中国农业大学学报 2026,31(12):68-80
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

陈坚,王宏硕,刘亚,徐艺萍,盖君仪,曹银玲,吴宇,余维宝,周顺利,温媛. 有机物料深层还田对我国农田底土有机碳的影响:基于Meta分析[J]. 中国农业大学学报,2026,31(12):68-80.
CHEN Jian, WANG Hongshuo, LIU Ya, XU Yiping, GAI Junyi, CAO Yinling, WU Yu, YU Weibao, ZHOU Shunli, WEN Yuan. Effects of deep incorporation of organic materials on subsoil organic carbon in croplands of China: A meta-analysis[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(12): 68-80.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.12.06

有机物料深层还田对我国农田底土有机碳的影响:基于Meta分析

陈 坚 王宏硕 刘 亚 徐艺萍 盖君仪 曹银玲
吴 宇 余维宝 周顺利 温 媛*
(中国农业大学 农学院,北京 100193)

摘 要 为探究有机物料深层还田对我国农田底土有机碳(soil organic carbon, SOC)的影响及其调控机制,基于中国知网(CNKI)和Web of Science数据库中88篇相关文献的1 343组数据,采用Meta分析方法评估有机物料深层还田对0—20 cm表土和>20 cm底土SOC含量的影响,并通过随机森林解析关键影响因子。结果表明:与未进行有机物料深层还田相比,有机物料深层还田可显著提高底土SOC含量(15.6 %),95% CI为8.3%~23.3%,而对表土SOC无显著影响。不同类型有机物料中,秸秆深埋效果最为显著(+14.1%),95% CI为6.5%~22.3%,有机肥深施可提升底土SOC,但效应未达到显著水平。亚组分析结果表明,有机物料深层还田的底土SOC增幅随年平均温度、年平均降水量和初始总氮的增加而升高,且在初始SOC为5~15 g/kg的中性壤土中更有利于底土SOC的提升。随机森林分析表明,有机物料深层还田的底土SOC变化效应主要受试验时间和施氮量的影响。回归分析表明,试验时间与底土SOC变化存在显著非线性关系($P<0.05$),呈先升高后降低的单峰模式,施用14年时SOC的增幅达到最大值;施氮量与底土SOC变化也存在显著的非线性关系($P<0.05$);随施氮量增加,SOC增幅表现为先降低后回升并趋于平稳。综上,有机物料深层还田,尤其是秸秆深埋,是提升我国现有农田底土碳库的有效途径;在未来农业实践中,应综合考虑气候条件、土壤肥力背景及管理年限等因素,制定差异化的深层还田管理策略,可最大化底土固碳效益。

关键词 有机物料; 深层还田; 底土; 土壤有机碳; Meta分析
中图分类号 S3;S156 **文章编号** 1007-4333(2026)12-0068-13 **文献标志码** A

Effects of deep incorporation of organic materials on subsoil organic carbon in croplands of China: A meta-analysis

CHEN Jian, WANG Hongshuo, LIU Ya, XU Yiping, GAI Junyi, CAO Yinling, WU Yu, YU Weibao, ZHOU Shunli, WEN Yuan*
(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract To clarify the effects of deep incorporation of organic materials on subsoil organic carbon (SOC) in Chinese croplands and its regulatory mechanisms, this study conducted a meta-analysis based on 1 343 datasets extract from 88 field experiment publications obtained from the CNKI and Web of Science databases. The effects of deep organic material incorporation on SOC content in topsoil (0-20 cm) and subsoil (>20 cm) were

收稿日期:2026-03-10;接受日期:2026-04-29
基金项目:国家重点研发计划(2021YFD1500500);国家玉米产业技术体系(CARS-02-16)
第一作者:陈坚(ORCID:0009-0000-8973-1392),博士研究生,E-mail:18811739285@163.com
通讯作者:温媛(ORCID:0000-0002-9612-7975),副教授,主要从事农田生态系统固碳减排、土壤碳氮循环和作物-土壤-微生物互作系统研究,E-mail:wenyuan@cau.edu.cn

systematically evaluated, and key factors were identified using random forest analysis. The results showed that: Compared with no deep incorporation of organic materials, deep incorporation of organic materials significantly increased subsoil SOC content by 15.6% (95% CI: 8.3%-23.3%), while it had no significant effect on topsoil SOC. Among different organic material types, deep straw incorporation showed the most pronounced effect (+14.1%, 95% CI: 6.5%-22.3%). Compared with conventional surface application, deep application of organic manure showed a positive trend in subsoil SOC, but the effect did not reach statistical significance. Subgroup analyses revealed that the increase in subsoil SOC under deep organic material incorporation was enhanced with increasing mean annual temperature, mean annual precipitation, and initial total nitrogen, and the increase was more pronounced in neutral loamy soils with initial SOC of 5-15 g/kg. Random forest analysis indicated that changes in subsoil SOC under deep organic material incorporation were primarily driven by experiment duration and nitrogen application rate. Regression analysis further revealed that experiment duration showed a significant nonlinear relationship with subsoil SOC change ($P<0.05$), exhibiting a unimodal pattern, the maximum SOC increment was achieved at approximately 14th year. Nitrogen application rate also showed a significant nonlinear relationship with subsoil SOC change ($P<0.05$), with SOC increment initially declining before recovering and plateauing with increasing nitrogen input. In summary, deep incorporation of organic materials, particularly deep straw burial, represents an effective approach to enhance subsoil carbon stocks in Chinese croplands. In future agricultural practice, differentiated deep-incorporation management strategies should be developed based on comprehensive consideration of climatic conditions, soil fertility background, and management duration, so as to maximize subsoil carbon sequestration benefits.

Keywords　organic materials; deep incorporation; subsoil; soil organic carbon; meta-analysis

土壤有机碳是陆地生态系统碳库的重要组成部分，在调节大气CO_2浓度和应对气候变化中发挥着关键作用，也是衡量土壤肥力的重要指标[1]。通过提升土壤有机碳（SOC），有望解决全球86%的粮食短缺问题，提升作物产能并保障粮食安全[2]。2015年“千分之四倡议”的提出，使SOC固持问题受到广泛关注，突显其在气候变化适应和全球粮食安全保障中的重要价值[3]。尽管SOC含量随着土层深度增加呈递减趋势，但底土（>20 cm）储存了全球SOC总量的70%以上[4-5]。受限于管理难度、对底土固碳能力及其对作物生长促进作用的认知不足等因素，目前相关研究多集中于表土（0—20 cm），针对底土固碳的研究仍相对薄弱。近年来，越来越多的研究表明，底土具有巨大的、未被开发的固碳潜力[6-7]。因此，充分认识底土固碳潜力，有效发挥底土在提升土壤肥力和提高农业生产力方面的作用，对提升我国农田土壤固碳能力、保障粮食安全具有重要的意义。

底土具有与表土迥异的特性，SOC含量低于表土且“未饱和度”更高，并且底土微生物活性低，通气差、扰动更少，对SOC的矿化分解速率低于表土，有利于SOC的长期积累[8-9]。底土有机碳周转时间可长达数百年甚至上千年，表现出极高的稳定性[10-11]。这种持久性主要受三大机制驱动：1）低O_2浓度和养分匮乏的环境抑制了微生物的分解活性[11]；2）底土较高的矿物质含量可为SOC的稳定提供更强的矿物保护；3）底土中矿物结合态的有机碳比例大概为表土的1/2，具有更大的固碳潜力[12]。总之，底土因其“投入少、周转慢、稳定性高”的特性，成为重要的未被充分开发利用的潜在碳汇，通过增加底土的有机物料投入，可以实现长期碳固存。从作物生产角度，增加底土有机物料输入，不仅有助于提高土壤养分有效性，支持作物生长，而且可以通过SOC的战略性再分配，提高底土结构和质量，促进根系的伸长，增加养分吸收，促进作物生长；同时，根系的分泌物和残体使底土的碳输入增加，形成正反馈的固碳循环，有助于作物生长和对逆境的抵御，从而保障粮食生产的稳定性[13-14]。然而，也有研究表明，随着土壤深度增加，有机碳输入可能刺激微生物活性进而引发正、负激发效应，进一步加大了底土SOC动态变化的预测难度[15-16]。SOC积累与激发效应导致的原有SOC损失之间的权衡关系，也增加了底土管理的复杂性。

向土壤中添加有机物料（如秸秆、有机肥等）是提升SOC的重要途径[17-18]。传统秸秆还田方式主要包括秸秆覆盖还田、浅旋还田和深层还田。秸秆

长期覆盖或者浅旋还田(还田深度在0—20 cm)后,可能导致土壤温度过低或湿度过大,从而增加病虫害的发生风险,同时也不利于种子萌发和幼苗生长[19-20]。长期将秸秆混入表层土壤会导致表土层有机质增加缓慢,而深层相对贫瘠的现象,进而限制了SOC的固持潜力[21]。秸秆深层还田(>20 cm)可以打破犁底层,将有机物深埋土壤中,增加底土SOC,降低碳损失,对于改善底土土壤质量状况尤为明显,缓解了长期表土耕作带来的下层土壤养分匮乏、耕层变浅、土壤压实等问题[22-23],但深层还田通常需要大型动力和农机设备,投入成本高,适宜在机耕配套措施较好的地区大面积推广[24]。对于有机肥,常规施用方式主要通过旋耕将其与表层土壤混匀,但长期表层施用可能存在表土碳饱和等问题。已有研究发现,有机肥深层还田后可以快速增加底土SOC[25]。综上,与传统表层施用相比,有机物料深层还田在提升底土SOC、改善土壤质量方面具有明显优势,是挖掘底土固碳潜力、克服表土碳饱和限制的重要途径。

有机物料深层还田为克服底土肥力限制和提高作物产量提供了一种新型可行策略。然而,目前关于有机物料深层还田对我国农田底土SOC的整体影响,以及环境因子在其中所起的调控作用方面的系统研究尚未见报道。本研究基于中国知网(CNKI)和Web of Science数据库中88篇相关文献的1 343组数据,采用Meta分析系统评估有机物料深层还田对0—20 cm表土和>20 cm底土SOC含量的影响,并通过随机森林解析关键影响因子,旨在探究有机物料深层还田对我国农田底土SOC的总体影响和调控底土固碳效应的关键调控因子,以期为农田有机碳管理和底土碳汇潜力挖掘提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据收集

以“有机物料”“秸秆”“有机肥”“绿肥”“生物炭”“深层还田”“深施”“深埋”“底土”“有机碳”和“organic material”“straw”“manure”“green manure”“biochar”“deep incorporation”“deep placement”“deep burial”“subsoil”“deep soil”“organic carbon”“SOC”为关键词在中国知网(CNKI)和Web of Science数据库中检索截至2025年6月的有机物料深层还田相关论文。

将0—20 cm定义为表土,>20 cm定义为底土[4,7]。数据筛选遵循以下标准:1)在我国开展的有机物料深层还田试验,将有机物料深层还田至20 cm土层以下作为处理组,由于浅层还田和0—20 cm土层不施有机物料均未实现有机物料的深层输入,将二者均设定为对照组,以统一评估有机物料深层还田的相对效应。2)处理组和对照组的田间管理措施(如种植密度、水肥管理)保持一致。3)处理组和对照组均采用统一的测定方法获取土壤有机碳和环境参数等数据。4)具备明确的试验重复数及可计算的数据均值。5)明确记录试验地点和时间。若多篇文献数据源自同一田间试验,仅纳入最新发表的数据。按照要求进行筛选后,收集了88篇文献中的1 343条数据,包括46篇中文的626条数据和42篇英文的717条数据。

1.2 数据提取及整理

从文献中提取试验地点、气候类型、土壤类型、有机物料种类、施用深度、施用年限、采样深度、作物类型等基本信息,以及处理组和对照组的土壤有机碳含量均值、样本量。若文献仅以数据图形式呈现数据,则利用GetData Graph Digitizer软件进行数据提取。

1.3 数据分析

使用随机效应模型进行Meta分析,以评估有机物料深层还田措施的效应,通过处理组和对照组数据对的自然对数响应比($\ln R$)计算效应值,$\ln R$作为效应量指标,用以表征有机物料深层还田对土壤有机碳的影响程度,计算公式如下:

$$\ln R = \ln\left(\frac{x_t}{x_c}\right) = \ln x_t - \ln x_c$$

式中:x_t和x_c分别为处理组和对照组的数据均值。本研究使用试验重复数来计算各数据对的权重,权重的计算公式如下:

$$w_i = \frac{n_t \times n_c}{n_t + n_c}$$

式中:w_i为各数据对的权重,n_t和n_c分别为处理组和对照组的重复数。通过加权单项研究得到加权平均效应值($\ln R_{++}$),计算公式为:

$$\ln R_{++} = \frac{\sum(\ln R_i \times w_i)}{\sum w_i}$$

式中:$\ln R_i$为第i个数据对的效应值,加权平均效应值的95%置信区间(CI)通过下面的公式计算:

$$95\%\mathrm{CI}=\ln R_{++}\pm 1.96\mathrm{SE}_{\ln R_{++}}$$

$$\mathrm{SE}_{\ln R_{++}}=\sqrt{\frac{1}{\sum w_i}}$$

式中：$\mathrm{SE}_{\ln R_{++}}$为加权平均效应值的标准误；如果95%置信区间不包含0，则可认为处理组相比对照组显著（$P<0.05$）增加或减少。将加权平均效应值转换为平均百分比（E），以便于解释变化程度：

$$E=\left[\mathrm{e}^{\ln R_{++}}-1\right]\times 100\%$$

利用高斯函数对土壤有机碳含量的每个效应值（ln$R$）的频数分布进行正态分布拟合，可直观反映各组数据对的土壤有机碳含量效应值（ln$R$）的分布情况，计算公式如下：

$$y=a\times \mathrm{e}^{\frac{-(x-x_0)^2}{2b^2}}$$

式中：x为土壤有机碳含量在某一分布频数区间对应的ln$R$的平均值；y为ln$R$在某一区间的分布频数（即对应区间所包含ln$R$的个数）；a为当$x=x_0$时，对应的系数；x_0和b分别为ln$R$频数分布所拟合正态分布曲线的平均值和方差。

由于我国各农业生产区的气候条件、土壤条件和管理措施存在明显差异，本研究利用Meta亚组分析方法检验了各研究的平均气温、平均降水、初始SOC，初始总氮、土壤质地、试验持续时间、施氮量、作物和种植制度等分类变量对有机物料深层还田下SOC变化效应的影响。

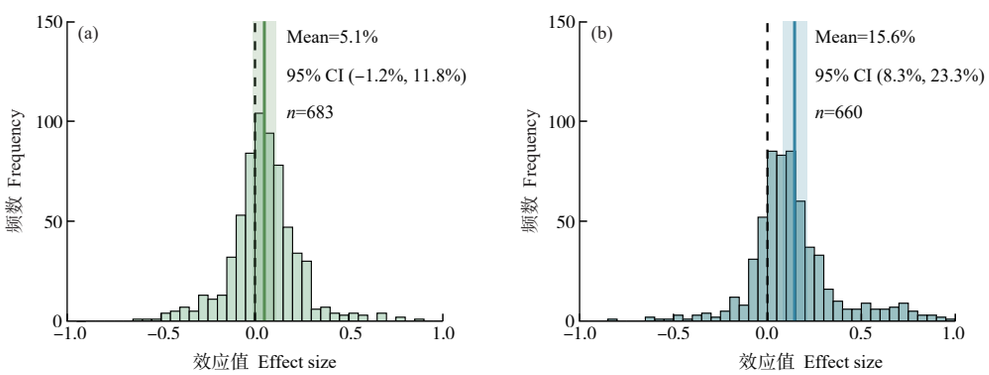
1.4　统计分析

采用Excel 2025建立数据库，并利用R软件进行Meta分析、统计检验及相关结果的绘制。Meta分析中根据异质性检验结果选用随机效应模型，随机森林重要性分析和绘图主要借助metafor和ggplot 2等程序包完成。

2　结果与分析

2.1　有机物料深层还田对SOC的影响

由图1和图2可知，相较于未进行有机物料深层还田的对照，有机物料深层还田显著提高了我国农田＞20 cm底土的SOC，从7.8 g/kg提升到9.0 g/kg，升高15.6%，95%CI为8.3%～23.3%，而对0—20 cm表土的SOC无显著影响。按有机物料类型划分，秸秆深层还田促进了我国农田底土SOC的提升，增加14.1%，95%CI为6.5%～22.3%，有机肥深层还田虽有提升＞20 cm底土SOC的趋势，但与有机物料未深层还田的对照相比无显著差异。秸秆和有机肥深层还田处理均未对0—20 cm表土的SOC产生显著影响。总体来看，有机物料深层还田增加了我国农田的底土SOC；其中，秸秆深层还田对底土SOC的促进效果最为显著。



表土指0—20 cm深度的土层，底土指＞20 cm的土层。下同。

Topsoil refers to the 0-20 cm soil layer, and subsoil refers to soil layers deeper than 20 cm. The same below.

图1　有机物料深层还田对表土（a）和底土（b）的SOC含量影响的效应值频数分布

Fig. 1　Frequency distribution of effect sizes for the impact of deep incorporation of organic materials on soil organic carbon content in the topsoil (a) and subsoil (b)

2.2　气候条件对有机物料深层还田下SOC变化效应的影响

由图3和图4可知，有机物料深层还田对底土SOC的提升效应受到试验地年平均气温（mean annual temperature，MAT）的显著影响，而对表土SOC变化效应影响不显著。与未进行有

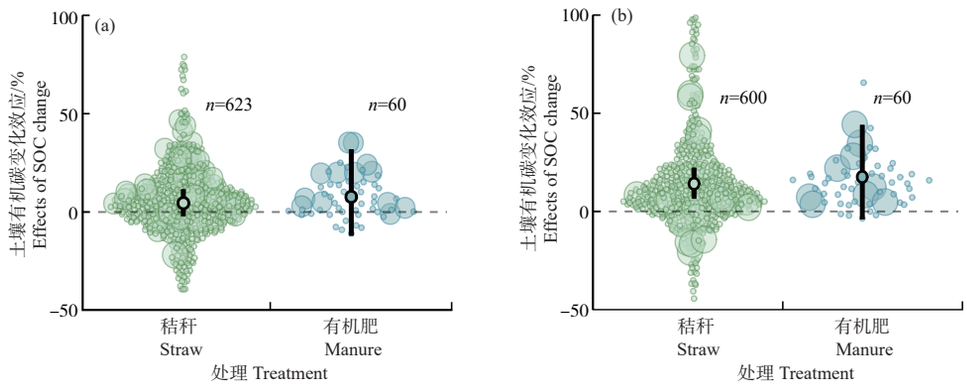


图 2 有机物料深层还田对表土(a)和底土(b)SOC 变化的效应

Fig. 2 Effects of deep incorporation of organic materials on SOC change in the topsoil (a) and subsoil (b)

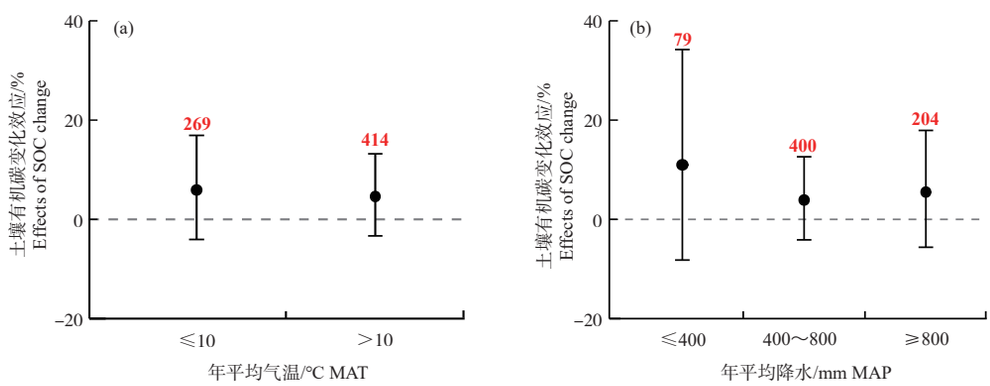
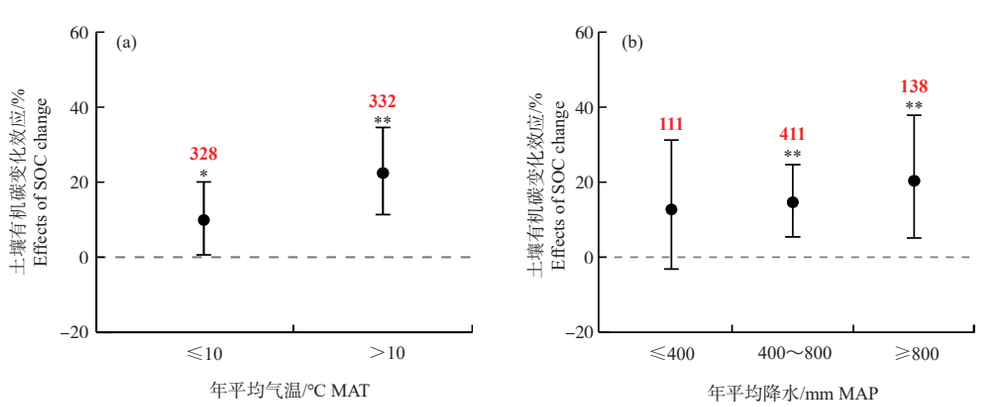


图 3 年平均气温(a)和年平均降水(b)对有机物料深层还田的表土 SOC 的影响

Fig. 3 Effects of mean annual temperature (MAT) (a) and mean annual precipitation (MAP) (b) on SOC change in topsoil under deep incorporation of organic materials

机物料深层还田的对照相比,有机物料深层还田的底土 SOC 变化效应呈增加的趋势,在 MAT >10 ℃的区域升高 22.4%($P<0.05$)。有机物料深层还田对底土 SOC 的提升效果也受到试验地年平均降水(mean annual precipitation, MAP)的影响,且在 MAP 为 400～800 和≥800 mm 区域,



*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上差异显著。下同。

* and ** indicate significant difference at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively. The same below.

图 4 年平均气温(a)和年平均降水(b)对有机物料深层还田的底土 SOC 的影响

Fig. 4 Effects of mean annual temperature (MAT) (a) and mean annual precipitation (MAP) (b) on SOC in subsoil under deep incorporation of organic materials

底土SOC分别较对照高约14.6%和20.4%（$P<0.05$）。

2.3 土壤理化性质对有机物料深层还田下SOC变化效应的影响

由图5和图6可知，有机物料深层还田下底土SOC的变化效应受到不同初始土壤性质的影响。土壤初始SOC对表土SOC变化效应无显著影响。与未进行有机物料深层还田的对照相比，当初始SOC在5～10和10～15 g/kg时，有机物料深层还田处理的底土SOC变化效应分别升高18.3%和14.8%（$P<0.05$）。初始土壤总氮（TN）对有机物料深层还田处理的底土SOC变化效应影响显著，初始TN≥1.5 g/kg时的增幅最大，为19.8%（$P<0.05$）。初始土壤pH也显著影响有机物料深层还田下底土SOC变化效应，其中土壤pH 6.5～7.5时，有机物料深层还田的底土SOC增幅最高，为21.3%（$P<0.05$），pH≥7.5的底土SOC升高13.3%（$P<0.05$）。土壤质地也显著影响有机物料深层还田的底土SOC变化效应，黏土条件下有机物料深层还田的底土SOC比对照增加13.5%（$P<0.05$）；壤土条件下有机物料深层还田的底土SOC增加25.1%（$P<0.05$）。

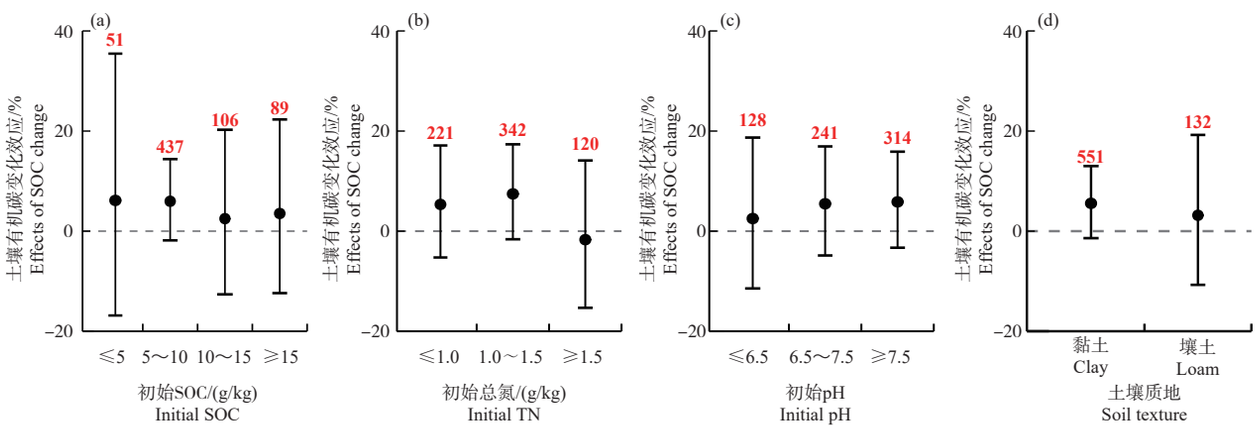


图5　初始SOC(a)、初始总氮(b)、初始pH(c)和土壤质地(d)对有机物料深层还田下表土SOC变化效应的影响

Fig. 5　Effects of initial SOC (a), initial total N (b), initial pH (c) and soil texture (d) on SOC change responses in topsoil under deep incorporation of organic materials

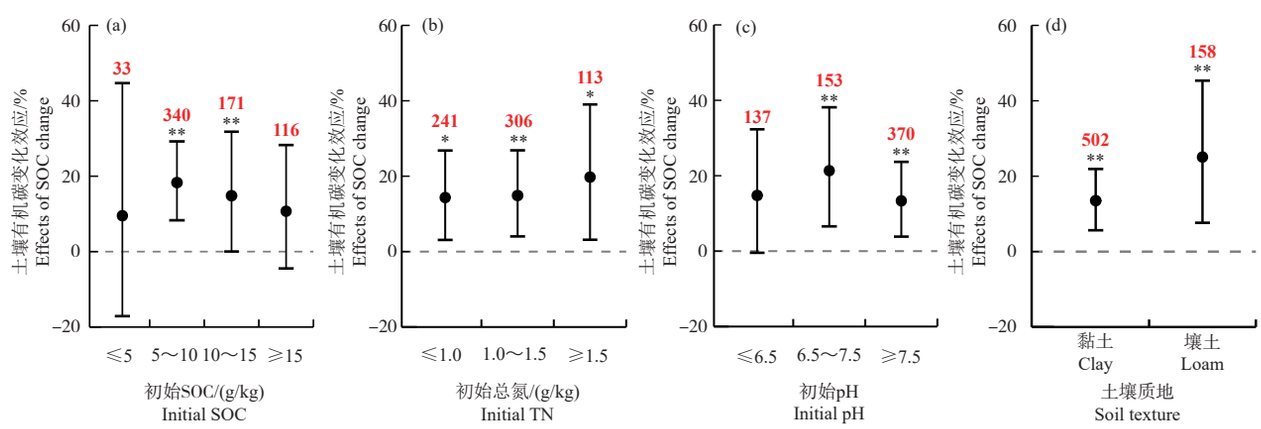


图6　初始SOC(a)、初始总氮(b)、初始pH(c)和 土壤质地(d)对有机物料深层还田下底土SOC变化效应的影响

Fig. 6　Effects of initial SOC (a), initial total N (b), initial pH (c) and soil texture (d) on SOC change responses in subsoil under deep incorporation of organic materials

2.4 农田管理措施对有机物料深层还田下SOC变化效应的影响

由图7和图8可知，有机物料深层还田的底土SOC变化效应受到农田管理措施的影响。农田管理措施对表土SOC变化效应无显著影响。与未进行有机物料深层还田的对照相比，在短期

试验中(试验时间≤5年),有机物料深层还田的底土SOC变化效应升高16.1%($P<0.05$)。中等施氮量(180~270 kg/hm²)条件下,有机物料深层还田的底土SOC升高22.7%($P<0.05$)。在作物类型方面,种植玉米时,有机物料深层还田的底土SOC变化效应升高17.7%($P<0.05$),而种植小麦和其他作物对有机物料深层还田的底土SOC变化效应无显著影响。种植制度也显著影响有机物料深层还田的底土SOC变化效应,一年一熟和一年两熟下有机物料深层还田的底土SOC变化效应分别比对照增加12.3%和20.7%($P<0.05$)。

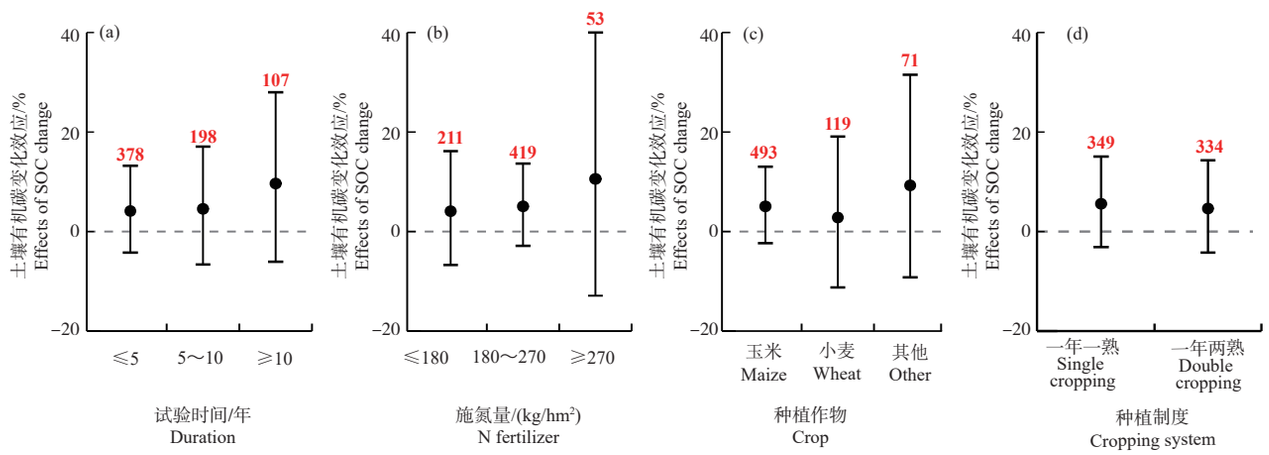


图7 试验时间(a)、施氮量(b)、种植作物(c)和种植制度(d)对有机物料深层还田下表土SOC变化效应的影响

Fig. 7 Effects of duration (a), N fertilizer rate (b), crop type (c) and cropping system (d) on SOC change responses in topsoil under deep incorporation of organic materials

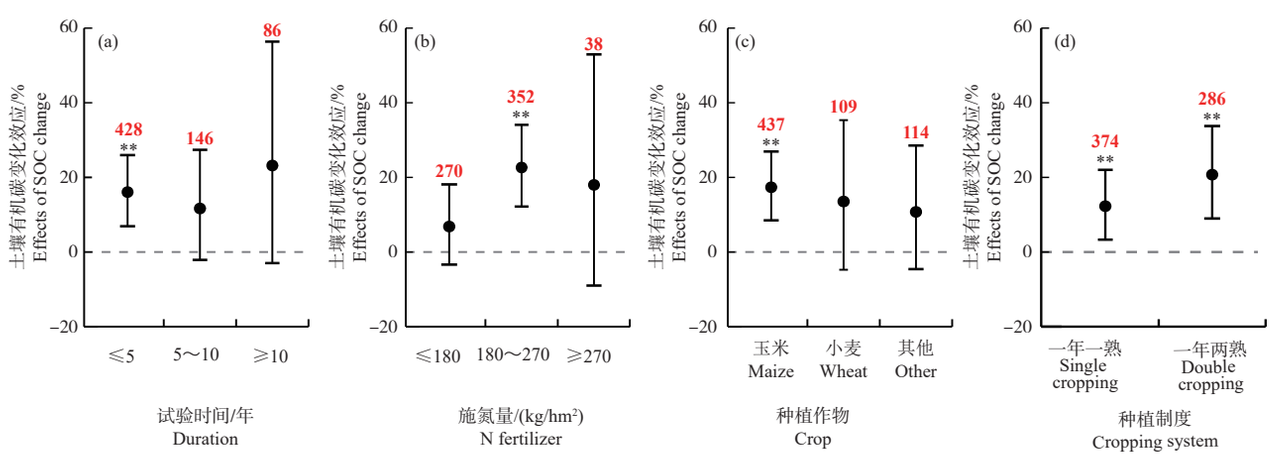


图8 试验时间(a)、施氮量(b)、种植作物(c)和种植制度(d)对有机物料深层还田下底土SOC变化效应的影响

Fig. 8 Effects of duration (a), N fertilizer rate (b), crop type (c) and cropping system (d) on SOC change responses in subsoil under deep incorporation of organic materials

2.5 随机森林重要性分析

由图9可知,有机物料深层还田下底土的SOC变化效应主要受到试验时间和施氮量的影响。

由图10可知,试验持续时间与底土SOC变化之间存在显著的非线性关系($P<0.05$)。在试验初期(≤5年),底土SOC增幅呈下降趋势,随着试验年限的延长,SOC增幅呈先升后降的单峰趋势,在约14年时达到峰值,此后逐渐下降。氮肥施用量与深层SOC变化同样呈显著的非线性关系($P<0.05$)。低氮施用条件下SOC响应值较高,随施氮量增加SOC的增幅先降低,达中等施氮量后开始回升并维持在相对稳定水平。

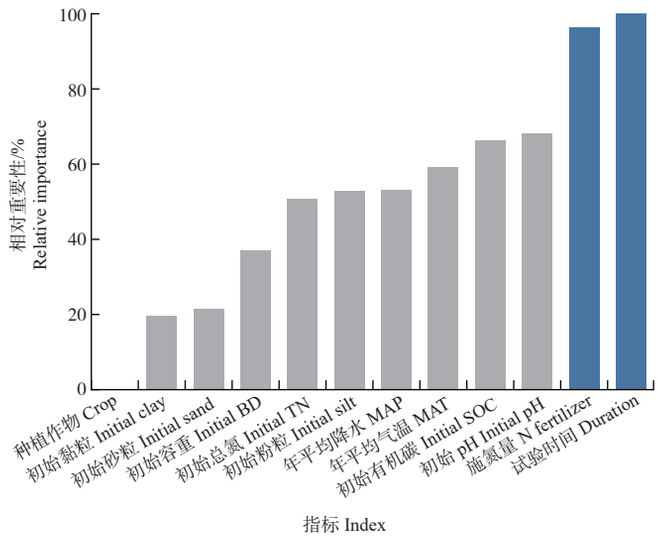


图 9　不同影响因子对有机物料深层还田的底土 SOC 变化效应的随机森林重要性

Fig. 9　Random forest importance of different influencing factors on subsoil SOC change effects under deep incorporation of organic materials

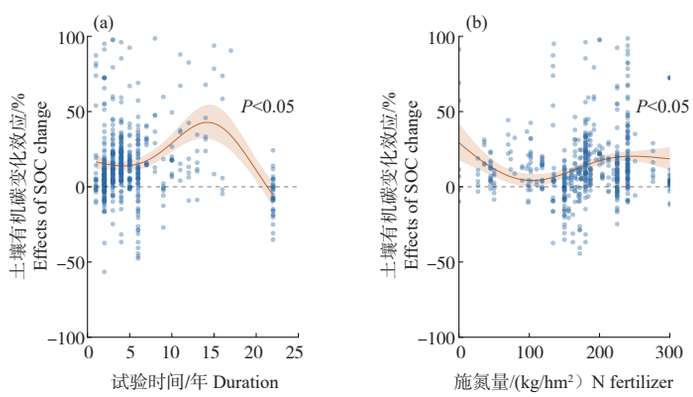


图 10　试验时间(a)和施氮量(b)对有机物料深层还田下底土 SOC 变化效应的回归分析

Fig. 10　Regression analysis of experiment duration (a) and nitrogen application rate (b) on subsoil SOC change effects under deep incorporation of organic materials

由图 11 可知，秸秆深层还田的底土 SOC 变化效应主要受到试验时间的影响，而有机肥深层还田下底土的 SOC 变化效应主要受到土壤初始总氮和施氮量的影响。

3　讨　论

3.1　有机物料深层还田促进底土 SOC 提升

农田土壤作为受人类活动影响最为显著的土壤类型之一，其固碳潜力的提升对实现农业可持续发展和“碳中和”目标具有重要意义[26-27]。已有研究发现，传统秸秆还田方式能够显著增加表土 SOC，但对底土 SOC 无显著影响，甚至可能造成底土的碳损失[28-29]。本研究中，有机物料深层还田对表土 SOC 无显著影响（图 2），可能由于有机物料集中于底土，其分解产物难以向上迁移补充至表土中，对表土碳库的贡献非常有限[13]。已有试验表明，有机物料深层还田是增加农田底土 SOC、改善土壤质量的重要农艺措施[30]。本研究整合分析证实，有机物料深层还田可显著提高我国农田底土的 SOC 含量，有机物料直接输入底土，在底土低温、低氧条件下，有利于真菌生长及微生物残体的积累，促进矿物结合态 SOC 和稳定团聚体的形成，从而增加底土 SOC 的积累[17, 31]。此外，秸秆深层还田显著提高了底土 SOC（图 2），已在不同的田间试验中得到验证，秸秆深埋可改善土壤的通气性，增强底土中微生物活性，改善底土根际环境，有利于促进土壤团聚体

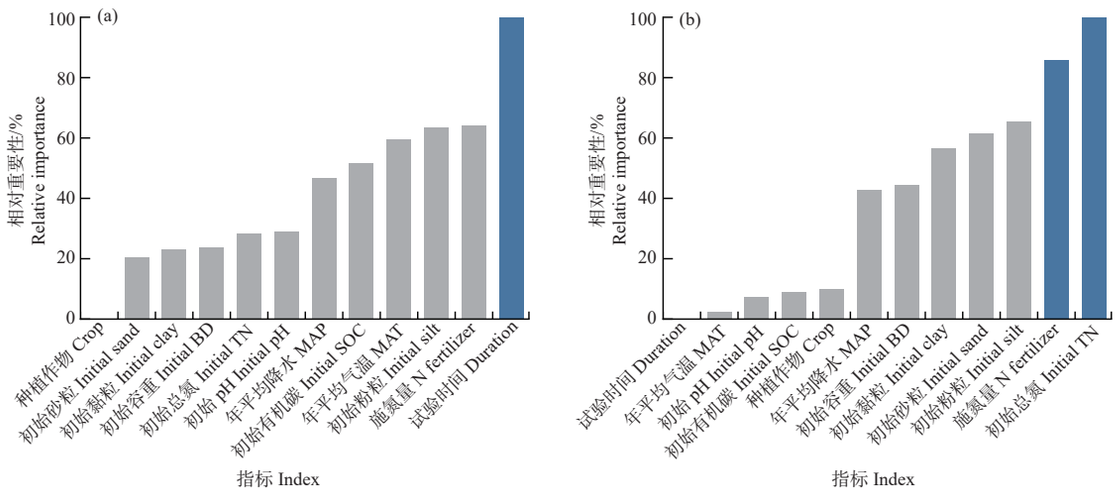


图 11 不同影响因子对秸秆(a)和有机肥(b)深层还田的底土 SOC 变化效应的随机森林重要性分析

Fig. 11 Random forest importance analysis of different influencing factors on subsoil SOC change effects under deep incorporation of straw (a) and organic manure (b)

形成，显著增加底土 SOC 含量以及大团聚体对 SOC 的贡献率[32-33]。本研究中有机肥深施对底土 SOC 的影响不显著（图 2），这可能与有机肥碳氮比较低、腐解速率较快有关，施入底土后 SOC 易被微生物快速分解矿化，短期难以形成稳定的 SOC 组分[34]。总体来看，有机物料深层还田通过多重协同机制可显著增强农田底土的固碳潜力，是提升 SOC 的有效途径。

3.2 气候、土壤和管理因素对有机物料深层还田下 SOC 变化效应的调控

气候条件变化会通过影响土壤的水热环境，进而影响 SOC 的周转[35]。本研究发现，气候条件是调节有机物料深层还田对 SOC 提升效应的重要环境变量（图 3 和图 4）。有机物料深层还田对底土 SOC 的影响效应受到年平均气温和年平均降水的影响，在平均气温 10～15 ℃和平均降水≥800 mm 的区域底土 SOC 提升最显著。表明适合的气温和较多的降水能够形成良好的土壤温-湿度环境，有利于土壤微生物的活动，促进有机物质分解[36]；而且底土碳变化可能与可溶性有机碳（DOC）迁移有关，水是 DOC 运输的主要介质，降水量的增加可能促进 DOC 的形成和移动，促进底土的 SOC 形成[37]。相比之下，有机物料深层还田对表土 SOC 的提升效应与气候条件无显著相关，这进一步凸显了底土碳库对环境的高敏感性，而表土碳库可能具有较强的环境缓冲能力[38]。

土壤本身的理化性质（如初始 SOC 含量、氮素水平、pH 和质地等）是决定外源碳能否被有效固持并转化为稳定碳库的重要基础[39]。土壤理化性质同样显著调控有机物料深层还田的底土固碳效应（图 5 和图 6）。本研究结果表明，在土壤初始 SOC 含量为 5～15 g/kg 的适中区间，有机物料深层还田后底土 SOC 得到显著提升，而在极低（SOC≤5 g/kg）和极高（SOC≥15 g/kg）的初始 SOC 背景下均不显著。在初始 SOC 极低的土壤中，往往缺乏稳定的大团聚体结构，新鲜有机物料的输入促进了长期处于“碳饥饿”状态的土壤微生物的呼吸代谢，而非转化为稳定的土壤碳库[40]。相反，初始 SOC 处于适中水平的土壤具备更好的物理结构基础，能够通过团聚体包裹有效保护新输入的有机质[41]，而高 SOC 的土壤则较难大量固持 SOC，可能达到土壤碳饱和阻碍了新的 SOC 形成[42]。不同土壤初始总氮含量也显著影响了有机物料深层还田的 SOC 变化，在土壤初始总氮含量极高（TN≥1.5 g/kg）条件下底土的固碳效果最好，这可能是因为在极低的土壤初始总氮环境下，微生物在分解高碳氮比的有机物料时出现了氮限制，随着氮素有效性的增加，促进了微生物的生长和碳的转化，形成了更多的 SOC[43]。本研究结果表明，有机物料深层还田后，底土 SOC 在中性条件（pH 6.5～7.5）下增幅高于酸性和碱性土壤，这可能是因为土壤 pH 是调控土壤微生物活性和酶功能的关键因素，pH 通过影响微生物群落结构及代谢效率调节碳循环过程[44]。黏土和壤土背景下，有机物料深层还田均显著提升了底土 SOC 含量，细颗粒

的黏粒具有更大的比表面积和丰富的表面电荷，能够与外源SOC及其降解产物迅速结合，不易被微生物降解利用[45]。相比之下，壤土的黏粒含量相对较低，其底土的固碳潜力高度依赖于颗粒态有机碳的积累和团聚体的物理保护[46]。

管理措施对底土SOC的动态平衡具有显著影响（图7和图8）。已有研究表明，短期试验（≤5年）显著增加了底土SOC，体现了有机物料深层还田固碳的快速积累效应[47]。在氮肥管理方面，中等施氮量（180～270 kg/hm^2）下底土SOC增幅最高，说明适量氮肥能通过优化土壤碳氮比激发微生物活性，并促进SOC的形成[33]。作物类型及种植制度同样可显著影响有机物料深层还田下SOC的变化，玉米作为C_4作物，其生物量高于其他作物，更多的作物残茬促进了底土SOC的积累[48]；一年两熟对有机物料深层还田下底土的SOC变化效应的影响高于一年一熟种植制度，这表明轮作种植通过优化周年碳输入的频次和强度，结合合理的作物多样化种植，可强化底土碳汇功能，是提升农田深层固碳效率的有效途径[49]。

3.3　有机物料深层还田下SOC变化效应的重要影响因子

已有研究表明，土地管理、土地利用变化及气候变化均会影响SOC变化，但不同驱动因素的相对重要性仍存在较大不确定性[50]。本研究基于随机森林重要性分析，发现有机物料深层还田下底土SOC变化主要受施氮量和试验时间等田间措施影响（图9）。由于高碳氮比的秸秆在深层还田后会导致底土碳氮比失衡，而适量施用氮肥可增加速效氮含量，有效降低秸秆碳氮比，促进土壤固碳[51]；另一方面，由于长期缺乏有机物的输入导致底土SOC相对较低，不容易达到碳饱和，初期有机物料的投入显著促进了底土SOC的增加，且底土SOC随着试验时间延长会持续增加；但长期的有机物料深层还田可能造成底土的碳饱和，降低固碳效率[52]。从有机物料类型看，秸秆深层还田的底土SOC变化主要受试验时间的影响，这可能与秸秆有机碳的缓慢分解矿化过程有关，秸秆进入底土后，其分解速率较慢，SOC的积累效应需要较长时间才能显现，因此试验持续时间成为决定底土SOC变化幅度的关键因素，而有机肥则主要受土壤初始总氮和施氮量的影响（图11），表明氮素供应水平对有机肥的碳转化与固持过程具有重要的调控作用。这说明，秸秆和有机肥深层还田对底土SOC的调控因素不同，在实际生产中应根据物料类型采取针对性的管理策略。

3.4　局限性及展望

本研究基于现有文献数据，对有机物料深层还田的底土固碳效应进行了系统整合，在现有研究条件下已尽量兼顾全面性和客观性，但仍会受制于当前研究广度和深度的限制。就数据收集而言，现有研究多以SOC含量作为报告指标，直接的土壤碳储量数据较少，土壤容重数据缺失使得有机碳含量与储量之间的转换困难，相关固碳效应的量化仍需大量数据的支持。受部分文献标准偏差数据缺失所限，本研究采用重复数（样本量）作为权重进行加权计算，这可能对合并效应值的估算精度产生一定影响，但也是Meta分析中标准偏差缺失较多时的常见做法。在有机物料类型方面，深层还田的已有研究主要围绕秸秆和有机肥展开，生物炭、绿肥等其他有机物料的研究相对有限，不同有机物料的碳含量差异对底土SOC变化的具体贡献也需要研究。随着田间长期定位试验的不断积累，进一步系统整合容重信息、细化还田深度分组以明确不同深度梯度对底土SOC固持效果的差异性影响、拓展有机物料种类、深入解析矿物结合态碳形成与微生物碳周转等微观固碳机制，将有助于更全面地认识深层还田的固碳潜力。

4　结　论

基于Meta分析发现，有机物料深层还田是提升农田底土SOC的有效途径，有机物料深层还田后，＞20 cm底土的SOC增加15.6%（P＜0.05），其中秸秆深埋还田显著增加了农田底土的SOC，而有机肥深施的效应不显著。底土的固碳潜力受“气候-土壤-管理”多因素协同调控，在温暖湿润气候、适当肥力（SOC为5～15 g/kg，TN≥1.5 g/kg）条件下，中性土壤（pH 6.5～7.5）和壤土中表现出更高的底土增碳潜力。有机物料深层还田下底土SOC主要受试验持续时间和施氮量的影响，其中秸秆深层还田主要受试验时间影响，而有机肥深层还田主要受氮素有效性影响。综上，有机物料深层还田有助于提升农田底土SOC，深层还田技术具有重要的农业固碳价值，在适宜区域推广应用可有效扩增土壤碳汇库容。

参考文献 References

[1] 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
Zhang W L, Kolbe H, Zhang R L. Research progress of SOC functions and transformation mechanisms[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(2): 317-331 (in Chinese)

[2] Ma Y Q, Woolf D, Fan M S, Qiao L, Li R, Lehmann J. Global crop production increase by soil organic carbon[J]. *Nature Geoscience*, 2023, 16(12):1159-1165

[3] Minasny B, Malone B P, McBratney A B, Angers D A, Arrouays D, Chambers A, Chaplot V, Chen Z S, Cheng K, Das B S, Field D J, Gimona A, Hedley C B, Hong S Y, Mandal B, Marchant B P, Martin M, McConkey B G, Mulder V L, O'Rourke S, Richer-de-Forges A C, Odeh I, Padarian J, Paustian K, Pan G, Poggio L, Savin I, Stolbovoy V, Stockmann U, Sulaeman Y, Tsui C C, Vågen T G, van Wesemael B, Winowiecki L. Soil carbon 4 per mille[J]. *Geoderma*, 2017, 292: 59-86

[4] Hicks Pries C E, Ryals R, Zhu B, Min K, Cooper A, Goldsmith S, Pett-Ridge J, Torn M, Berhe A A. The deep soil organic carbon response to global change[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2023, 54(1): 375-401

[5] 蔡健旋, 赵德强, 吴宇, 蒋勤, 塔新雨, 周顺利, 温媛. 农田深层土壤有机碳的固持机制与调控策略[J]. 土壤通报, 2025, 56(6): 1782-1791
Cai J X, Zhao D Q, Wu Y, Jiang Q, Ta X Y, Zhou S L, Wen Y. Mechanisms and regulation strategies for the deep soil organic carbon sequestration in agricultural ecosystems[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2025, 56(6): 1782-1791 (in Chinese)

[6] Zeng N, Zhao X P, Poisson G, Clifford B, Liu Y, Liu H, Meng T T, Picard L, Zeng-Mariotti E, Zaitchik B, Hu L B. 3775-year-old wood burial supports "wood vaulting" as a durable carbon removal method[J]. *Science*, 2024, 385(6716): 1454-1459

[7] 郭思宇, 周萍, 黄运湘, 郭晓彬, 陈香碧, 吴金水. 底土有机碳特征、影响因素与作用机理研究进展[J]. 湖南生态科学学报, 2023, 10(3): 77-84
Guo S Y, Zhou P, Huang Y X, Guo X B, Chen X B, Wu J S. Research progress on the characteristics, influencing factors and mechanisms of subsoil organic carbon[J]. *Journal of Hunan Ecological Science*, 2023, 10(3): 77-84 (in Chinese)

[8] Button E S, Pett-Ridge J, Murphy D V, Kuzyakov Y, Chadwick D R, Jones D L. Deep-C storage: Biological, chemical and physical strategies to enhance carbon stocks in agricultural subsoils[J/OL]. *Soil Biology and Biochemistry*, (2022-05-17), DOI:doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108697

[9] Kan Z R, Li Z Z, Amelung W, Zhang H L, Lal R, Bol R, Bian X M, Liu J, Xue Y G, Li F M, Yang H S. Soil carbon accrual and crop production enhanced by sustainable subsoil management[J]. *Nature Geoscience*, 2025, 18(7): 631-638

[10] Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, Mooney H A, Sala O E, Schulze E D. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes[J]. *Oecologia*, 1996, 108(3): 389-411

[11] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, Dittmar T, Guggenberger G, Janssens I A, Kleber M, Kögel-Knabner I, Lehmann J, Manning D A C, Nannipieri P, Rasse D P, Weiner S, Trumbore S E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. *Nature*, 2011, 478(7367): 49-56

[12] Georgiou K, Jackson R B, Vindušková O, Abramoff R Z, Ahlström A, Feng W, Harden J W, Pellegrini A F A, Polley H W, Soong J L, Riley W J, Torn M S. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon[J/OL]. *Nature Communications*, (2022-07-01). DOI:doi.org/10.1038/s41467-022-31540-9

[13] Wu G, Ling J, Zhao D Q, Xu Y P, Liu Z X, Wen Y, Zhou S L. Deep-injected straw incorporation improves subsoil fertility and crop productivity in a wheat-maize rotation system in the North China Plain[J/OL]. *Field Crops Research*, (2022-10-01). DOI:doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108612

[14] Schneider F, Don A, Hennings I, Schmittmann O, Seidel S J. The effect of deep tillage on crop yield:What do we really know?[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 174: 193-204

[15] Fontaine S, Barot S, Barré P, Bdioui N, Mary B, Rumpel C. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply[J]. *Nature*, 2007, 450(7167): 277-280

[16] Hu Y L, Feng J G, Zhang S, Luo Z K, Zhu B. Depth-dependent regulations of soil priming effects along a 2000 km grassland transect[J/OL]. *Soil Biology and Biochemistry*, (2024-12-19). DOI:10.1016/j.soilbio.2024.109696

[17] 张玉铭, 胡春胜, 陈素英, 王玉英, 李晓欣, 董文旭, 刘秀萍, 裴林, 张惠. 耕作与秸秆还田方式对碳氮在土壤团聚体中分布的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(9): 1558-1570
Zhang Y M, Hu C S, Chen S Y, Wang Y Y, Li X X, Dong W X, Liu X P, Pei L, Zhang H. Effects of tillage and straw returning method on the distribution of carbon and nitrogen in soil aggregates[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(9): 1558-1570 (in Chinese)

[18] 张雨轩, 杨启良, 冯浩, 陈骥, 李悦. 秸秆还田对农田土壤有机碳和全氮影响的Meta分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2026, 34(2): 344-356
Zhang Y X, Yang Q L, Feng H, Chen J, Li Y. Meta-analysis shows the effects of straw return on soil organic carbon and total nitrogen in cropland [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2026, 34(2): 344-356 (in Chinese)

[19] Fan W, Liang Y, Yan J, Liu J, Yuan J, Wang L, Ren J, Cai H. Creation and application of a full soil layer fertilization technology model for continuous maize cultivation with straw return in black soil of Northeast China[J]. *Moscow University Soil Science Bulletin*, 2024, 79(5): 684-692

[20] Deines J M, Guan K Y, Lopez B, Zhou Q, White C S, Wang S, Lobell D B. Recent cover crop adoption is associated with small maize and soybean yield losses in the United States[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(3): 794-807

[21] Xu J, Han H F, Ning T Y, Li Z J, Lal R. Long-term effects of tillage and straw management on soil organic carbon, crop yield, and yield stability in a wheat-maize system[J]. *Field Crops Research*, 2019, 233: 33-40

[22] 王治统, 凌俊, 刘子熙, 赵德强, 李泽学, 周顺利, 袁兴茂, 李霄鹤, 温媛. 秸秆还田方式对土壤理化性质和玉米产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(4): 663-674
Wang Z T, Ling J, Liu Z X, Zhao D Q, Li Z X, Zhou S L, Yuan X M, Li X H, Wen Y. Effect of straw return practices on soil physico-chemical properties and maize yield[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(4): 663-674 (in Chinese)

[23] 匡恩俊, 迟凤琴, 张久明, 宿庆瑞, 高中超, 朱宝国. 不同耕作方式与有机物料配施后对土壤主要特性的影响[J]. 土壤与作物, 2019, 8(4): 395-404
Kuang E J, Chi F Q, Zhang J M, Su Q R, Gao Z C, Zhu B G. Effects of different tillage methods with organic materials application on main soil properties[J]. *Soil and Crop*, 2019, 8(4): 395-404 (in Chinese)

[24] 李瑞平, 罗洋, 隋鹏祥, 王浩, 刘武仁, 郑金玉. 黑土区不同秸秆还田方式对玉米产量及经济效益的影响[J]. 中国农业大学学报, 2026, 31(2): 67-81
Li R P, Luo Y, Sui P X, Wang H, Liu W R, Zheng J Y. Effects of different straw returning methods on maize yield and economic benefits in black soil region[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(2): 67-81 (in Chinese)

[25] 陆欣春，范欣欣，邹文秀，严君，陈旭，韩晓增，邓维娜．肥沃耕层构建对白浆土土壤肥力和玉米产量的影响[J]．应用生态学报，2023，34(4)：883-891
Lu X C，Fan X X，Zou W X，Yan J，Chen X，Han X Z，Deng W N. Effects of the construction of fertile and cultivated soil layer on soil fertility and maize yield in Albic soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*，2023，34(4)：883-891(in Chinese)

[26] 王浩成，杨滨娟，梁效贵，胡启良，李娜，黄国勤．中国农田土壤有机碳库及其影响因素研究述评[J]．生态科学，2024，43(2)：260-270
Wang H C，Yang B J，Liang X G，Hu Q L，Li N，Huang G Q. A review of researches on cropland soil organic carbon pool and its influencing factors in China[J]. *Ecological Science*，2024，43(2)：260-270(in Chinese)

[27] 赵明月，刘源鑫，张雪艳．农田生态系统碳汇研究进展[J]．生态学报，2022，42(23)：9405-9416
Zhao M Y，Liu Y X，Zhang X Y. A review of research advances on carbon sinks in farmland ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*，2022，42(23)：9405-9416(in Chinese)

[28] Jiang R，Liu S，Jiang F H，Guo Z C，Adingo S，Chen Z M，Gao L，Peng X H. Soil organic carbon trade-offs under conservation tillage：Carbon stock versus stability mediated by particulate and mineral-associated fractions[J/OL]. *Soil and Tillage Research*，(2025-06-05). DOI：doi.org/10.1016/j.still.2025.106704

[29] 王旭东，庄俊杰，刘冰洋，李帅帅，赵鑫，刘洋，张海林．秸秆还田条件下中国农田土壤有机碳含量变化及其影响因素的Meta分析[J]．中国农业大学学报，2020，25(8)：12-24
Wang X D，Zhuang J J，Liu B Y，Li S S，Zhao X，Liu Y，Zhang H L. Residue returning induced changes in soil organic carbon and the influential factors in China's croplands：A meta-analysis[J]. *Journal of China Agricultural University*，2020，25(8)：12-24(in Chinese)

[30] Feng Q，An C J，Chen Z，Wang Z. Can deep tillage enhance carbon sequestration in soils? A meta-analysis towards GHG mitigation and sustainable agricultural management[J/OL]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*，(2020-08-28). DOI：doi.org/10.1016/j.rser.2020.110293

[31] Luo Z K. Big soil benefits from buried straw[J]. *Nature Geoscience*，2025，18(7)：570-571

[32] Zhao D Q，Wu Y，Liu Z X，Yu W B，Xu Y P，Wang Z T，Li Z X，Zhou S L，Wen Y. Straw deep incorporation improves subsoil and rhizosphere soil microenvironment to increase wheat yield[J/OL]. *European Journal of Agronomy*，(2025-11-14). DOI：doi.org/10.1016/j.eja.2025.127921

[33] 马玉洁，李旭，翟英芳，李敬宇，付鑫，彭正萍．秸秆还田方式和施氮量对土壤有机碳组分及酶活性的影响[J]．中国农业科学，2025，58(12)：2397-2410
Ma Y J，Li X，Zhai Y F，Li J Y，Fu X，Peng Z P. Effects of straw returning methods and nitrogen application rates on soil organic carbon components and enzyme activity[J]. *Scientia Agricultura Sinica*，2025，58(12)：2397-2410(in Chinese)

[34] 裴浩，苗宇，侯瑞星．全球黑土区有机物料还田对土壤有机碳固存影响的Meta分析[J]．农业工程学报，2023，39(16)：79-88
Pei H，Miao Y，Hou R X. Meta analysis of the effects of global organic material returning on soil organic carbon sequestration in Mollisols[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*，2023，39(16)：79-88(in Chinese)

[35] 黄伟根，倪浩为，黄瑞林，王晓玥，孙波，梁玉婷．不同气候条件下土壤有机碳水热响应驱动机制研究[J]．土壤学报，2024，61(5)：1260-1270
Huang W G，Ni H W，Huang R L，Wang X Y，Sun B，Liang Y T. Driving mechanism of soil organic carbon response to increase hydrothermal conditions in different climatic regimes[J]. *Acta Pedologica Sinica*，2024，61(5)：1260-1270(in Chinese)

[36] Silver W L，Miya R K. Global patterns in root decomposition：Comparisons of climate and litter quality effects[J]. *Oecologia*，2001，129(3)：407-419

[37] Sierra C A，Ahrens B，Bolinder M A，Braakhekke M C，von Fromm S，Kätterer T，Luo Z K，Parvin N，Wang G C. Carbon sequestration in the subsoil and the time required to stabilize carbon for climate change mitigation[J/OL]. *Global Change Biology*，(2024-01-21). DOI：doi.org/10.1111/gcb.17153

[38] Peng Z H，van der Heijden M G A，Liu Y，Li X M，Pan H B，An Y N，Gao H，Qi J J，Gao J M，Qian X，Tiedje J M，Wei G H，Jiao S. Agricultural subsoil microbiomes and functions exhibit lower resistance to global change than topsoils in Chinese agroecosystems[J]. *Nature Food*，2025，6(4)：375-388

[39] 冯伟辉，文波龙，孙晓新，罗那那，杨静．土壤有机碳的稳定机制及其影响因子[J]．云南农业大学学报：自然科学，2025，40(3)：175-188
Feng W H，Wen B L，Sun X X，Luo N N，Yang J. Stability mechanism and influencing factors of soil organic carbon[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University：Natural Science*，2025，40(3)：175-188(in Chinese)

[40] Kuzyakov Y. Priming effects：Interactions between living and dead organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*，2010，42(9)：1363-1371

[41] Six J，Conant R T，Paul E A，Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter：implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*，2002，241(2)：155-176

[42] Georgiou K，Angers D，Champiny R E，Cotrufo M F，Craig M E，Doetterl S，Grandy A S，Lavallee J M，Lin Y，Lugato E，Poeplau C，Rocci K S，Schweizer S A，Six J，Wieder W R. Soil carbon saturation：What do we really know?[J/OL]. *Global Change Biology*，(2025-05-09). DOI：doi.org/10.1111/gcb.70197

[43] Wang W Y，Ding S J，Guo T F，Xu X P，He P，Huang S M. Organic amendment strategies differentially regulate microbial carbon use efficiency：A long-term field study integrating microorganism and enzymatic stoichiometry[J/OL]. *Agriculture Ecosystems and Environment*，(2026-02-28). DOI：doi.org/10.1016/j.agee.2025.110051

[44] Lin B J，Li R C，Liu K C，Pelumi Oladele O，Xu Z Y，Lal R，Zhao X，Zhang H L. Management-induced changes in soil organic carbon and related crop yield dynamics in China's cropland[J]. *Global Change Biology*，2023，29(13)：3575-3590

[45] Nazir M J，Li G L，Nazir M M，Zulfiqar F，Siddique K H M，Iqbal B，Du D L. Harnessing soil carbon sequestration to address climate change challenges in agriculture[J/OL]. *Soil and Tillage Research*，(2023-11-25). DOI：doi.org/10.1016/j.still.2023.105959

[46] Lavallee J M，Soong J L，Cotrufo M F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century[J]. *Global Change Biology*，2020，26(1)：261-273

[47] 肖广敏，刘蕾，赵诣，茹淑华，赵欧亚，侯利敏，孙世友，王凌，王策．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
Xiao G M，Liu L，Zhao Y，Ru S H，Zhao O Y，Hou L M，Sun S Y，Wang L，Wang C. Effects of organic materials input on soil organic carbon in China based on Meta-analysis[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*，2023(8)：23-32(in Chinese)

[48] 房佰涵，吴一博，杨淞翔，闵伟．不同秸秆还田量对干旱区棉田土壤理化性质和棉花生长的影响[J]．新疆农业科学，2025，62(9)：2081-2091
Fang B H，Wu Y B，Yang S X，Min W. Effects of different straw return amounts on soil physicochemical properties and cotton growth in cotton fields in arid areas[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*，2025，62(9)：2081-2091(in Chinese)

[49] Chen J S, Shi Z, Tian Y G, Li H R, Duan H X, Qin Z H, Cheng J, Dang Y P, Lin B J, Zhao X, Zhang H L. From growth to decline: The dynamic effects of maize-based cropping systems on soil organic carbon storage in Northeast China[J/OL]. *Agriculture Ecosystems & Environment*,(2025-11-01). DOI:doi.org/10.1016/j.agee.2025.109825

[50] Beillouin D, Cardinael R, Berre D, Boyer A, Corbeels M, Fallot A, Feder F, Demenois J. A global overview of studies about land management, land-use change, and climate change effects on soil organic carbon[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(4): 1690-1702

[51] Sun Y X, Wang X, Zhang Y Y, Duan W H, Xia J Y, Wu J H, Deng T. Vegetation types can affect soil organic carbon and $\delta^{13}C$ by influencing plant inputs in topsoil and microbial residue carbon composition in subsoil[J/OL]. *Sustainability*,(2024-05-27). DOI:doi.org/10.3390/su16114538

[52] 徐嘉晖, 高雷, 孙颖, 崔晓阳. 大兴安岭森林土壤矿物结合态有机碳与黑碳的分布及土壤固碳潜力[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 236-246
Xu J H, Gao L, Sun Y, Cui X Y. Distribution of mineral-bonded organic carbon and black carbon in forest soils of Great Xing'an Mountains, China and carbon sequestration potential of the soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(1): 236-246 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 陈坚,中国农业大学农学院作物生理学专业博士研究生。硕士毕业于中国农业科学院研究生院,2022—2023年荣获学业一等奖学金。攻读博士期间参与国家重点研发计划青年科学家项目(2021YFD1500500),目前以第一作者身份发表论文3篇。



通讯作者简介: 温媛,博士,现为中国农业大学农学院副教授,博士生导师。主要研究方向为农田生态系统固碳减排,土壤碳氮循环和作物-土壤-微生物互作系统。2017年博士毕业于德国哥廷根大学(University of Goettingen),之后在英国班戈大学(Bangor University)从事博士后工作。2019年以优秀人才引入中国农业大学农学院作物生理与栽培学系。以第一作者或通讯作者在*Nature Food*、*Soil Biology and Biochemistry*, *Resources Conversation & Recycling*, *Field Crops Research*等期刊发表SCI论文20余篇。主持国家重点研发计划青年科学家项目,国家自然科学基金等国家和省部级项目3项。受邀担任*Land Degradation & Development*领域副主编,*Frontier in Agronomy*杂志编委,*Journal of Integrative Agriculture*青年编委,《应用生态学报》青年编委,中国土壤学会青年工作委员会委员,*Agriculture*专刊编委,参与*Nature Climate Change*, *One Earth*, *Global Change Biology*等期刊审稿。