效率受自然因素（年均温、年均降水量）和人为因素（施肥类型、氮肥用量、土地利用方式、施用年限）的共同调控。其中，有机粪肥配施氮肥模式可显著提升表层土壤 SOC 储量。未来的研究可以进一步探索如何通过改进农业管理措施，实现更高效的碳固存，从而更好地应对全球气候变化带来的挑战。

参考文献 (References)

- [1] Liang Y T, Hu H, Crowther T W, et al. Global decline in microbial-derived carbon stocks with climate warming and its future projections[J]. National Science Review, 2024, 11(11): nwae330.
- [2] Li S, Delgado-Baquerizo M, Ding J X, et al. Intrinsic microbial temperature sensitivity and soil organic carbon decomposition in response to climate change[J]. Global Change Biology, 2024, 30(6): e17395.
- [3] Gao B, Huang T, Ju X T, et al. Chinese cropping systems are a net source of greenhouse gases despite soil carbon sequestration[J]. Global Change Biology, 2018, 24(12): 5590-5606.
- [4] Ma Y Q, Woolf D, Fan M S, et al. Global crop production increase by soil organic carbon[J]. Nature Geoscience, 2023, 16(12): 1159-1165.

- [5] Xiao L J, Wang G C, Wang M M, et al. Younger carbon dominates global soil carbon efflux[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(18): 5587-5599.
- [6] Zhang Y C, Wang P, Liu Y L, et al. Effects of long-term crop cultivation on soil organic carbon in China's farmland: A meta-analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(6): 1628-1638. [张迎春, 王萍, 刘亚龙, 等. 长期种植作物对中国农田土壤有机碳影响的 Meta 分析[J]. *土壤学报*, 2024, 61(6): 1628-1638.]
- [7] Button E S, Pett-Ridge J, Murphy D V, et al. Deep-C storage: Biological, chemical and physical strategies to enhance carbon stocks in agricultural subsoils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2022, 170: 108697.
- [8] Kirschbaum M U F, Don A, Beare M H, et al. Sequestration of soil carbon by burying it deeper within the profile: A theoretical exploration of three possible mechanisms[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2021, 163: 108432.
- [9] Wen S H, Chen J Y, Yang Z M, et al. Climatic seasonality challenges the stability of microbial-driven deep soil carbon accumulation across China[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(15): 4430-4439.
- [10] Hicks Pries C E, Ryals R, Zhu B, et al. The deep soil organic carbon response to global change[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2023, 54: 375-401.
- [11] Ren F L, Zhang R Q, Sun N, et al. Patterns and driving factors of soil organic carbon sequestration efficiency under various manure regimes across Chinese croplands[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 359: 108723.
- [12] Xia L L, Lam S K, Yan X Y, et al. How does recycling of livestock manure in agroecosystems affect crop productivity, reactive nitrogen losses, and soil carbon balance?[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(13): 7450-7457.
- [13] Yang X, Bao Y W, Li B W, et al. Effects of fertilization applications on soil aggregate organic carbon content and assessment of their influencing factors: A meta-analysis[J]. *Catena*, 2024, 242: 108135.
- [14] Simon C, Miltner A, Mulder I, et al. Long-term effects of manure addition on soil organic matter molecular composition: Carbon transformation as a major driver of energetic potential[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2025, 205: 109755.
- [15] 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.
- [16] 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: 154.
- [17] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. *Ecology*, 1999, 80(4): 1150.
- [18] Yin Y L, Chen Z, Gong H Q, et al. Soil organic carbon formation efficiency from straw/stover and manure input and its drivers: Estimates from long-term data in global croplands[J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(8): e17460.
- [19] Zhou Z H, Wang C K, Li Y E, et al. Carbon gain in upper but loss in deeper cropland soils across China over the last four decades[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2025, 122(1): e2422371122.
- [20] Xiao G M, Liu L, Zhao Y, et al. Effects of organic materials input on soil organic carbon in China based on Meta-analysis[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(8): 23-32. [肖广敏, 刘蕾, 赵诣, 等. 有机物料投入对中国农田土壤有机碳含量影响的整合分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(8): 23-32.]
- [21] Li S J, Ye S, Liu Z Q, et al. How does intercropping contribute to soil organic carbon accumulation?

- A global synthesis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 374: 109173.
- [22] Cai A D, Zhang W J, Yang P P, et al. Effect degree of fertilization practices on soil organic carbon and fraction of croplands in China—Based on meta-analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(15): 2995-3004. [蔡岸冬, 张文菊, 杨品品, 等. 基于 Meta-Analysis 研究施肥对中国农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(15): 2995-3004.]
- [23] Wei B, Wei Y Q, Guo T T, et al. Defoliation decreases soil aggregate stability by reducing plant carbon inputs and changing soil microbial communities[J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 244: 106180.
- [24] Li X S, Zhu W L, Xu F Y, et al. Organic amendments affect soil organic carbon sequestration and fractions in fields with long-term contrasting nitrogen applications[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 322: 107643.
- [25] Zhou Z H, Wang C K, Luo Y Q. Meta-analysis of the impacts of global change factors on soil microbial diversity and functionality[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 3072.
- [26] Tao F, Huang Y Y, Hungate B A, et al. Microbial carbon use efficiency promotes global soil carbon storage[J]. *Nature*, 2023, 618(7967): 981-985.
- [27] Zeng W J, Wang Z D, Chen X Y, et al. Nitrogen deficiency accelerates soil organic carbon decomposition in temperate degraded grasslands[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 881: 163424.
- [28] Sun L N, Han S. Microbial functional trait predicts soil organic carbon across soil aggregates in northeastern China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2025, 206: 109793.
- [29] Wang E Z, Yu B, Zhang J Y, et al. Low carbon loss from long-term manure-applied soil during abrupt warming is realized through soil and microbiome interplay[J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(22): 9658-9668.
- [30] Li B Z, Song H, Cao W C, et al. Responses of soil organic carbon stock to animal manure application: A new global synthesis integrating the impacts of agricultural managements and environmental conditions[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(20): 5356-5367.
- [31] Liu C, He C H, Chang S X, et al. Fertilization and tillage influence on soil organic carbon fractions: A global meta-analysis[J]. *Catena*, 2024, 246: 108404.
- [32] Huang W G, Kuzyakov Y, Niu S L, et al. Drivers of microbially and plant-derived carbon in topsoil and subsoil[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(22): 6188-6200.
- [33] Wang C Q, Kuzyakov Y. Soil organic matter priming: The pH effects[J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(6): e17349.
- [34] Zhou Z H, Ren C J, Wang C K, et al. Global turnover of soil mineral-associated and particulate organic carbon[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 5329.

(责任编辑: 檀满枝)