



韩佳桦,张久明,袁佳慧,等.土壤微生物对秸秆碳转化及碳积累特征的 Meta 分析[J].黑龙江农业科学,2024(11):19-25.

# 土壤微生物对秸秆碳转化及碳积累特征的 Meta 分析

韩佳桦<sup>1</sup>,张久明<sup>2</sup>,袁佳慧<sup>2</sup>,朱莹雪<sup>2</sup>,匡恩俊<sup>2</sup>,迟凤琴<sup>2</sup>,张少良<sup>1</sup>

(1.东北农业大学 资源与环境学院,黑龙江 哈尔滨 150030;2.黑龙江省黑土保护利用研究院/农业农村部黑土地保护与利用重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150086)

**摘要:**土壤有机碳是土壤的主要组成成分,其微小变化能够对陆地碳库和全球气候变化产生重大影响。利用 Meta 整合分析法分析微生物介导的秸秆碳转化和稳定机制,并阐明各类因素对土壤有机碳的影响。Meta 分析结果显示,秸秆还田后土壤有机碳(SOC)、可溶性有机碳(DOC)和微生物量碳(MBC)含量分别增加了 23.84%、10.94%和 20.13%。土壤微生物能够显著影响秸秆还田下有机碳含量,真菌残体碳贡献率和细菌残体碳贡献率分别达到 33.12%和 14.80%。当还田秸秆类型为玉米秸秆,土壤类型为碱性土壤,气温高于 25℃时,土壤有机碳积累效果最佳。土壤中的化学生物保护机制也可增加土壤有机碳含量,从而利于有机碳的固存,使土壤产生激发效应,刺激微生物生长代谢,从而形成微生物碳泵,令有机碳在土壤中处于动态平衡。对于农业生产来说,最重要的土壤功能是维持作物生产力、养分转化以及微生物丰度和活性的维持,应优先考虑这些功能,以维持土壤有机碳含量。

**关键词:**土壤微生物;秸秆还田;土壤有机碳;秸秆碳转化

农作物秸秆由纤维素类碳水化合物等有机物、无机物、水分及少量的粗蛋白质和粗脂肪构成<sup>[1]</sup>。农作物秸秆还田可以将秸秆中残存的大量氮、磷、钾等以及植物生长所需的元素归还土壤<sup>[2]</sup>,增加土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)含量<sup>[3]</sup>、提高土壤的碳固存,使土壤有机碳稳定性增强<sup>[4-5]</sup>。在秸秆还田处理中,除了会对土壤的理化性质产生影响外,同时也会对土壤微生物群落结构产生一定的影响<sup>[6-7]</sup>,土壤微生物与秸秆还田的相互作用又会影响生态系统的养分循环功能<sup>[8]</sup>。自工业革命以来,由于大量开发利用化石燃料,导致大气中 CO<sub>2</sub> 和其他温室气体的浓度明显增加,CO<sub>2</sub> 作为主要温室气体之一,约 76% 的排放来自化石能源,其余 20% 左右来自土壤<sup>[9]</sup>。为实现 2030 年碳排放峰值和 2060 年碳中和目标,我国政府提出了低碳转型的能源系统,这种转型是解决碳排放峰值及碳中和挑战的关键<sup>[10]</sup>。在我国农业迈向绿色低碳转型并深化循环经济发展的重要时期,改善秸秆资源化的高效利用方式成为当前农业可持续发展的研究热点<sup>[11]</sup>。

影响秸秆分解的各种因素中,土壤微生物是

必不可少的重要组成部分,微生物不仅作为“分解者”促进地上部分外源碳的周转,同时通过其生长、繁殖和死亡过程,作为“贡献者”将其同化产物释放至土壤碳库中,以微生物源有机碳的形式储存在土壤中,加速还田秸秆中的有机质分解,提高土壤中养分与物质的周转速率<sup>[12]</sup>。因此,科学合理地利用秸秆对提升土壤肥力、增强土壤碳固存及农业可持续发展具有重要意义。但在微生物驱动下,还田秸秆碳的转化及分配研究较少。因此,本研究借助 Meta 分析方法,整合分析了秸秆还田后有机碳的含量变化与分配转化及微生物对秸秆碳转化的驱动作用,以期提升土壤肥力,科学有效地利用秸秆,揭示秸秆还田后微生物固碳机制提供科学的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 文献检索

本研究利用中国知网(CNKI)和 Web of Science 数据库,以“微生物”“秸秆还田”“碳转化”“microbial carbon pump”“priming effect”等为关键词检索相关期刊文献。收集 1980—2023 年间公开发表的文献。同时使用如下标准来进行文献筛选:

收稿日期:2024-07-09

基金项目:黑龙江省农业科学院杰出青年基金项目(2021JCQN004);黑龙江省省属科研院所科研业务费项目(CZKYF2023-1-B006);黑龙江省博士后资助项目(LBH-Z23266);黑龙江省农业科技创新跨越工程项目(CX23GG08)。

第一作者:韩佳桦(1999—),女,硕士研究生,从事土壤肥力研究。E-mail:772592085@qq.com。

通信作者:张少良(1980—),男,博士,教授,从事农业生态和田景观生态过程研究。E-mail:shaoliang.zhang@neau.edu.cn。

(1) 试验至少包括 1 组添加秸秆和不添加秸秆的处理,其他条件保持一致,试验中不同处理至少有 3 个重复;(2) 农田信息明确,如试验区地理位置、土壤类型、土壤 pH、秸秆还田量等;(3) 文献中至少包含微生物、秸秆或土壤有机碳其中之一。

## 1.2 数据收集与分析

在收集数据时,若文献中的数据是以图表的形式呈现的,则利用软件 GetData Graph Digitizer 进行提取。使用 Excel 2016 记录文献数据,所有数据用 MetaWin 2.1 进行整合分析。

部分研究报道了有机质,本研究依据式(1)将有机质转化为有机碳<sup>[13]</sup>。

$$I_{\text{SOM}} = 1.724 \times I_{\text{SOC}} \quad (1)$$

若文献中提供的数据为标准误(SE),则按照公式(2)将其换算成标准差(SD)。

$$\text{SD} = \text{SE} \times \sqrt{n} \quad (2)$$

本研究采用随机效应模型,选择效应比( $RR_i$ )的自然对数( $\ln RR_i$ )作为效应值<sup>[14]</sup>,来衡量秸秆还田对土壤的影响,通过公式(3)计算每组数据的效应值。

$$\ln RR_i = \ln\left(\frac{X_t}{X_c}\right) = \ln X_t - \ln X_c \quad (3)$$

式中, $X_t$  为各处理后土壤有机碳的含量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); $X_c$  为试验有机碳含量本底值( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。

通过公式(4)计算每个  $\ln RR_i$  的效应权重。

$$w = (nt + nt) \div (nt \times nt) \quad (4)$$

式中, $w$  为效应权重; $nt$  为各处理的试验重复次数。

采用公式(3)对每项独立研究的效应值进行加权计算,得到加权平均效应值( $\ln RR$ ),再利用公式(5)计算  $\ln RR$  的标准误  $S_{\ln RR}$ 。

$$\ln RR = \sum (\ln RR_i \times w) \div \sum w \quad (5)$$

$$S_{\ln RR} = \sqrt{1 \div \sum w} \quad (6)$$

加权平均效应值  $\ln RR$  的 95% 置信区间(95%CI)采用公式(7)计算。

$$95\% \text{CI} = \ln RR \pm 1.96 \times S_{\ln RR} \quad (7)$$

增幅(E)与增幅的 95% 置信区间的计算方法参考公式(8)。

$$E(\%) = (\exp \ln RR_i - 1) \times 100 \quad (8)$$

利用 Bootstrap 重复抽样法重复取样 4 999 次并计算 95% 置信区间。若置信区间包含 0,则表示无显著影响;若置信区间全部在 0 的右侧( $P < 0.05$ ),则表示影响显著,各影响因子能够显著增加土壤有

机碳含量;若置信区间全部在 0 的左侧( $P > 0.05$ ),则说明土壤有机碳显著降低。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆还田后有机碳含量变化

秸秆还田后对土壤不同组分有机碳影响的 Meta 分析结果如图 1 所示,整合分析得到土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)的分布范围最广,涵盖了较大的数值跨度,这可能意味着 SOC 在其生态或环境系统中具有更大的变异性,表明 SOC 含量对秸秆还田比较敏感。秸秆还田下土壤可溶性有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)、微生物生物量碳(Microbial Biomass Carbon, MBC)和 SOC 含量呈增加趋势,较秸秆不还田处理的 SOC 含量增幅可达 23.84%(95%置信区间为 12.00%~37.00%),不同有机碳含量增幅存在差异性,DOC 和 MBC 含量较秸秆未还田处理增幅分别达 10.94%和 20.13%(95%置信区间在 5.12%~26.55%),秸秆还田下 SOC 含量变化率较 DOC 与 MBC 变化率增幅的 18.43%~117.92%,反映了秸秆还田对土壤碳循环的积极影响。

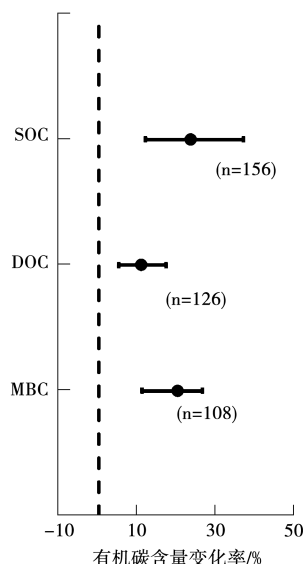


图 1 秸秆还田后有机碳含量变化率

### 2.2 土壤保护机制影响下有机碳含量的变化

目前, SOC 的固碳保护机制主要分为物理稳定机制、化学稳定机制和生物化学稳定机制<sup>[15]</sup>, SOC 的稳定性实际上是由多种保护机制相互作用的结果,而不是某一种保护机制单独作用的结果。如图 2 所示,物理保护机制和化学保护机制均可提高 SOC 含量,增幅为 26.39%和 30.65%(95%置信区间在 16.53%~43.33%),且生物化

学保护机制(95%置信区间为 28.77%~73.96%)区别于前两种保护机制,对 SOC 含量有极为明显的提升效应,增幅可达 53.32%,较物理保护机制与化学保护机制分别高出 73.96%和 102.05%。

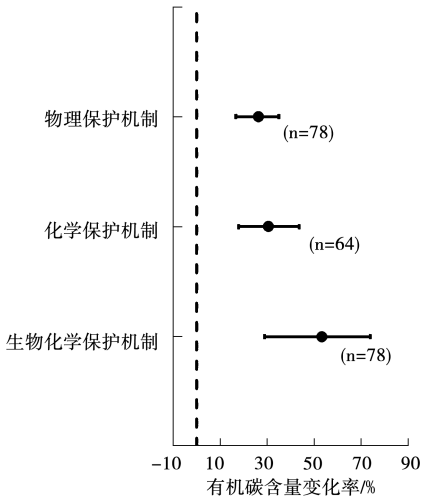


图 2 土壤保护机制对有机碳的影响

2.3 微生物驱动有机碳含量的变化

土壤有机碳积累的关键在于土壤微生物残体碳的续埋效应。“续埋效应”指的是微生物残留物在土壤中趋向于稳定化的现象<sup>[16]</sup>。整合分析表明(图 3),在秸秆还田的条件下显著增加了土壤真菌残体碳和细菌残体碳对总有机碳的贡献率,其中真菌残体碳的贡献率(33.12%,95%置信区间为 18.81%~44.09%)显著高于细菌残体碳贡献率(14.80%,95%置信区间在 6.72%~23.23%)123.78%,真菌残体碳 95%的置信区间较大,表明真菌在秸秆还田条件下变异也较大。

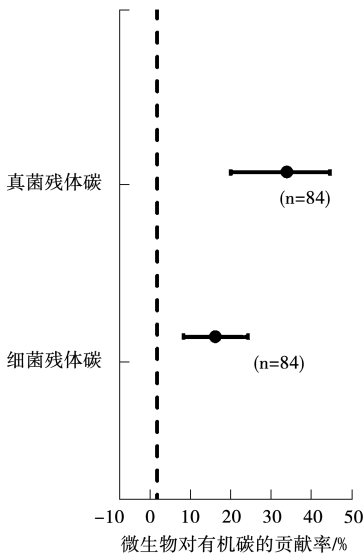


图 3 微生物对有机碳含量的影响

2.4 环境因子驱动有机碳含量的变化

从秸秆类型、温度以及 pH 等环境情况进行分析,发现这些因素均能提高土壤有机碳含量,但提高的程度存在差异(图 4),且这种变化对温度更为敏感。秸秆还田后土壤有机碳含量提高,不同种类的还田秸秆中小麦秸秆和玉米秸秆还田均能明显增加 SOC 含量,95%置信区间在 8.96%~43.89%,具体表现为玉米秸秆>小麦秸秆的还田效果,玉米秸秆还田 SOC 含量增幅达到 29.97%,小麦秸秆还田 SOC 含量增幅为 21.61%。秸秆还田对 SOC 含量的影响在不同温度条件下也存在差异,本研究发现当气温在 25℃及<25℃时对 SOC 含量都呈提升趋势;当温度>25℃时,能明显提升 SOC 含量,增幅为 81.04%,与 25℃和<25℃处理相比,土壤 SOC 含量分别提高 151.83%~166.40%。秸秆还田后,中性土壤(pH6.6~7.7)的有机碳增幅低于酸性土壤(pH<6.6)和碱性土壤(pH>7.7),其中碱性土壤中 SOC 含量显著提高 44.88%,酸性土壤 SOC 含量提高 39.47%,且 95%置信区间也较大,在 23.05%~55.66%。

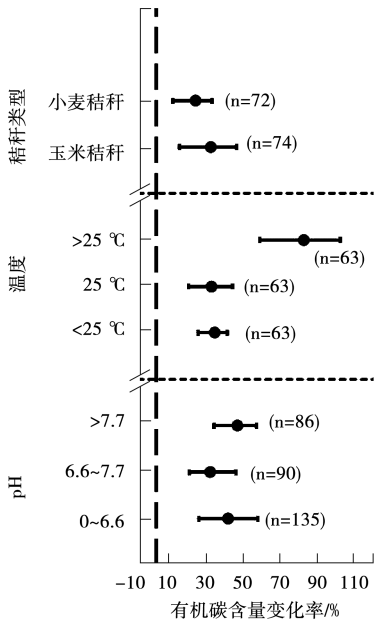


图 4 环境因子对有机碳含量的影响

3 讨论

3.1 秸秆还田对土壤有机碳的影响

稳定碳同位素包括<sup>12</sup>C和<sup>13</sup>C两种,与<sup>12</sup>C不同的是,<sup>13</sup>C稳定同位素因其安全、无污染和易于控制的优势,成为追踪碳动态变化的理想标记<sup>[17-18]</sup>。经过数十年的发展,这种方法在生态系统碳循环研究中得到广泛应用<sup>[19]</sup>。越来越多的

研究者选择使用添加 $^{13}\text{C}$ 标记的作物秸秆进行还田试验,以探讨其在土壤有机碳中的转化过程,从而深入研究 SOC 对土壤肥力和植物生产力的影响。本研究发现,秸秆碳添加到土壤中, SOC 可提高 23.84%,有利于提高土壤中的活性有机碳,对土壤有机碳库的增加贡献相对较高。Ma 等<sup>[20]</sup>用小麦秸秆和小麦秸秆分解微生物接种剂改良的土壤,在 0~20 cm 土层,年平均 SOC 固存率比未添加秸秆改良的土壤高出  $0.77\sim 1.67\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,表明秸秆还田会使土壤易氧化有机碳、促进微生物生物量碳、土壤有机碳等含量增加,并且秸秆混施生物菌剂处理更有利于提升土壤肥力,增强土壤有机碳固存,提高土壤有机碳转化率。

在土壤环境中影响有机碳循环转化的因素有许多,土壤有机碳含量主要取决于土地利用类型、土壤质地状况及气候的影响。前人研究表明,当气温在  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上时,可使土壤 SOC 含量增加  $6.2\%\sim 16.6\%$ <sup>[21]</sup>;土壤 pH 可以通过改变 SOC 溶解度或加速微生物生长和多样性等因素来影响碳的分解<sup>[22]</sup>。研究发现因为有机肥输入的碳在酸性土壤中一部分被保留,但当土壤 pH 较高时,土壤中的碳容易被分解,呈现出土壤 pH 与 SOC 含量之间负相关关系<sup>[23]</sup>。秸秆碳的转化受秸秆类型、温度、pH 等多种因素的共同作用,然而影响这一过程的因素远不止于此,需要从整体角度研究各个影响因子与秸秆碳转化分配比例之间的关系,以促进有机碳更有效地吸收利用,从而提升土壤养分,实现粮食作物增产与“碳中和”目标。

### 3.2 土壤有机碳固定保护机制

土壤有机碳稳定广义上是指阻碍有机物分解、促进其在土壤中积累和持久存在的机制<sup>[24]</sup>,SOC 的稳定与土壤对 SOC 的保护机制有一定关系。SOC 保护机制,本质上是 SOC 与土壤微生物、土壤酶等之间存在一定的屏障或者与土壤矿物结合形成稳定结构从而保护有机碳的稳固,是 SOC 能长期保存而变化较小的重要因素<sup>[25]</sup>。

朱锟恒等<sup>[26]</sup>研究表明,物理保护机制能够使土壤有机碳增加 20.39%,主要是因为团聚体多孔的结构,将土壤有机碳包裹起来避免被微生物分解,可以储存碳、氮、磷等养分,形成土壤结构中重要的物理保护机制。土壤团聚体是土壤颗粒经过胶结作用形成的个体,是土壤结构的基本单元<sup>[27]</sup>,并且在调节土壤水肥、气热以及存储表土有机质方面起着至关重要的作用<sup>[28]</sup>。在我国华

东地区通过大田小区试验发现,关于团聚体不同组分的变化也得到相似的结果,秸秆还田配施促腐菌剂可以促进土壤大团聚体( $>0.25\text{ mm}$ )形成,增加了土壤大团聚体中的养分含量,进而提高了团聚体水稳定性<sup>[29]</sup>。也有研究发现当外源有机物进入土壤后,铁铝氧化物的保护作用对土壤有机碳的固存和稳定也有着重要的贡献<sup>[30]</sup>。

化学稳定机制主要是指土壤中的有机碳被土壤矿物吸附在其表面,通过离子桥、范德华力、配体交换或氢键等作用,形成稳定的有机-无机复合体,使有机碳结构发生变化,生物可利用性降低,进而达到保护有机碳的作用<sup>[16]</sup>。土壤矿物有机碳的吸附能力与其比表面积呈现正相关,吸附力随比表面积增大而变强<sup>[31]</sup>,2:1型黏土矿物比1:1型黏土矿物具有更强的有机质吸附能力<sup>[32]</sup>。

其中生物化学稳定机制是在3种保护机制中使有机碳含量增加最多,增幅达 53.32%。细菌和真菌作为分解群落的两个主要类群,展现出多种影响土壤固碳和陆地碳稳定性的途径<sup>[33]</sup>,细菌主要负责碳水化合物、有机酸和氨基酸的分解,而真菌在处理难溶性土壤碳方面更为重要<sup>[34]</sup>。

### 3.3 秸秆还田对土壤微生物的影响

土壤微生物在秸秆腐解、营养元素矿化释放、施入土壤中矿物质肥料的固持过程中具有重要的作用,而秸秆还田也会对土壤微生物产生不可替代的影响<sup>[35]</sup>。大量研究表明,长期施用无机肥会降低细菌的生物多样性和丰度<sup>[36]</sup>,施用有机肥会增加细菌的丰度和多样性<sup>[37]</sup>,进而提高土壤中 MBC 含量<sup>[38]</sup>;无论是有机肥、无机肥,还是堆腐、翻埋等还田方式的长期施用后均可使土壤中蔗糖酶、过氧化氢酶以及脲酶的活性提高<sup>[39-40]</sup>,增强了土壤微生物对多聚化合物、羧酸化合物、碳水化合物、胺类化合物、氨基酸的利用能力<sup>[41]</sup>。

因此,添加秸秆会显著影响土壤有机碳的组成、含量和土壤养分的丰富程度等理化指标,进而对土壤微生物群落的结构、组成和活性产生影响,进一步影响秸秆碳的转化与分配,以及土壤养分的循环过程。

### 3.4 微生物对土壤有机碳的影响

3.4.1 微生物碳泵的提出 在以往研究中,主要聚焦于土壤有机质的主要组成物质为腐殖质,而腐殖质则有利于土壤各项功能<sup>[42]</sup>,将土壤有机质(Soil Organic Matter, SOM)的规模、构成与非生物环境对 SOM 转化的影响联系起来<sup>[43]</sup>,却较少



强调微生物在其中的作用。事实上,细菌和真菌等微生物是推动秸秆碳在土壤过程中转化的主要因素。微生物对秸秆的降解主要经历了胞外酶解聚、同化、产生代谢产物以及土壤中碳的固定等几个主要阶段<sup>[44]</sup>。目前土壤微生物碳泵(Microbial Carbon Pump, MCP)已大量应用于陆地生态系统碳氮循环研究中,例如,Qu 等<sup>[45]</sup>基于 MCP 机制,设置 3 种堆肥处理,通过试验发现,秸秆还田后土壤有机质的核心细菌为鞘氨醇盒菌(*Sphingopyxis*)和脱硫杆菌(*Dethiobacter*),微生物作为响应者,发挥了碳泵的主要作用,显著促进土壤有机质从简单组分向复杂组分的转变。也有研究表明,外源有机碳一旦进入土壤,即充当聚集体形成的圆核,刺激微生物群落的局部活动<sup>[46]</sup>。这些微生物会分泌细胞外多糖和聚合物物质,将它们粘附在土壤颗粒上,并将颗粒紧密结合在一起,在分解的 SOC 核周围形成一个外壳,最终将其中的 SOC 残留物封存<sup>[47]</sup>。值得注意的是在添加秸秆和根茬后,微生物残体碳含量在前 30 d 迅速上升,并于 180 d 时达到峰值。在这个过程中,真菌的残余碳贡献度介于 60.5%~63.5%之间,然而,细菌的残余碳却始终保持波动,其贡献度介于 9.0%~11.0%之间<sup>[48]</sup>。

综上,微生物碳泵通过整合微生物生成的各种有机化合物及其稳定过程,有效地补充土壤碳库,表明在陆地生态系统碳循环中土壤微生物发挥着至关重要的媒介作用,并显著促进土壤有机碳的稳定。

3.4.2 续埋效应和激发效应 大量微生物长期存在于土壤中,然而秸秆碳的分解与转化也与微生物的种类和群落密切相关,不同类别的微生物也发挥着不同的作用。微生物对秸秆的转化,既有降解矿化秸秆中的木质纤维素的过程,又包括同化和合成稳定 SOC 的过程<sup>[49]</sup>。本研究发现秸秆还田后,真菌残体碳贡献率是细菌残体碳贡献率的 1.0 倍~1.5 倍。这些结果同样证实了真菌残余碳在保持土壤有机碳储量的稳定性上起着重要作用。

外源有机物输入引起土壤原有机质分解速率的变化,即为激发效应(Priming Effect, PE)<sup>[50]</sup>,这是调控土壤有机质分解的重要机制之一。外源碳的添加可能在短期内促进原有土壤有机碳的矿化,从而引发微生物的“激发效应”,然而,外源碳的引入也可能导致原有土壤有机碳的矿化速率减

缓,形成所谓的“负激发效应”<sup>[51]</sup>。外源碳的输入会促进土壤微生物生长,增加土壤微生物量,如果易于被微生物利用的外源碳不能满足微生物生长所需求的能量,微生物就会通过促进原有 SOC 的矿化来获取所需的能量,从而促进土壤激发效应;但当外源碳易于微生物利用的量达到足够大,可以满足土壤微生物的生长需求时,微生物会优先利用这些外源碳,进而可能会引发负面的激发效应<sup>[52]</sup>。因此,在秸秆添加到土壤的前中期,微生物对秸秆的分解会迅速增加,然后下降,最终趋于平稳,从而提高土壤有机碳含量升高。

SOC 池的动态变化很大程度上取决于微生物残留物积累的同化、矿化和动态平衡,其中微生物充当 MCP,续埋效应与激发效应持续向土壤贡献有机碳,促使 SOC 稳定、固存,并达到平衡。

## 4 结论

Meta 分析结果得出,秸秆还田有利于土壤有机碳的固存,使有机碳、可溶性有机碳和微生物生物量碳含量增加了 10.94%~23.48%;秸秆还田条件下,土壤保护机制可提高土壤有机碳含量 26.39%~53.32%,生物化学保护机制的处理效果优于物理和化学保护机制;秸秆还田后可提高土壤微生物残体碳含量,微生物在土壤碳转化过程中扮演碳泵角色,使激发效应与续埋效应处于动态平衡,从而达到固碳的效果;玉米秸秆还田后对有机碳的提升效果优于小麦秸秆;当气温高于 25℃时,较 25℃和低于 25℃可多固定 151.83%和 166.40%的有机碳;秸秆还田条件下,碱性土壤的有机碳累积程度略高于中性土壤和酸性土壤。综上所述,适量秸秆还田有利于增加土壤碳源,优化微生物的群落结构。但微生物种类复杂,今后研究应致力于不同菌种的不同作用,以精准提高土壤固碳水平。

## 参考文献:

- [1] 黄晶,王学春,鄧正鸿,等.小麦秸秆翻埋还田对水稻秧苗生长及土壤性状的影响[J].四川农业大学学报,2016,34(3):276-281.
- [2] 王钰皓,庞津雯,杨佳霖,等.不同覆盖方式对旱作农田土壤碳氮含量及玉米产量的影响[J].干旱地区农业研究,2022,40(1):20-29,41.
- [3] 董林林,查金芳,沈明星,等.长期秸秆还田对稻麦轮作区土壤有机碳组分构成的影响[J].中国农业科技导报,2022,24(3):166-175.
- [4] 孟维山,朱芳妮,张博文,等.玉米秸秆及其生物炭还田对黑土理化性质及玉米产量的影响[J/OL].吉林农业大学学

- 报,1-9[2024-08-17]. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2023.20225>.
- [5] 张斯梅,段增强,顾克军,等. 稻秸还田下减量施氮对小麦产量、养分吸收及土壤理化性质的影响[J]. 土壤,2023,55(3):537-543.
- [6] 王季斐,童瑶瑶,祝贞科,等. 不同水平外源碳在稻田土壤中转化与分配的微生物响应特征[J]. 环境科学,2019,40(2):970-977.
- [7] 李春雅,王炎伟,王荣,等. 秸秆还田方式对东北水稻土壤理化性质及微生物群落的影响[J]. 微生物学报,2022,62(12):4811-4824.
- [8] LI P F, LIU J, SALEEM M, et al. Editorial: Soil microorganisms under ecological planting[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1227230.
- [9] 李全生. 碳中和目标下我国能源转型路径探讨[J]. 中国煤炭, 2021,47(8): 1-7.
- [10] 习近平. 继往开来,开启全球应对气候变化新征程:在气候雄心峰会上的讲话[J]. 一带一路报道(中英文),2021(1):20-21.
- [11] 马铭娟,郗凤明,尹岩,等. 碳中和视角下秸秆处置方式对碳源汇的贡献[J]. 应用生态学报,2022,33(5):1331-1339.
- [12] LIANG C, SCHIMEL J P, JASTROW J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage[J]. Nature Microbiology, 2017, 2: 17105.
- [13] NELSON D W. Total carbon, organic carbon, and organic matter[M]. Madison: Soil Science Society of American Society of Agronomy, 1996.
- [14] HEDGES L V, GUREVITCH J, CURTIS P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. Ecology, 1999, 80(4):1150.
- [15] POLL C, MARHAN S, INGWERSEN J, et al. Dynamics of litter carbon turnover and microbial abundance in a rye detritusphere[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(6): 1306-1321.
- [16] 梁超,朱雪峰. 土壤微生物碳泵储碳机制概论[J]. 中国科学(地球科学),2021,51(5):680-695.
- [17] RUMPEL C, AMIRASLANI F, KOUTIKA L S, et al. Put more carbon in soils to meet Paris climate pledges[J]. Nature, 2018, 564(7734): 32-34.
- [18] SCHEU S, FALCA M. The soil food web of two beech forests (*Fagus sylvatica*) of contrasting humus type: stable isotope analysis of a macro-and a mesofauna-dominated community[J]. Oecologia, 2000, 123(2): 285-296.
- [19] 葛体达,王东东,祝贞科,等. 碳同位素示踪技术及其在陆地生态系统碳循环研究中的应用与展望[J]. 植物生态学报,2020,44(4):360-372.
- [20] MA Y C, LIU D L, SCHWENKE G, et al. The global warming potential of straw-return can be reduced by application of straw-decomposing microbial inoculants and biochar in rice-wheat production systems[J]. Environmental Pollution, 2019, 252: 835-845.
- [21] 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.
- [22] WANG X J, BUTTERLY C R, BALDOCK J A, et al. Long-term stabilization of crop residues and soil organic carbon affected by residue quality and initial soil pH[J]. Science of the Total Environment, 2017, 587: 502-509.
- [23] LIANG F, LI J W, YANG X Y, et al. Three-decade long fertilization-induced soil organic carbon sequestration depends on edaphic characteristics in six typical croplands[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 30350.
- [24] ROWLEY M C, GRAND S, VERRECCHIA É P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon[J]. Biogeochemistry, 2018, 137(1): 27-49.
- [25] 范钊. 施肥措施对红壤性水稻土团聚体与有机碳组分及其保护机制的影响[D]. 南昌:江西农业大学,2021.
- [26] 朱锟恒,段良霞,李元辰,等. 土壤团聚体有机碳研究进展[J]. 中国农学通报,2021,37(21):86-90.
- [27] 王磊,刘晴虞,史经攀,等. 平原沙土区河岸带不同植被类型对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持研究,2024, 31(1):96-104.
- [28] 张彧行,翁白莎,严登华. 基于文献可视化分析的土壤团聚体研究进展[J]. 地球科学进展,2022,37(4):429-438.
- [29] 裴亚楠,吕卫光,郭涛,等. 秸秆还田配施促腐菌剂对土壤团聚体及其养分的影响[J]. 应用生态学报,2023,34(12):3357-3363.
- [30] 周萍,宋国茜,潘根兴,等. 三种南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究Ⅱ. 团聚体内有机碳的化学结合机制[J]. 土壤学报,2009,46(2):263-273.
- [31] HAN L F, SUN K, JIN J, et al. Some concepts of soil organic carbon characteristics and mineral interaction from a review of literature[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 94: 107-121.
- [32] SIX J, CONANT R T, PAUL E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils[J]. Plant and Soil, 2002, 241(2): 155-176.
- [33] FALKOWSKI P G, FENCHEL T, DELONG E F. The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles[J]. Science, 2008, 320(5879): 1034-1039.
- [34] HUSAIN H, KEITEL C, DIJKSTRA F A. Fungi are more important than bacteria for soil carbon loss through priming effects and carbon protection through aggregation[J]. Applied Soil Ecology, 2024, 195: 105245.
- [35] 肖健,王娜,杨会娜,等. 秸秆还田对土壤理化性状和土壤微生物的影响[J]. 现代农业科技,2023(5):166-168,173.
- [36] CUI X W, ZHANG Y Z, GAO J S, et al. Long-term combined application of manure and chemical fertilizer sustained higher nutrient status and rhizospheric bacterial diversity in reddish paddy soil of Central South China[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 16554.
- [37] ZHOU J, GUAN D W, ZHOU B K, et al. Influence of 34-years of fertilization on bacterial communities in an intensively cultivated black soil in Northeast China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 90: 42-51.

[38] 唐志伟,翁颖,朱夏童,等. 秸秆还田下中国农田土壤微生物量碳变化及其影响因素的 Meta 分析[J]. 生态环境学报,2023,32(9):1552-1562.

[39] 刘子刚,卢海博,赵海超,等. 旱作区春玉米秸秆还田方式对土壤微生物量碳氮磷及酶活性的影响[J]. 西北农业学报,2022,31(2):183-192.

[40] 兰木羚. 秸秆翻埋对土壤团聚体有机碳分布和微生物群落结构的影响[D]. 重庆:西南大学,2016.

[41] 杨铭. 秸秆还田与耕作方式对土壤微生物碳源代谢功能多样性的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(6):175-180.

[42] 杨阳,王宝荣,窦艳星,等. 植物源和微生物源土壤有机碳转化与稳定研究进展[J]. 应用生态学报,2024,35(1):111-123.

[43] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.

[44] 于冰. 长期不同施肥处理红壤对<sup>13</sup>C 标记玉米秸秆降解及关联微生物的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2017.

[45] QU F T, GAO W F, WU D, et al. Insight into bacterial role attribution in dissolved organic matter humification during rice straw composting with microbial inoculation[J]. Science of the Total Environment, 2024, 912: 169171.

[46] CHENU C. Influence of a fungal polysaccharide, scleroglucan, on clay microstructures[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1989, 21(2): 299-305.

[47] CHENU C, COSENTINO D. Microbial regulation of soil structural dynamics[M]//The architecture and biology of soils: life in inner space. UK: CABI, 2011: 37-70.

[48] 马南,安婷婷,张久明,等. 添加玉米秸秆和根茬对不同肥力黑土微生物残体碳氮的影响[J]. 中国农业科学,2023, 56(4):686-696.

[49] 宋文婕,梁誉正,陶贞,等. 微生物介导的土壤有机碳动态研究进展[J]. 地球科学进展,2023,38(12):1213-1223.

[50] KUZYAKOV Y, FRIEDEL J K, STAHR K. Review of mechanisms and quantification of priming effects[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(11/12): 1485-1498.

[51] SPARLING G P, GRAHAM SHEPHERD T, KETTLES H A. Changes in soil organic C, microbial C and aggregate stability under continuous maize and cereal cropping, and after restoration to pasture in soils from the Manawatu Region, New Zealand[J]. Soil and Tillage Research, 1992, 24(3): 225-241.

[52] BLAGODATSKAYA E, KUZYAKOV Y. Mechanisms of real and apparent priming effects and their dependence on soil microbial biomass and community structure: critical review[J]. Biology and Fertility of Soils, 2008, 45(2): 115-131.

# Meta-Analysis of Carbon Conversion and Carbon Accumulation Characteristics of Soil Microorganisms on Straw

HAN Jiaye<sup>1</sup>, ZHANG Jiuming<sup>2</sup>, YUAN Jiahui<sup>2</sup>, ZHU Yingxue<sup>2</sup>, KUANG Enjun<sup>2</sup>, CHI Fengqin<sup>2</sup>, ZHANG Shaoliang<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Heilongjiang Academy of Black Soil Conservation & Utilization / Key Laboratory of Black Land Protection and Utilization of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Harbin 150086, China)

**Abstract:** Soil organic carbon (SOC) is a major component of soil, and its small changes will have a significant impact on terrestrial carbon pools and global climate change. Meta-integration analysis was used to analyze the mechanism of microbial-mediated carbon transformation and stabilization in straw and to elucidate the effects of various factors on soil organic carbon. Meta-analysis results showed that soil organic carbon (SOC), soluble organic carbon (DOC) and microbial carbon (MBC) content increased by 23.84%, 10.94% and 20.13%, respectively, after straw was returned to the field, and the soil microorganisms significantly affected the organic carbon content of straw. Content of organic carbon under field return, and the difference between the carbon contribution of fungal and bacterial residues reached 33.12% and 14.80%. The best effect of soil organic carbon accumulation was achieved when the type of returned stover was maize stover, the soil type was alkaline soil, and the temperature was higher than 25 °C. The chemical-biological protection mechanism in the soil can also increase the soil organic carbon content, which is conducive to the sequestration of organic carbon, so that the soil produces an excitation effect to stimulate the growth and metabolism of microorganisms, thus forming a microbial carbon pump, so that the organic carbon is in a dynamic equilibrium in the soil. For agricultural production, the most important soil functions are the maintenance of crop productivity, nutrient transformation, and the maintenance of microbial abundance and activity, which should be prioritized in order to maintain soil organic carbon content.

**Keywords:** soil microorganisms; straw incorporation; soil organic carbon; straw carbon transformation