

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.01.025

马子钰, 马文林. 秸秆还田对中国农田土壤固碳效应影响的研究. 土壤, 2023, 55(1): 205–210.

## 秸秆还田对中国农田土壤固碳效应影响的研究<sup>①</sup>

马子钰, 马文林\*

(北京建筑大学环境与能源工程学院北京应对气候变化研究和人才培养基地, 北京 102616)

**摘要:** 采用 Meta 分析法定量研究了秸秆还田对中国农田土壤有机碳(SOC)含量的影响及影响因素。结果表明: 秸秆还田比不还田可显著增加 SOC 含量, 但随土壤深度加大, SOC 的增加效果呈现下降趋势。同时, 秸秆还田土壤的固碳速率随还田年限的增加而显著减小( $P<0.01$ ), 秸秆还田 3 ~ 5、6 ~ 9 a 及  $\geq 10$  a 土壤的固碳速率分别为 0.58、0.19 和 0.09 g/(kg·a)。此外, 在施氮量 100 ~ 400 kg/hm<sup>2</sup>、年均温度  $\geq 13^\circ\text{C}$ 、年均降水量  $\geq 800$  mm 和初始土壤 C/N  $\geq 10$  条件下, 0 ~ 20 cm 土层的固碳作用表现较佳, 而超过 20 cm 深度的土壤固碳作用受上述因素影响效果不显著。

**关键词:** 秸秆利用; 土壤有机碳; Meta 分析; 气候变化

**中图分类号:** S146.1; S19      **文献标志码:** A

### Effects of Straw Returning on Soil Organic Carbon in China's Cropland—A Meta-analysis

MA Ziyu, MA Wenlin\*

(Beijing Climatic Change Response Research and Education Center, School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China)

**Abstract:** A meta-analysis was conducted in this study to assess the effect of straw returning (SR) on soil organic carbon (SOC) and to reveal SOC sequestration influencing factors. The results show that compared with the treatment of no straw return, SR can significantly increase SOC content, but the effect is decreased with increasing soil depth and with returning duration ( $P<0.05$ ), the net annual mean SOC change rates (NAC) are 0.58, 0.19 and 0.09 g/(kg·a) when straw returning duration are 3–5, 6–9 and more than 10 years, respectively. Soil sequestration performs well in topsoil (0–20 cm) under proper N fertilizer input (100–400 kg/hm<sup>2</sup>), high annual mean temperature ( $\geq 13^\circ\text{C}$ ) and precipitation ( $\geq 800$  mm) as well high soil initial C/N ratio, but soil below 20 cm depth is not significantly susceptible to these factors.

**Key words:** Straw utilization; Soil organic carbon (SOC); Meta-analysis; Climate change

我国每年秸秆产生量约 9 亿 t<sup>[1]</sup>, 针对农田土壤有机碳(SOC)含量较低的现状<sup>[2]</sup>, 采取秸秆还田措施可有效提升 SOC 含量, 有利于实现资源高效利用和减缓气候危机。研究发现, 气候条件、施氮量、土地利用以及秸秆还田方式等因素都会影响秸秆还田对提升 SOC 含量的效果<sup>[3]</sup>, 但影响情况各异。徐虎等<sup>[4]</sup>在山西省寿阳县的玉米田试验中发现, 秸秆过腹还田可以显著增加表层 SOC 含量, 但覆盖还田和粉碎还田却使得深层土壤 SOC 含量减少; 李玉梅等<sup>[5]</sup>在黑龙江省牡丹江镇的玉米田试验中发现, 免耕秸秆还田可促进 0 ~ 20 cm 土壤固碳, 而秸秆翻耕还田却更有

利于深度大于 20 cm 土壤层的固碳效果。

Meta 分析对整合大量结果不一致的同类研究有较好的应用<sup>[6-7]</sup>。Lu<sup>[8]</sup>运用 Meta 分析发现, 秸秆还田可显著增加 0 ~ 20 cm 土层 SOC 含量, 且长期施加粉碎秸秆更有利于提升 SOC 含量; Tian 等<sup>[9]</sup>通过整合大量研究得出, 在重新达到土壤碳库平衡前, 化肥配施秸秆处理比单施化肥处理可以固定更多 SOC。然而, 上述研究中均未考虑施氮量及气候条件等因素的影响。因此, 为获得更精准的研究结果, 本文通过严格收集相关文献, 研究了秸秆还田对我国农田 SOC 含量的影响及影响因素。

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFF0211703)、北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项(X19009)和北京市生态循环与低碳发展创新团队项目(BAIC08-2022)资助。

\* 通讯作者(mawenlin1130@126.com)

作者简介: 马子钰(1998—), 男, 北京人, 硕士研究生, 主要从事土壤温室气体排放评估研究。E-mail: mzyBUCEA@126.com

## 1 材料与方 法

### 1.1 数据来 源

本研究以秸秆还田对中国农田 SOC 影响的田间试验为主题,使用“秸秆(straw)”“土壤有机碳(SOC、soil organic carbon)”“土壤有机质(SOM、soil organic matter)”等关键词,从中国知网(<http://www.cnki.net/>)、Science Direct(<https://www.sciencedirect.com/>)检索有关秸秆还田对中国农田 SOC 影响的中英文文献。

对所收集到的文献采用如下标准筛选:①试验地点位于中国境内,且试验气候条件、试验位置等信息明确;②除秸秆还田外,施肥、耕作等人为农田管理方式相同;③试验时间不少于 3 a;④试验为至少设置 3 次重复的大田试验;⑤至少包含以 g/kg 为单位的试验前后 SOC(SOM)数值;⑥对于多篇试验数据重复的文献,只保留数据最完整的一篇。经过筛选,得到 42 篇符合要求的文献、194 对有效数据,试验地点主要分布在华东、西北、东北、华北地区,少数位于西南和华中地区。

### 1.2 数据提取

本研究分别以秸秆不还田、还田为对照组(CK)和试验组(EX),从 42 篇文献中提取符合 1.1 节中数据要求的试验组对数据信息,包括年均降水量、年均温度、试验末期农田 SOC 含量等,并将土壤分为表层土( $\leq 20$  cm)和深层土( $> 20$  cm),研究不同影响因素对不同深度土壤 SOC 含量的影响。对于以 SOM 表示的土壤碳库变化,将 SOM 乘以因子 0.58 转换为 SOC<sup>[10]</sup>。

### 1.3 数据分析

1)效应值选取。为减小由于环境条件等引起的不同研究间的随机误差<sup>[11]</sup>,采用随机效应模型,按照式(1)计算秸秆还田土壤年均固碳速率(NAC)作为效应值:

$$NAC = \frac{(SOC_t - SOC_0)_{EX} - (SOC_t - SOC_0)_{CK}}{t} \quad (1)$$

式中:  $SOC_t$  和  $SOC_0$  分别为 EX 组和 CK 组的试验末期和初始 SOC 含量(g/kg);  $t$  为还田年限(a)。

2)效应值的 95% 置信区间计算。由于所收集的文献多数未给出标准差,按照式(2)计算每一对有效数据的权重  $w$ <sup>[12]</sup>:

$$w = \frac{N_{CK} N_{EX}}{N_{CK} + N_{EX}} \quad (2)$$

式中:  $N_{CK}$  为对照组试验重复的次数;  $N_{EX}$  为试验组试验重复的次数。

采用 Metawin 2.1 中自助法(Bootstrap)迭代

64 999 次计算 95%置信区间<sup>[12]</sup>。当试验组和对照组的 95%置信区间不与 0 重合时,认为试验组和对照组的 SOC 固定效果具有显著差异。各亚组合并效应值的 95%置信区间若不重合,认为他们之间具有显著差异,结果可信<sup>[13]</sup>。

3)亚组分析。按照表 1 开展秸秆还田对土壤固碳效果影响因素的亚组分析。判定亚组间具有显著差异的原则是:亚组样本数不少于 10 个或样本来自不少于 3 篇独立的文献<sup>[14]</sup>,且各亚组合并效应值的 95%置信区间不重合<sup>[13-15]</sup>。

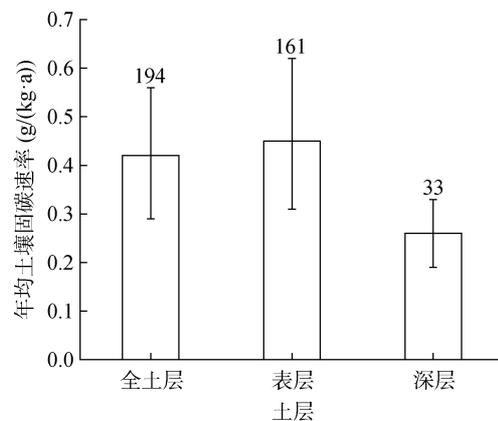
表 1 亚组分组方法  
Table 1 Subgrouping analysis for meta-analysis

影响因素	区间 1	区间 2	区间 3
土壤深度(cm)	[0, 20]	(20, 60]	
施氮量(kg/hm <sup>2</sup> )	[0, 100]	(100, 400]	(400, 974]
轮作制度	轮作	非轮作	
土地利用方式	旱地	水旱轮作	稻田
年均温度(°C)	[4.7, 13]	[13, 17.2]	
年均降水量(mm)	[150, 800]	[800, 1553.7]	
还田年限(a)	[3, 5]	[6, 9]	[10, 37]
初始土壤 C/N	[5.15, 10]	(10, 25.40]	

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆还田对不同土层固碳效应的影响

秸秆还田对农田不同土层固碳速率的影响见图 1。由图 1 可知,总体上秸秆还田处理土壤固碳速率达 0.42 g/(kg·a)。不同土层的固碳效果不同,表层土、深层土的固碳速率分别达 0.45 和 0.26 g/(kg·a),但二者间差异不显著。



(误差线为用 Bootstrap 方法得到的 95%置信区间,误差线上数字代表样本量,下同)

图 1 秸秆还田对不同深度土壤固碳效应的影响

Fig. 1 Effects of straw returning on SOC contents in different depths

### 2.2 不同施氮量下秸秆还田对土壤固碳效应的影响

不同施氮量下秸秆还田对农田不同土层固碳速率的影响见图 2。由图 2 可知，秸秆还田处理在不同施氮量下均可以显著增加全土层 SOC 含量。当施氮量为(100, 400] kg/hm<sup>2</sup> 时，土壤固碳速率最高，为 0.58 g/(kg·a)，显著高于施氮量为[0, 100] kg/hm<sup>2</sup> 和 (400, 974] kg/hm<sup>2</sup> 时，后二者土壤固碳速率分别为 0.24 和 0.18 g/(kg·a)。

通过比较还得出，不同施氮量下秸秆还田对不同深度土壤固碳效应也不同(图 2)。表层土年均土壤固碳速率随着施氮量增加呈现显著的先增加后减小的趋势，在施氮量为[0, 100]、(100, 400]和(400, 974] kg/hm<sup>2</sup> 时分别为 0.18、0.65 和 0.20 g/(kg·a)；而深层土的固碳速率则随着施氮量增加呈现显著的减小趋势，各施氮水平下分别为 0.35、0.24 和 0.04 g/(kg·a)。

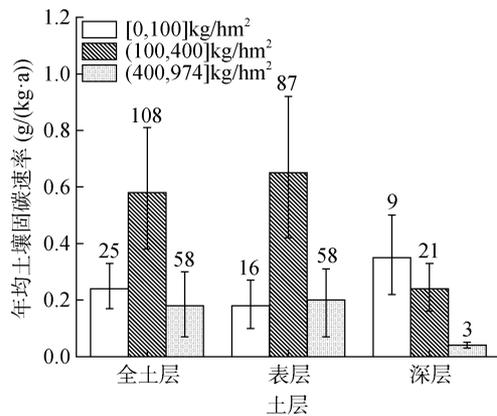


图 2 不同施氮量下秸秆还田土壤的固碳效应

Fig. 2 Effects of straw returning on SOC contents under different N fertilizer inputs

### 2.3 不同轮作制度下秸秆还田对土壤固碳效应的影响

不同轮作制度下秸秆还田对农田土壤固碳效应的影响见图 3。由图 3 可知，不同轮作条件下秸秆还田均可以显著增加全土层与不同土层 SOC 含量。在轮作与非轮作条件下，秸秆还田处理可分别显著增加全土层 SOC 含量 0.47 和 0.28 g/(kg·a)。在轮作条件下，秸秆还田处理可以分别显著增加表层土、深层土 SOC 含量 0.5 和 0.24 g/(kg·a)；而在非轮作条件下，秸秆还田处理的 SOC 含量增加效果均约为 0.28 g/(kg·a)；但不同土壤深度下轮作制度间差异均不显著。

### 2.4 不同土地利用方式下秸秆还田对土壤固碳效应的影响

不同土地利用方式下秸秆还田对农田土壤固碳

效应的影响见图 4。由图 4 可知，对旱地、水旱轮作以及稻田采取秸秆还田处理均可显著增加全土层 SOC 含量，土壤固碳速率分别达 0.18、0.78 和 0.52 g/(kg·a)，其中旱地与水旱轮作间差异显著。同时，不同土地利用方式下，秸秆还田对不同深度土壤固碳效应不同。旱地、水旱轮作和稻田的表层土壤固碳速率分别为 0.15、0.78 和 0.52 g/(kg·a)；对于深层土，旱地的土壤固碳速率可达 0.26 g/(kg·a)，水旱轮作和稻田则由于土壤数据较少，变异性较大，无法说明这两种土地利用方式的秸秆还田对深层土壤固碳的差异性。

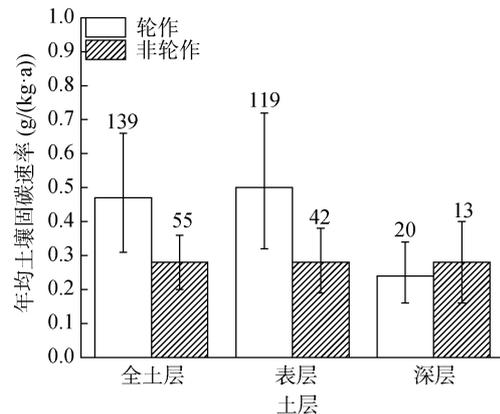


图 3 不同轮作条件下秸秆还田土壤的固碳效应

Fig. 3 Effects of straw returning on SOC contents under different rotation systems

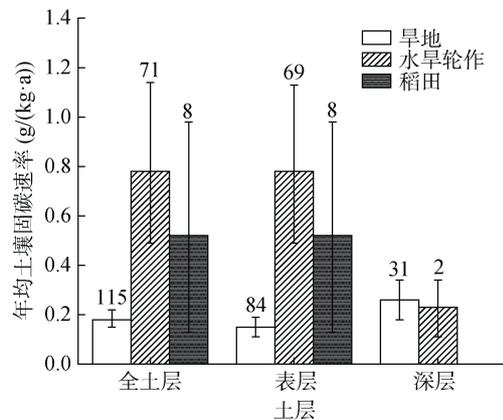


图 4 不同土地利用下秸秆还田土壤的固碳效应

Fig. 4 Effects of straw returning on SOC contents under different land-use types

### 2.5 不同气候条件下秸秆还田对土壤固碳效应的影响

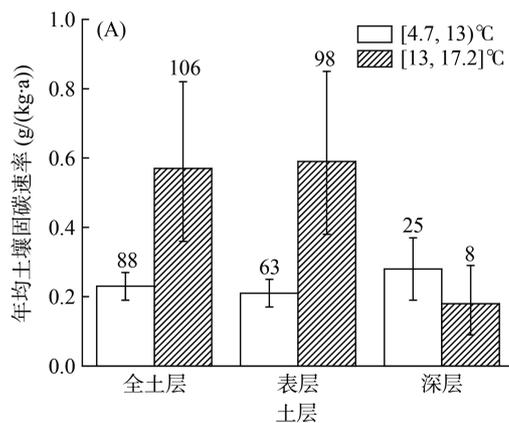
不同气候条件下秸秆还田对农田土壤固碳效应的影响见图 5。由图 5A 可知，不同年均温度下秸秆还田处理均可显著增加全土层 SOC 含量。当年均温度为[4.7, 13] °C 时，土壤固碳速率为 0.23 g/(kg·a)，而年均温度为[13, 17.2] °C 时，土壤固碳速率为

0.57 g/(kg·a), 二者差异显著( $P<0.01$ )。对表层土土壤固碳效果也有类似结果, 在年均温度为[13, 17.2] °C 时土壤固碳速率为 0.59 g/(kg·a), 较年均温度为 [4.7, 13] °C 时的固碳效应 0.21 g/(kg·a) 显著提高; 但未发现不同年均温度对深层土壤固碳速率的显著影响。

不同年均降水量条件下秸秆还田处理均可显著增加全土层 SOC 含量(图 5B)。当年均降水量为[150, 800]mm 时, 土壤固碳速率为 0.19 g/(kg·a), 而当年均降水量为[800, 1 533.7]mm 时, 土壤固碳速率可显著增加到 0.77 g/(kg·a), 二者差异显著( $P<0.001$ )。对表层土土壤固碳效果也有类似结果, 在年均降水量 [800, 1 533.7]mm 时土壤固碳速率为 0.78 g/(kg·a), 且显著高于年均降水量为[150, 800] mm 时的固碳速率(0.16 g/(kg·a)); 但不同年均降水量条件下深层土壤固碳速率不具显著差异性。

## 2.6 不同还田年限下秸秆还田对土壤固碳效应的影响

不同还田年限下秸秆还田对农田土壤固碳效应



的影响见图 6。由图 6 可知, 不同还田年限下秸秆还田均可显著增加全土层 SOC 含量。当还田年限分别在[3, 5]、[6, 9]及[10, 37] a 时, 全土层固碳速率分别为 0.58、0.19 和 0.09 g/(kg·a), 差异显著( $P<0.01$ )。对于表土层, 3 种还田年限下的土壤固碳速率分别为 0.67、0.19 和 0.09 g/(kg·a); 对于深层土, 本研究只获得了还田年限[3, 5]和[10, 37]a 的数据, 土壤固碳速率分别为 0.28 和 0.03 g/(kg·a)。

## 2.7 不同初始土壤碳氮比下秸秆还田对土壤固碳效应的影响

不同初始土壤碳氮比(C/N)下秸秆还田对农田土壤固碳效应的影响见图 7。不同初始土壤 C/N 条件下, 秸秆还田均可显著增加农田 SOC 含量。当初始土壤 C/N 为[5.15, 10]和(10, 25.40]时, 全土层土壤固碳速率分别为 0.20 和 0.60 g/(kg·a), 二者差异显著( $P<0.01$ )。对于表层土, 两种情况下土壤固碳速率分别为 0.19 和 0.65 g/(kg·a), 二者差异显著( $P<0.01$ ); 而深层土壤在不同初始土壤 C/N 下的固碳效应较为接近, 二者无显著差异。

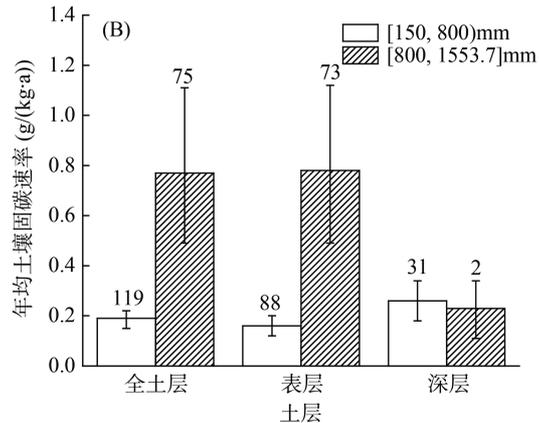


图 5 不同气候条件下秸秆还田土壤的固碳效应

Fig. 5 Effects of straw returning on SOC contents under different climate conditions

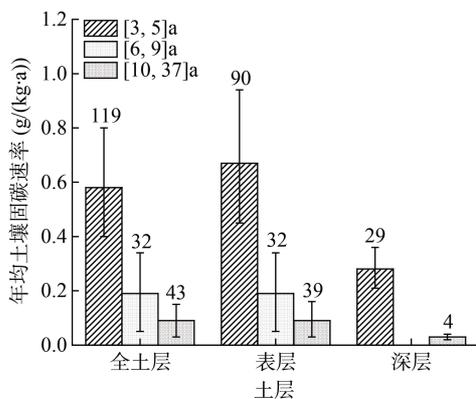


图 6 不同还田年限下秸秆还田土壤的固碳效应

Fig. 6 Effects of straw returning on SOC contents under different experimental durations

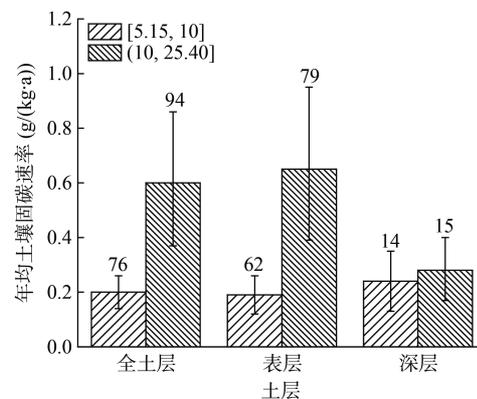


图 7 不同初始土壤 C/N 下秸秆还田土壤的固碳效应

Fig. 7 Effects of straw returning on SOC contents under different initial soil C/N ratios

### 3 讨论

#### 3.1 不同农田管理措施及还田年限下秸秆还田对农田 SOC 含量的影响

秸秆作为有机物料还田后主要通过微生物分解增加碳输入<sup>[16]</sup>,从而可以直接增加 SOC 含量<sup>[17]</sup>。本研究表明,秸秆还田处理可以增加农田土壤全土层 SOC 含量,但随着土壤深度的增加,增加效应呈现下降的趋势,与 Liu 等<sup>[17]</sup>的研究结果一致。因此,秸秆还田是增加农田 SOC 含量的有效措施<sup>[18-19]</sup>。

施氮肥可以改变土壤微生物种群数量及活性<sup>[20]</sup>,并通过促进作物根系生长,起到增加土壤碳输入量的效果,从而影响土壤 SOC 含量<sup>[20]</sup>,与秸秆还田相配合可以促进土壤固碳<sup>[21]</sup>。但较少或过多的施氮量会阻碍秸秆的腐解,减缓 SOC 增加速率<sup>[22]</sup>。本研究通过统计分析得出,当施氮量在(100, 400] kg/hm<sup>2</sup>时,全土层及表层土土壤固碳速率均可以达到较高水平(图 2),与王旭东等<sup>[23]</sup>、Wang 等<sup>[24]</sup>研究结果存在差异。这可能是由于合适的施氮量会更有利于土壤中微生物对秸秆的分解<sup>[22]</sup>,从而增加 SOC。此外,对于深层土壤, SOC 增加幅度随施氮量增加而减小,表明低氮量施肥对深层土壤固碳可能更有利。

长期种植单一作物会持续从土壤中汲取相同养分,从而造成土壤质量下降,而轮作制度有利于维持土壤养分平衡。轮作比非轮作有利于全土层及表层土壤固碳,而轮作制度对于深层土壤的影响不明显(图 3),与王旭东等<sup>[23]</sup>研究结果不一致。这可能与试验地土壤的自身性质有关。同时作物轮作会使得土壤保留更多有机碳<sup>[23]</sup>,从而提升土壤固碳潜力。

本研究表明,在秸秆还田初期土壤固碳作用较强,而随秸秆连续还田年限的延长,土壤固碳能力逐渐减弱,与王旭东等<sup>[23]</sup>、Han 等<sup>[25]</sup>结果具有差异。这可能是因为秸秆中含碳量较大,长期施入土壤后可以提高土壤 C/N,而减弱土壤中微生物对秸秆碳的分解作用<sup>[22]</sup>,从而降低土壤固碳能力。且说明若仅依靠短期内秸秆还田的土壤固碳研究结果,可能将会高估还田措施对增加土壤 SOC 含量的能力。

#### 3.2 不同土地利用方式及气候条件下秸秆还田对农田 SOC 含量的影响

本研究表明,土地利用方式对全土层及表层土固碳作用大小顺序为水旱轮作>稻田>旱地,而王旭东等<sup>[23]</sup>、Han 等<sup>[25]</sup>研究均未得出秸秆还田条件下不同土地利用方式的土壤固碳特性差异。实际上,稻田较早地的厌氧程度深,氧化还原电位低,使得有机

碳分解速率变慢<sup>[17]</sup>。但水旱轮作可以使氧化还原电位交替下降和上升,更有利于增加土壤微生物的数量和活性<sup>[26]</sup>,从而可以加强秸秆的分解,及时补充土壤中养分含量。

气候因素主要包含年均温度和降水,其分别通过影响微生物活性和土壤水分含量来影响 SOC 含量。当温度或土壤水分较低时土壤微生物活性较低<sup>[24-27]</sup>,从而减缓秸秆分解速率,不利于 SOC 积累。较高的年均温度或年均降水量条件下,秸秆还田对土壤固碳作用更有利,但气候因素对深层土壤固碳的效果不显著。总之,在年均温度及年均降水量较高的地区推行秸秆还田措施,更有利于农田土壤 SOC 含量的增加。

#### 3.3 不同初始土壤碳氮比下秸秆还田对农田 SOC 含量的影响

较高初始土壤 C/N 条件下,秸秆还田具有较高土壤固碳效果(图 7)。有研究表明,土壤 C/N 与 SOC 分解呈负相关关系<sup>[28-29]</sup>,当土壤 C/N 较高时,微生物活性较高,从而更有利于秸秆的分解,实现更显著的土壤固碳效果。此外,目前在不同土壤 C/N 条件下,秸秆还田对土壤固碳影响的相关研究较少,未来应加强不同土壤初始理化性质条件下秸秆还田效应的研究,指导我国农田土壤肥力提升的实践行动。

### 4 结论

秸秆还田可以显著增加全土层 SOC 含量,且随深度增加土壤固碳速率呈现下降的趋势。在合适的施氮量、较高的年均温度、较高降水量条件下,表层土固碳作用较好,但深层土壤固碳作用受上述因素影响不显著。此外,长期秸秆还田较短期还田的土壤固碳速率低。总之,在不同自然条件和农田管理措施下秸秆还田措施对土壤碳库的影响不同。

#### 参考文献:

- [1] 沈玉君,李冉,孟海波,等. 国内外堆肥标准分析及其对中国的借鉴启示[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 265-271.
- [2] 龚雪蛟,秦琳,刘飞,等. 有机类肥料对土壤养分含量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1403-1416.
- [3] 陈鲜妮,岳西杰,葛玺祖,等. 长期秸秆还田对壤土层土壤有机碳库的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(1): 25-32.
- [4] 徐虎,蔡岸冬,周怀平,等. 长期秸秆还田显著降低褐土层有机碳储量[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(5): 768-776.
- [5] 李玉梅,王根林,孟祥海,等. 秸秆还田方式对旱地草甸土活性有机碳组分的影响[J]. 农业资源与环境学报,

- 2021, 38(2): 268–276.
- [6] 陈奇, 丁雪丽, 张彬. 外源氮添加对土壤微生物残体积累动态的影响——基于 Meta 分析[J]. 土壤通报, 2021, 52(6): 1460–1472.
- [7] Zhao J, Yang Y D, Zhang K, et al. Does crop rotation yield more in China? A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2020, 245: 107659.
- [8] Lu F. How can straw incorporation management impact on soil carbon storage? A meta-analysis[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2015, 20(8): 1545–1568.
- [9] Tian K, Zhao Y C, Xu X H, et al. Effects of long-term fertilization and residue management on soil organic carbon changes in paddy soils of China: A meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 204: 40–50.
- [10] 于严严, 郭正堂, 吴海斌. 1980—2000 年中国耕作土壤有机碳的动态变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(6): 123–130.
- [11] 董丽, 史学正, 徐胜祥, 等. 基于 Meta 分析研究不同管理措施对中国农田土壤剖面有机碳的影响[J]. 土壤, 2021, 53(6): 1290–1298.
- [12] Hedges L V. Advances in statistical methods for meta-analysis[J]. *New Directions for Program Evaluation*, 1984, 1984(24): 25–42.
- [13] Feng Z Z, Wang S G, Szantoi Z, et al. Protection of plants from ambient ozone by applications of ethylenediurea (EDU): A meta-analytic review[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(10): 3236–3242.
- [14] Wittig V E, Ainsworth E A, Naidu S L, et al. Quantifying the impact of current and future tropospheric ozone on tree biomass, growth, physiology and biochemistry: A quantitative meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(2): 396–424.
- [15] Rui W Y, Zhang W J. Effect size and duration of recommended management practices on carbon sequestration in paddy field in Yangtze Delta Plain of China: A meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 135(3): 199–205.
- [16] 马小婷, 隋玉柱, 朱振林, 等. 秸秆还田对农田土壤碳库和温室气体排放的影响研究进展[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(6): 14–20.
- [17] Liu C, Lu M, Cui J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1366–1381.
- [18] Zhao X, Liu B Y, Liu S L, et al. Sustaining crop production in China's cropland by crop residue retention: A meta-analysis[J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(6): 694–709.
- [19] 李泽媛, 郑军. 我国农作物秸秆还田的研究脉络和趋势探析——基于 CiteSpace 知识图谱[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(9): 16–26.
- [20] 汪洋, 杨殿林, 王丽丽, 等. 农田管理措施对土壤有机碳周转及微生物的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3): 340–352.
- [21] 于维水, 李桂花, 王碧胜, 等. 不同施肥制度下我国东部典型土壤易分解与耐分解碳的组分特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 675–683.
- [22] Wang Y L, Wu P N, Mei F J, et al. Does continuous straw returning keep China farmland soil organic carbon continued increase? A meta-analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 288: 112391.
- [23] 王旭东, 庄俊杰, 刘冰洋, 等. 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.
- [24] Wang X D, He C, Liu B Y, et al. Effects of residue returning on soil organic carbon storage and sequestration rate in China's croplands: A meta-analysis[J]. *Agronomy*, 2020, 10(5): 691.
- [25] Han X, Xu C, Dungait J A J, et al. Straw incorporation increases crop yield and soil organic carbon sequestration but varies under different natural conditions and farming practices in China: A system analysis[J]. *Biogeosciences*, 2018, 15(7): 1933–1946.
- [26] 李圆宾, 李鹏, 王舒华, 等. 稻麦轮作体系下有机肥施用对作物产量和土壤性质影响的整合分析[J]. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3231–3239.
- [27] Wang Q J, Liu X, Li J Y, et al. Straw application and soil organic carbon change: A meta-analysis[J]. *Soil and Water Research*, 2021, 16(No. 2): 112–120.
- [28] 刘骞, 郭博雅, 伍秀瑜, 等. 松嫩平原盐碱土区不同土地利用方式对土壤碳、氮及酶活性的影响[J]. 福建农业学报, 2021, 36(8): 956–963.
- [29] 马南, 陈智文, 张清. 不同类型秸秆还田对土壤有机碳及酶活性的影响综述[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(3): 53–57.