



李侠, 胡一民, 贝水宽, 王光州, 张运龙, 杨改强. 施肥方式和土壤水分变化对秸秆降解特征及微生物秸秆碳利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(11): 79-89.
LI Xia, HU Yimin, BEI Shuikuan, WANG Guangzhou, ZHANG Yunlong, YANG Gaiqiang. Effects of long-term fertilization and soil moisture on straw decomposition and microbial straw-carbon use efficiency[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(11): 79-89.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2023.11.07

施肥方式和土壤水分变化对秸秆降解特征及微生物秸秆碳利用效率的影响

李侠¹ 胡一民^{2*} 贝水宽³ 王光州⁴ 张运龙⁵ 杨改强⁶

(1. 山西大同大学 农学与生命科学学院, 山西 大同 037009;

2. 中国农业大学 国家农业科技战略研究院, 北京 100193;

3. 南京林业大学 生物与环境学院, 南京 210037;

4. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;

5. 中国农业大学 草业科学与技术学院, 北京 100193;

6. 太原科技大学 环境科学与工程学院, 太原 030024)

摘要 为探究华北平原施肥方式和土壤水分对玉米秸秆降解特征及微生物秸秆碳利用效率的影响, 从长期定位实验站采集施用 9 t/hm² 牛粪的有机肥和等养分含量的化肥处理(N、P、K 肥)的表层土壤, 将¹³C 标记的玉米秸秆分别添加到 2 种施肥方式的土壤中, 在恒湿(田间持水量(WHC)60%)和干旱胁迫(WHC 30%)条件下培养 56 d, 测定来源于秸秆和土壤本底的 CO₂ 排放和微生物量碳(MBC)的动态变化, 并分析微生物秸秆碳利用效率和代谢熵。结果表明: 添加秸秆后, 随着培养时间的延长, 土壤总 CO₂-C 排放通量先降低后趋于稳定, 土壤总 MBC 先增加后降低。相比恒湿条件, 干旱胁迫显著降低了来源于秸秆和土壤本底(培养第 1、3 天除外)的 CO₂-C 累积排放量, 却显著提高了微生物秸秆碳利用效率; 培养前期(第 1—7 天), 干旱胁迫显著降低了土壤总 MBC, 但后期(第 14—56 天)对土壤总 MBC 影响不显著。恒湿条件下, 施用有机肥的土壤中秸秆(培养第 1 天除外)和土壤本底(培养第 1、3 天除外)来源的 CO₂-C 累积排放量、微生物代谢熵均显著高于化肥处理, 但在培养第 3 天微生物秸秆碳利用效率显著低于化肥处理; 而干旱胁迫条件下 2 种施肥方式间秸秆(培养第 56 天除外)和土壤本底来源的 CO₂-C 累积排放量、微生物代谢熵和秸秆碳利用效率差异均不显著。综上, 恒湿条件下, 施用化肥可显著降低秸秆和土壤原有有机碳的累积矿化量, 在培养第 3 天微生物秸秆碳利用效率显著升高, 有利于秸秆碳在土壤中的固存; 而在干旱胁迫下, 化肥和有机肥施用均有利于秸秆碳的固存。

关键词 施肥; 干旱; CO₂ 排放; 微生物量碳

中图分类号 S154

文章编号 1007-4333(2023)11-0079-11

文献标志码 A

Effects of long-term fertilization and soil moisture on straw decomposition and microbial straw-carbon use efficiency

LI Xia¹, HU Yimin^{2*}, BEI Shuikuan³, WANG Guangzhou⁴, ZHANG Yunlong⁵, YANG Gaiqiang⁶

(1. College of Agronomy and Life Science, Shanxi Datong University, Datong 037009, China;

2. National Academy of Agricultural Science and Technology Strategy, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

3. College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

4. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

5. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

6. School of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

收稿日期: 2023-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(42007032); 山西省科技合作交流专项(202204041101018); 山西大同大学博士学位教师科研启动项目(2022-B-02)

第一作者: 李侠(ORCID: 0000-0003-3450-8956), 副教授, 主要从事土壤微生物环境调控研究, E-mail: lixia810504@163.com

通讯作者: 胡一民(ORCID: 0009-0004-5717-6610), 职员/博士研究生, 主要从事宏观农业与农业生态研究, E-mail: yiminhu002@cau.edu.cn

Abstract To investigate the effects of fertilization regimes and moisture changes on the degradation characteristics of maize straw and the microbial straw-carbon use efficiency in north China Plain. In this study, surface soil treated with organic fertilizer (9 t/hm² cow manure) and chemical fertilizer (N P K fertilizer) with equivalent nutrient content was collected from long-term experimental field. The ¹³C labeled maize straw was separately added to the soil under the two fertilization regimes, and soil was subjected to constant humidity (60% water holding capacity, WHC) and drought stress (30% WHC) conditions for 56 d. The dynamics of CO₂ emissions derived from straw and background soil, and microbial biomass carbon (MBC) were determined, and microbial straw-carbon use efficiency and metabolic quotient were analyzed. The results showed that: After the addition of straw, soil total CO₂-C flux initially decreased and then stabilized, while total MBC initially increased and then decreased with incubation time. Compared to constant humidity, drought stress significantly reduced the cumulative CO₂-C emissions derived from straw and background soil (except on day 1 and day 3 of incubation), while significantly increased microbial straw-carbon use efficiency. Drought stress significantly decreased soil total MBC during the early incubation period (day 1 to 7), and there was no significant difference between the drought stress and constant humidity treatments during the later incubation period (day 14 to 56). Under constant humidity conditions, the cumulative CO₂-C emissions derived from straw (except on day 1 of incubation) and background soil (except on day 1 and day 3 of incubation), as well as the microbial metabolic quotient were significantly higher in soil with organic fertilizer treatment compared to soil with chemical fertilizer treatment. However, the microbial straw-carbon use efficiency was significantly lower in soil with organic fertilizer treatment compared to soil with chemical fertilizer treatment on day 3 of incubation. Under drought conditions, there were no significant differences in the cumulative CO₂-C emissions derived from straw (except on day 56 of incubation) and background soil, microbial metabolic quotient and straw-carbon use efficiency between the two fertilization regimes. In conclusion, under constant humidity conditions, the application of chemical fertilizer significantly reduced cumulative the mineralization of straw and native soil organic carbon, and significantly increased microbial straw-carbon utilization efficiency on day 3 of incubation, thereby was beneficial to the sequestration of straw carbon in soil. Both chemical and organic fertilizers were beneficial to the sequestration of straw carbon under drought conditions.

Keywords fertilization; drought; CO₂ emissions; microbial biomass carbon

土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)是影响土壤质量和肥力的重要因素,对维持土壤可持续性至关重要^[1]。提升 SOC 含量有利于促进作物生长、改善土壤理化性质及缓解温室效应^[1-3]。农业生态系统中,秸秆还田是提高土壤有机碳的一项重要管理措施^[4-5]。我国秸秆资源丰富,2013 年作物秸秆总产量约为 9.9 亿 t,占全球秸秆总量(50 亿 t)的 20%左右^[6-7]。这些秸秆中含有大量不稳定碳,可作为微生物的基本碳和能量来源^[8-9]。秸秆还田后,可降解形成可溶性有机碳释放到土壤中,一部分用以维持微生物代谢需要的能量,最终以微生物呼吸的形式释放到空气中,另一部分则用来合成微生物生物量,以微生物残体或代谢物的形式进入较稳定的 SOC 库。微生物秸秆碳利用效率(Carbon use efficiency, CUE)指微生物将投入的秸秆碳用于合成微生物量的占比^[10],直接影响秸秆还田后大气和土壤之间的碳平衡。微生物秸秆 CUE 越大,秸秆碳用于呼吸消耗比例越低,而以微生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)固定在土壤中的比例也越大。

因此,研究不同农业管理措施对微生物秸秆碳利用效率的影响对于提高土壤碳固持具有重要的意义。

华北平原是我国粮食的主要产区,土壤有机碳含量普遍偏低,约为 0.5%~0.8%^[11],是秸秆还田大力推广应用的主要地区。王旭东等^[12]通过 Meta 分析表明秸秆还田可显著增加土壤有机碳的含量,但不同区域增加幅度有差异,华北地区 SOC 增幅低于全国平均水平(12.1%)。通常,加入新鲜有机物会促进土壤原有有机碳的降解(正激发效应),而养分的输入会缓解外源有机碳引起的微生物对土壤原有有机碳的正激发效应^[8,13]。化肥和有机肥是华北农田常采用的施肥方式,2 种施肥方式不仅会改变土壤养分含量,还影响土壤微生物活性、群落结构及对碳源的利用,从而影响秸秆还田后土壤碳固定的净效应^[14-16]。Wu 等^[17]研究表明,与不施肥处理相比,长期施用化肥和有机肥均促进微生物对秸秆碳的利用,增加土壤对秸秆碳的固持。这可能是因为秸秆 C/N 显著高于土壤及微生物生长所需的 C/N,在不施肥土壤中微生物利用外源碳生长代谢受到氮

素的限制,此时微生物会分泌相应的酶,加速土壤中 C/N 较低的有机质的矿化^[18-19]。水分是影响秸秆降解的重要因素,华北平原年降水主要集中在 6—9 月,这个时期土壤湿度相对较高,而其他季节土壤含水量较低,处于干旱状态。随着气候变化和人类活动对水循环系统的影响,华北地区的降水量有减少趋势,干旱越来越频繁、程度也越来越严重,会对农业生产系统产生巨大影响^[20-21]。唐国勇等^[22]研究表明外源有机碳和土壤本底有机碳的矿化量随土壤含水量的提高而增加。然而关于在华北平原不同的水分条件下,比较长长期施用化肥与有机肥对秸秆还田后碳固持效应的研究鲜见报道。本研究以华北地区长期施化肥和有机肥的土壤为研究对象,采用¹³C 标记秸秆同位素技术,分析秸秆还田后在不同水分条件下土壤 CO₂ 排放、微生物量碳的变化特征,并解析秸秆碳和土壤本底有机碳对土壤总 CO₂-C 累积排放量和总微生物量碳的贡献,旨在探究不同水分和施肥方式对秸秆还田后秸秆的降解特征和微生物秸秆碳利用效率,以期为华北地区制定有利于提高土壤有机碳固持的管理措施提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试土壤采自河北省邯郸市曲周县中国农业大

学曲周实验站(36.87° N,115.02° E),该站地处温带半湿润大陆季风性气候,年平均降水量为 494 mm,土壤属于华北平原典型盐化潮土,该长期定位试验始于 2007 年,连续进行有机肥处理及与有机肥等养分含量的化肥处理,种植方式为小麦-玉米轮作,每季的牛粪在施用前经过充分晾晒、堆腐、碾压、粉碎,同时测定牛粪氮、磷、钾含量和水分含量。具体的养分投入量见张晓宁^[23]。牛粪均是在播前一次性撒施,小麦季撒施后经过翻耕,玉米季撒施后经过旋耕施入。化学肥料均采用尿素、磷酸钙和硫酸钾,氮肥总量的 1/3 用作基肥,2/3 用作追肥分别 在小麦季拔节期和玉米季大喇叭口期,随灌溉水施入。本试验在 2015 年采集施用 9 t/hm² 牛粪的有机肥和等养分含量的化肥处理的土壤,于玉米收获季取 0—20 cm 表层土壤,去除可见杂质和根系,过 2 mm 筛,混合均匀,一部分土壤鲜样供培养试验所用,其余土壤风干用于理化性质分析,土壤基本理化性质见表 1。

供试秸秆为¹³C 标记的玉米‘郑单 958’的秸秆,播种 16 d 后在密闭的玻璃罩中进行¹³ CO₂ (Ba¹³CO₃,99%,上海化工研究院)脉冲标记,共标记 7 d。标记结束后第二天收获玉米植株地上部,105 °C 杀青 30 min,60 °C 烘干、粉碎成粉末状备用,其有机碳含量为 39.2%, $\delta^{13}\text{C}$ 为 1 239.1‰。

表 1 长期定位试验土壤基础理化性质

Table 1 The basic physico-chemical properties of soil in the long-term experiment site

处理 Treatment	pH	铵态氮/ (mg/kg) NH ₄ ⁺ -N	硝态氮/ (mg/kg) NO ₃ ⁻ -N	全氮/ (g/kg) Total N	有机碳/ (g/kg) SOC	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	C/N
有机肥 Organic fertilizer	7.50	1.5	31.4	1.3	12.2	-19.1	9.4
化肥 Chemical fertilizer	7.45	2.1	15.4	0.9	7.4	-20.5	8.2

1.2 试验设计及培养过程

本试验设施肥方式和水分二因素,施肥方式分别设施用有机肥(OF,施用 9 t/hm² 牛粪)和化肥(CF,与 9 t/hm² 牛粪等养分含量的 N、P、K 肥料)2 个水平;水分分别设恒湿(W,60%田间持水量,Water holding capacity,WHC)和干旱胁迫(D,30%WHC)2 个水平,进行二因素完全随机试验设

计,共 4 个处理。

对土壤进行预培养,取新鲜的土壤,调节水分约为田间持水量的 60%(土壤含水率的 15%),放入瓷盘中用塑料袋遮盖 20 °C 预培养 7 d,结束后测定土壤含水量。然后分别用 500 mL 广口瓶装入相当于 200 g 干重的经预培养的有机肥或化肥处理土壤,用 Parafilm 膜封口,并在膜上均匀扎 6 个小孔透气

保水, 25 °C 恒温培养。恒湿处理采用称重法补充水分保持田间持水量为 60%; 干旱胁迫采用变色硅胶 (Aladdin) 吸水, 每瓶 20 g, 放置于胶卷盒中, 并外套灭菌的自封袋, 避免其影响土壤其他的理化性质与微生物群落, 使土壤水分含量降至田间持水量的 30% (约为华北平原盐化潮土的萎蔫系数)。4 周后将所有处理均投入 0.5 g/瓶 ^{13}C 标记的玉米秸秆混匀进行培养, 共设置 6 批, 分别在添加秸秆后的第 1、3、7、14、28、56 天进行气体采集 (用于 CO_2 测定) 和土壤破坏性取样 (测定微生物量碳), 3 次重复, 共 72 瓶。

1.3 指标测定

1.3.1 CO_2 排放及 $\delta^{13}\text{C}$ 测定

土壤总 $\text{CO}_2\text{-C}$ 排放通量采用修正的室内静态培养-气相色谱法测定^[24], 抽气前充分通气, 密闭后采用 4 针法 (0、10、20、30 min) 进行连续抽取气体, 每针 10 mL, 采集的气体样品于 24 h 内用气相色谱 (美国 Agilent 公司的 GC 7890) 测定 CO_2 浓度, 并计算土壤总 $\text{CO}_2\text{-C}$ 排放通量和累积排放量。 CO_2 样品中的 $\delta^{13}\text{C}$ 采用 Trace-Gas 痕量气体纯化与浓缩系统 (赛默飞世尔科技有限公司)、IsoPrime-100 稳定同位素分析仪 (德国 Elementar 公司) 联用测定。

1.3.2 土壤微生物量碳及 $\delta^{13}\text{C}$ 测定

土壤总微生物量碳测定采用氯仿熏蒸浸提法^[25]。分别对土壤进行氯仿熏蒸和不熏蒸处理, 随后用 K_2SO_4 溶液浸提, 过滤后用总有机碳分析仪 (德国 Elementar 公司的 Element high TOC II) 测定并计算微生物量碳, 换算系数为 0.45; 同时取部分滤液冷冻干燥, 用 EA-IRMS (元素分析仪-同位素比例质谱分析联用仪, Elementar vario PYRO cube-IsoPrime100 Isotope Ratio Mass Spectrometer, 德国) 测定并计算微生物量碳中的 $\delta^{13}\text{C}$ 。

1.3.3 来源于秸秆碳比例的计算

所有碳库 (CO_2 、MBC) 中来源于秸秆的碳所占比例 f 计算^[26]:

$$f = (\delta^{13}\text{C}_{\text{sample}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{control}}) / (\delta^{13}\text{C}_{\text{straw}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{control}}) \quad (1)$$

各碳库中来源于秸秆的碳 ($C_{\text{straw-sample}}$) 计算^[27]:

$$C_{\text{straw-sample}} = C_{\text{sample}} \times f \quad (2)$$

各碳库中来源于土壤本底的碳 ($C_{\text{soil-sample}}$) 计算:

$$C_{\text{soil-sample}} = C_{\text{sample}} \times (1 - f) \quad (3)$$

式中: $\delta^{13}\text{C}_{\text{sample}}$, 添加秸秆后各碳库中 $\delta^{13}\text{C}$; $\delta^{13}\text{C}_{\text{straw}}$, 秸秆的 $\delta^{13}\text{C}$, 为 1 239.1‰; $\delta^{13}\text{C}_{\text{control}}$, 不加秸秆的土壤的 $\delta^{13}\text{C}$; C_{sample} , 添加秸秆后各碳库中的碳量包括总 $\text{CO}_2\text{-C}$ 排放通量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 和总微生物量碳, mg/kg 。

1.3.4 微生物秸秆碳利用效率 (CUE)

微生物秸秆碳利用效率 (CUE) 的计算^[28]:

$$\text{CUE} = C_{\text{straw-MBC}} / (C_{\text{straw-MBC}} + C_{\text{straw-CO}_2\text{ emission}}) \quad (4)$$

式中: $C_{\text{straw-MBC}}$, 秸秆来源的微生物量碳, mg/kg ; $C_{\text{straw-CO}_2\text{ emission}}$, 秸秆来源的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 累积排放量, mg/kg 。

1.3.5 微生物代谢熵 (q_{CO_2})

q_{CO_2} 指微生物呼吸速率与微生物量碳的比率, 即单位微生物量的微生物在单位时间里的呼吸作用强度, 计算公式^[28]:

$$q_{\text{CO}_2} = C_{\text{straw-CO}_2\text{ flux}} / C_{\text{straw-MBC}} \quad (5)$$

式中: $C_{\text{straw-MBC}}$, 秸秆来源的微生物量碳, mg/kg ; $C_{\text{straw-CO}_2\text{ flux}}$, 秸秆来源的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 排放通量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 。

1.4 数据处理

采用三因素方差分析检验培养时间、施肥方式和水分对各变量的影响。采用单因素方差分析检验在同一取样时间各处理对变量的影响, 采用最小显著性差异法 (LSD) 对各处理间差异进行多重比较, 以上统计分析均在 SPSS 22.0 中进行, 采用 Sigmaplot 12.5 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 CO_2 排放动态

由表 2 和图 1 可知, 添加秸秆后, 培养时间、施肥方式、水分及各因素间的交互作用均显著影响土壤总 $\text{CO}_2\text{-C}$ 排放通量, 其中水分的影响最大, 其次为培养时间, 施肥方式的影响最小。添加秸秆后, 总 $\text{CO}_2\text{-C}$ 排放通量均在培养的第 1 天达到峰值, 然后急剧下降, 从第 14 天开始缓慢下降, 第 28—56 天变化平缓、基本达到一个稳定状态。在整个培养阶段, 恒湿处理总 $\text{CO}_2\text{-C}$ 排放通量均显著高于干旱胁迫处理。施肥方式对总 $\text{CO}_2\text{-C}$ 排放通量的影响与培养时间和水分条件有关, 恒湿 (W, 60% WHC) 条件下, 除培养第 1、56 天外, 有机肥处理 (OF) 土壤总 $\text{CO}_2\text{-C}$ 排放通量显著高于化肥处理 (CF); 干旱胁迫 (D, 30% WHC) 条件下, 除培养第 1 天外, 有机肥与化肥处理的土壤总 $\text{CO}_2\text{-C}$ 排放通量差异不显著。

添加秸秆后, 培养时间、施肥方式、水分及各因素间的交互作用均显著影响土壤总 $\text{CO}_2\text{-C}$ 累积排

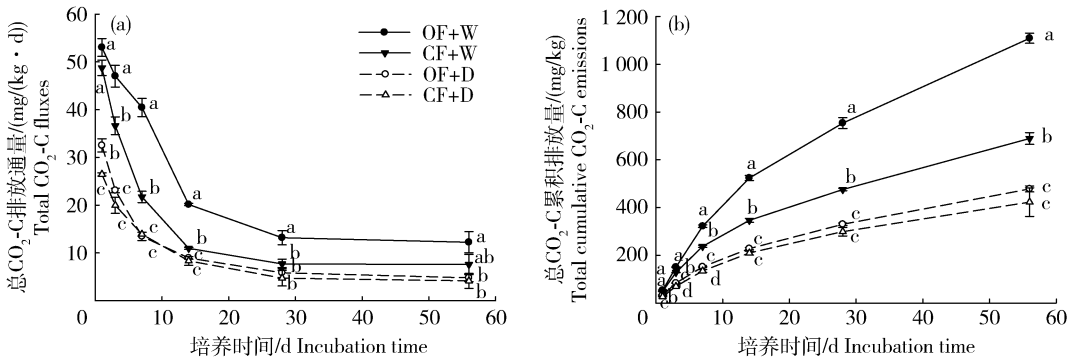
放量,其中水分影响最大,其次为培养时间,施肥方式影响最小(表 2 和图 1)。在整个培养阶段,恒湿处理的土壤总 CO₂-C 累积排放量均显著高于干旱胁迫处理,到培养结束时约为后者的 2 倍。恒湿条件下,除培养第 1 天外,有机肥处理的土壤总 CO₂-C

累积排放量显著高于化肥处理,到培养结束时增加了 61%;而干旱胁迫条件下,在培养第 1—7 天,有机肥处理的土壤总 CO₂-C 累积排放量显著高于化肥处理,在培养第 14—56 天,有机肥与化肥处理的土壤总 CO₂-C 累积排放量差异不显著。

表 2 培养时间、施肥和水分条件对添加秸秆后土壤总 CO₂-C 排放通量及累积排放量的方差分析

Table 2 ANOVA of the influence of incubation time, fertilization and soil moisture on total CO₂-C fluxes and cumulative emissions after straw amendments

变异来源 Source of variation	总 CO ₂ -C 排放通量 Total CO ₂ -C fluxes		总 CO ₂ -C 累积排放量 Total cumulative CO ₂ -C emissions	
	F	P	F	P
培养时间 Time (T)	382.82	<0.001	890.05	<0.001
施肥 Fertilization (F)	87.91	<0.001	210.22	<0.001
水分 Moisture (M)	507.20	<0.001	930.27	<0.001
T×F	2.90	0.023	31.61	<0.001
T×M	30.94	<0.001	100.80	<0.001
F×M	37.36	<0.001	117.93	<0.001
T×F×M	6.31	<0.001	20.88	<0.001



OF, 有机肥; CF, 化肥; W, 恒湿; D, 干旱胁迫。不同的小写字母表示在同一取样时间各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。OF and CF indicate organic and chemical fertilizer, respectively. W and D indicate constant water and drought stress, respectively. Different lowercase letters indicate the significant differences among treatments at 0.05 level at each sampling time. The same below.

图 1 添加秸秆后土壤总 CO₂-C 排放通量(a)和累积排放量(b)的动态变化

Fig. 1 Dynamics of total CO₂-C fluxes (a) and cumulative emissions (b) after straw amendments

由表 3 和图 2 可知,添加秸秆后,培养时间、水分及二者的交互作用均显著影响秸秆来源的 CO₂ 排在土壤总 CO₂ 排放中的占比,其中培养时间的影响大于水分条件,但施肥方式的影响不显著。恒湿处理(W)秸秆来源的 CO₂ 排放比例在培养第 1 天时最高,高达 87%,之后开始下降,到培养结束时仅为 9%。干旱胁迫处理(D)秸秆来源的 CO₂ 排放

比例先升高,在培养第 3 天时最高,达到 68%,之后开始下降,到培养结束时仅为 5%。在培养第 1、28 和 56 天时,恒湿处理(W)秸秆来源的 CO₂-C 排放比例显著高于干旱胁迫处理。

由表 3 和图 3 可知,添加秸秆后,培养时间、施肥方式、水分及各因素间交互作用均显著影响秸秆来源的 CO₂-C 累积排放量,其中水分影响最大,其次

表3 培养时间、施肥和水分条件对添加秸秆后秸秆来源的CO₂比例和不同来源的CO₂-C累积排放量的方差分析
Table 3 ANOVA of the influence of incubation time, fertilization and soil moisture on straw-derived CO₂ percentage, and cumulative CO₂-C emissions derived from straw and soil after straw amendments

变异来源 Source of variation	秸秆来源的CO ₂ 比例 Straw-derived CO ₂ percentage		秸秆来源的CO ₂ -C 累积排放量 Straw-derived cumulative CO ₂ -C emissions		土壤来源的CO ₂ -C 累积排放量 Soil-derived cumulative CO ₂ -C emissions	
	F	P	F	P	F	P
	培养时间 Time (T)	202.27	<0.001	416.46	<0.001	438.21
施肥 Fertilization (F)	2.12	0.152	230.21	<0.001	58.10	<0.001
水分 Moisture (M)	14.08	<0.001	1473.92	<0.001	180.40	<0.001
T×F	0.32	0.900	17.28	<0.001	14.48	<0.001
T×M	11.86	<0.001	52.59	<0.001	47.72	<0.001
F×M	0.05	0.829	104.24	<0.001	38.11	<0.001
T×F×M	0.09	0.993	9.84	<0.001	10.01	<0.001

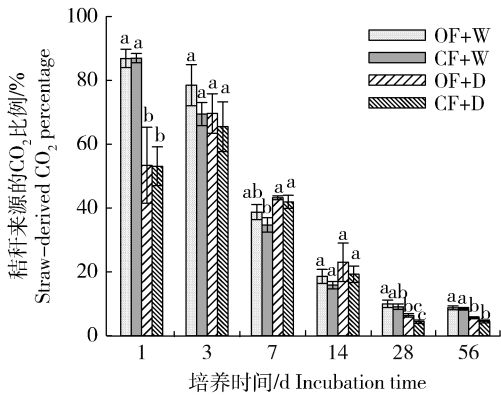


图2 添加秸秆后秸秆来源的CO₂排放比例的动态变化
Fig. 2 Dynamics of straw-derived CO₂ percentage after straw amendments

为培养时间,施肥方式影响最小。在培养第1—14天,秸秆来源的CO₂-C累积排放量迅速升高,之后缓慢增加甚至不再增加。在整个培养阶段,恒湿处理秸秆来源的CO₂-C累积排放量均显著高于干旱胁迫处理。恒湿条件下,除培养第1天外,有机肥处理秸秆来源的CO₂-C累积排放量显著高于化肥处理,培养结束时,有机肥和化肥处理分别有350和224 mg/kg来自秸秆的碳被矿化,相当于36%和22%的秸秆碳量;干旱胁迫条件下,除培养第56天外,2种施肥方式间秸秆来源的CO₂-C累积排放量差异均不显著,培养结束时,有机肥和化肥处理分别

有139和116 mg/kg来自秸秆的碳被矿化,相当于14%和12%的秸秆碳量。

添加秸秆后,培养时间、施肥方式、水分及各因素间交互作用均显著影响土壤来源的CO₂-C累积排放量,其中培养时间影响最大,其次为水分,施肥方式影响最小(表3和图3)。在整个培养阶段,土壤来源的CO₂-C累积排放量不断增加。除培养第1、3天外,恒湿处理土壤来源的CO₂-C累积排放量显著高于干旱胁迫处理。在恒湿条件下,除培养第1、3天外,有机肥处理土壤来源的CO₂-C累积排放量显著高于化肥处理,到培养结束时增加了63%;而在干旱胁迫条件下2种施肥方式间差异均不显著。

2.2 微生物量碳

由表4和图4可知,添加秸秆后,培养时间、施肥方式、水分及部分交互作用均显著影响土壤总微生物量碳(MBC)。随着培养时间的延长,土壤总MBC先增加后降低,恒湿条件下在第7天达到高峰,干旱胁迫条件下,有机肥处理在第14天达到高峰,化肥处理在第14—28天达到高峰。在培养第1—7天,恒湿处理的土壤总MBC显著高于干旱胁迫处理,在培养第14—56天,2种水分处理间差异不显著。在恒湿条件下培养第7、14天和干旱胁迫下培养第14天时,有机肥处理土壤总MBC显著高于化肥处理,而在其余取样时间2种施肥方式间差异均不显著。

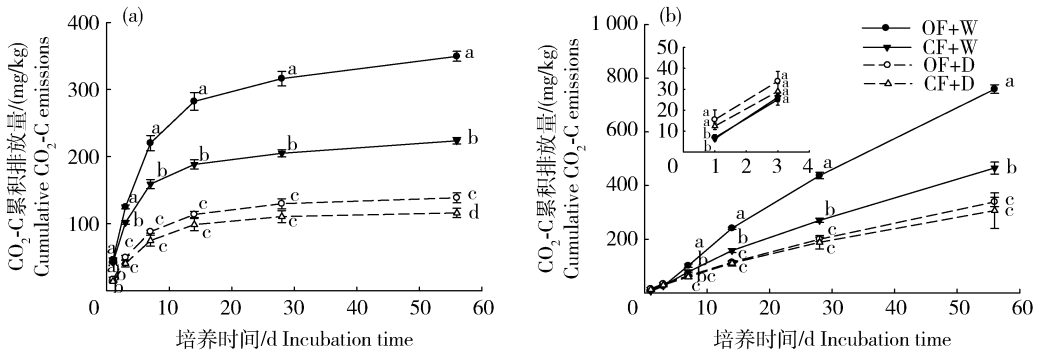


图 3 添加秸秆后秸秆来源(a)和土壤来源(b)的 CO₂-C 累积排放量的动态变化

Fig. 3 Dynamics of cumulative CO₂-C emissions derived from straw (a) and soil (b) after straw amendments

表 4 培养时间、施肥和水分对添加秸秆后土壤总微生物量碳的方差分析

Table 4 ANOVA of the influence of incubation time, fertilization and soil moisture on total microbial biomass carbon (MBC) after straw amendments

变异来源 Source of variation	总微生物量碳 Total microbial biomass carbon (MBC)	
	F	P
培养时间 Time (T)	47.54	<0.001
施肥 Fertilization (F)	24.31	<0.001
水分 Moisture (M)	47.53	<0.001
T×F	4.08	0.004
T×M	16.41	<0.001
F×M	2.00	0.163
T×F×M	0.25	0.937

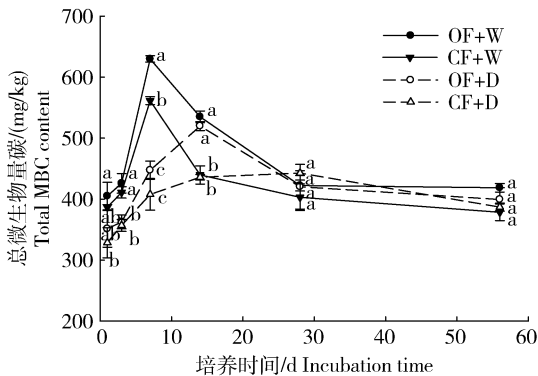


图 4 添加秸秆后土壤总微生物量碳的动态变化

Fig. 4 Dynamics of soil total microbial biomass carbon (MBC) after straw amendments

由表 5 和图 5 可知,添加秸秆后,培养时间、施肥方式、水分及培养时间与水分的交互作用均显著影响秸秆来源的 MBC 比例,其中培养时间的影响最大,其次为水分,施肥方式的影响最小。在培养第 3 天时,恒湿处理秸秆来源的 MBC 比例显著低于干旱胁迫处理,而同一水分条件下 2 种施肥方式间差异不显著;在培养第 14 天时,施肥方式和水分处理对秸秆来源的 MBC 比例均无显著影响。

添加秸秆后,培养时间和水分条件均显著影响秸秆来源的 MBC,其中培养时间的影响大于水分,而施肥方式的影响不显著(表 5 和图 5)。培养第 3 天时,秸秆来源的 MBC 显著高于第 14 天。在培养第 3 天时,化肥处理条件下恒湿处理秸秆来源的 MBC 显著低于干旱胁迫处理,而同一水分条件下 2 种施肥方式间差异不显著;在培养第 14 天时,施肥方式和水分处理对秸秆来源的 MBC 均无显著影响。添加秸秆后,培养时间、施肥方式、水分及培养时间与水分的交互作用均显著影响土壤来源的 MBC,其中培养时间的影响最大,其次为水分,施肥方式的影响最小(表 5 和图 5)。培养第 3 天时土壤来源的 MBC 显著低于第 14 天。在培养第 3 天时,恒湿处理土壤来源的 MBC 显著高于干旱胁迫处理,而同一水分条件下 2 种施肥方式间差异不显著;在培养第 14 天时,两种水分条件下,有机肥处理土壤来源的 MBC 均显著高于化肥处理。

2.3 微生物秸秆碳利用效率及代谢熵

添加秸秆后,培养时间、施肥方式、水分及培养时间与水分的交互作用均显著影响微生物秸秆碳利用效率,其中培养时间的影响最大,其次为水分,施肥

表5 培养时间、施肥和水分条件对添加秸秆后秸秆来源的微生物量碳比例、不同来源的微生物量碳、微生物秸秆碳利用效率和代谢熵的方差分析

Table 5 ANOVA of the influence of incubation time, fertilization and moisture on straw-derived microbial biomass carbon (MBC) percentage, MBC derived from straw and soil, microbial straw-carbon use efficiency and metabolic quotient after straw amendments

变异来源 Source of variation	秸秆来源的微生物 量碳比例 Straw-derived MBC percentage		秸秆来源的 微生物量碳 Straw-derived MBC		土壤来源的 微生物量碳 Soil-derived MBC		微生物秸秆碳 利用效率 Microbial straw-carbon use efficiency		代谢熵 Microbial metabolic quotient	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
	培养时间 Time (T)	55.50	<0.001	18.60	<0.001	105.72	<0.001	1272.70	<0.001	11.43
施肥 Fertilization (F)	6.53	0.021	1.77	0.203	19.56	<0.001	9.83	0.006	12.29	0.003
水分 Moisture (M)	21.56	<0.001	8.83	0.009	27.92	<0.001	135.90	<0.001	37.96	<0.001
T×F	0.40	0.536	1.17	0.295	1.36	0.261	0.43	0.523	0.22	0.648
T×M	11.47	0.004	3.14	0.096	11.65	0.004	6.99	0.018	8.35	0.011
F×M	0.02	0.903	0.06	0.814	0.32	0.577	1.76	0.204	6.09	0.025
T×F×M	0.33	0.576	0.34	0.567	0.45	0.511	0.03	0.876	0.02	0.896

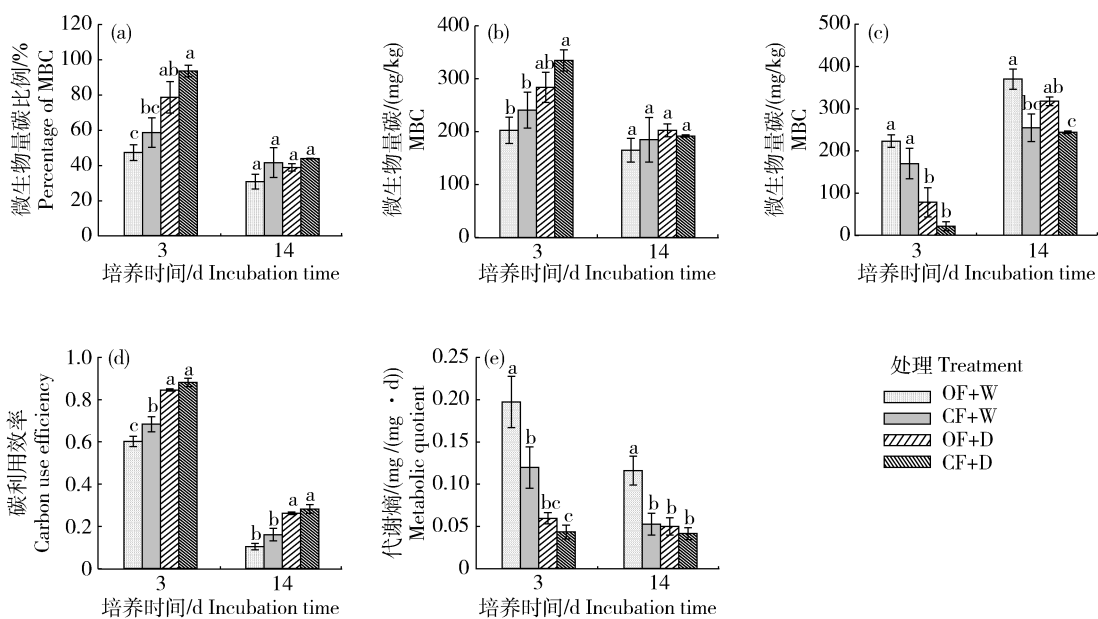


图5 添加秸秆后不同处理中秸秆来源的微生物量碳比例(a)、秸秆来源(b)和土壤来源(c)的微生物量碳及微生物秸秆碳利用效率(d)、代谢熵(e)

Fig. 5 Percentage of straw-derived microbial biomass carbon (MBC) (a), MBC derived from straw (b) and soil (c), microbial straw-carbon use efficiency (d) and metabolic quotient (e) under different treatments after straw amendments

方式的影响最小(表5和图5)。培养第3天时微生物秸秆碳利用效率显著高于第14天。在培养第3、14天时,恒湿处理的微生物秸秆碳利用效率均显著低于干旱胁迫处理。培养第3天时,恒湿条件下有

机肥处理的微生物秸秆碳利用效率显著低于化肥处理,而干旱胁迫条件下2种施肥方式间差异不显著;培养第14天时,无论哪种水分条件下2种施肥方式间均无显著差异。添加秸秆后,培养时间、施肥方式

和水分条件及其部分交互作用均显著影响微生物代谢熵,其中水分影响最大(表 5 和图 5)。在培养第 3、14 天时,恒湿处理微生物代谢熵显著高于干旱胁迫处理(第 14 天化肥处理时除外);在恒湿条件下,有机肥处理微生物代谢熵显著高于化肥处理,而在干旱胁迫条件下,2 种施肥方式间无显著差异。

3 讨 论

本研究中培养 28 d 后秸秆来源的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 累积排放量增幅已很小,基本趋于稳定,到培养结束(第 56 天)时 12%~36%(质量百分数,下同)的秸秆碳被矿化。Sauvadet 等^[28]研究发现到培养结束(第 29 天)时,约 23%~29%的秸秆碳被矿化。Wu 等^[17]研究发现秸秆来源的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 排放通量在最初培养的 30 d 内急剧下降,之后缓慢下降,到培养结束(第 70 天)时,约 34%~45%的秸秆碳被矿化。

土壤有机碳含量和微生物的生物量是控制土壤中秸秆降解或滞留的重要因素^[29]。Chen 等^[30]研究发现添加秸秆后,施用有机肥土壤(有机碳含量 9.3 g/kg)中的微生物量碳显著高于不施肥的土壤(有机碳含量 3.3 g/kg),秸秆碳矿化量虽略高于不施肥土壤,但差异不显著。本研究在恒湿条件(60% WHC)下,施有机肥土壤(有机碳含量 12.2 g/kg)秸秆来源的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 累积排放量(培养第 3—56 天)、微生物量碳(培养第 7、14 天)、微生物代谢熵均显著高于施用化肥处理的土壤(有机碳含量 7.4 g/kg),而微生物秸秆碳利用效率(培养第 3 天)却表现出相反趋势,表明恒湿条件下,施用化肥比有机肥更有利于秸秆碳的固定。一种可能原因是相比施用化肥,长期施用有机肥可显著提高土壤微生物活性尤其是真菌数量,促进秸秆降解,使土壤对秸秆碳的固持减少。已有研究表明真菌与细菌的比值(真细比)与微生物碳利用效率呈负相关^[31]。土壤真菌分泌的胞外解聚酶被认为是降解秸秆的主要酶,真菌中很大比例的碳被用于酶的生成^[32],这种资源流失可能是真细比高的土壤中微生物碳利用效率较低的一个原因。另一种可能原因是,相比化肥(化学氮肥),施用有机肥的土壤中还包含更多可溶性有机碳^[33],而土壤尤其是表层土壤有机碳的容量存在上限或饱和水平^[34-36],在稳定的碳输入下,当碳含量达到平衡时,就不能再固定碳^[37]。根据土壤碳饱和度假设,土壤有机碳的变化可能受到初始碳水平的影响,碳含量低的土壤比碳含量高的土壤有更大的有机碳封

存潜力^[36,38]。吕元春等^[39]研究也发现土壤初始有机碳含量越高,残留到土壤中的外源新碳就越少,即秸秆碳损失越高。

然而在干旱胁迫条件(30% WHC)下,有机肥和化肥 2 种施肥处理间秸秆(培养第 56 天除外)和土壤来源的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 累积排放量差异不显著,且它们在大多数取样时间点远低于恒湿处理。可能原因是相比施肥处理,水分对微生物活性影响更大^[40]。水分是微生物最基本的生存条件之一,土壤含水量直接影响土壤微生物的代谢活动^[41]。在一定水分范围内,秸秆和土壤原有有机碳的累积矿化量均与土壤含水量呈显著正相关^[22]。另外,有机碳作为土壤微生物呼吸底物,其在土壤中的溶解状况直接受水分调控,土壤中较高的含水量可促进可溶性有机碳的释放和溶解,刺激土壤微生物活性,提高土壤微生物的呼吸作用^[42]。本研究中相比恒湿处理,干旱胁迫处理显著降低微生物代谢熵(第 14 天化肥处理时除外),却显著提高微生物秸秆碳利用效率,表明恒湿条件下,微生物将更多的秸秆碳用于呼吸消耗^[43],而干旱胁迫下,微生物将更多的秸秆碳用于合成细胞结构物质^[43],更有利于秸秆碳的固定。而且在干旱胁迫条件下 2 种施肥方式间微生物秸秆碳利用效率和代谢熵差异不显著,表明干旱胁迫下施用化肥和有机肥对秸秆碳在土壤中的固存效应无显著差异,均有利于秸秆碳的固定。王旭东等^[12]对秸秆还田条件下中国农田土壤有机碳变化的 Meta 分析表明秸秆还田对土壤有机碳的增加效应随施氮量的增加总体呈先增加后减小的趋势,随年均降水量的增加总体呈波动变化的趋势,且在不同区域增加幅度有差异。未来需要进一步在田间原位条件下及区域尺度研究不同水肥管理对秸秆还田后土壤有机碳变化的影响。

4 结 论

相比恒湿条件,干旱胁迫可显著降低来源于秸秆和土壤本底(培养第 1、3 天除外)的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 累积排放量,却使微生物秸秆碳利用效率显著升高;培养前期(第 1—7 天)干旱胁迫降低了土壤总微生物量碳,但对后期(第 14—56 天)影响不显著。恒湿条件下,有机肥处理秸秆(培养第 1 天除外)和土壤本底(培养第 1、3 天除外)来源的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 累积排放量、微生物代谢熵显著高于化肥处理,在培养第 3 天微生物秸秆碳利用效率比化肥处理显著降低;而干旱胁迫

迫条件下,2种施肥方式间秸秆(培养第56天除外)和土壤本底的CO₂-C累积排放量、微生物代谢熵和秸秆碳利用效率差异均不显著。综上,秸秆还田后,恒湿条件下施用化肥比有机肥更有利于秸秆碳在土壤中固存;而在干旱胁迫条件下施用化肥和有机肥均有利于秸秆碳的固存。

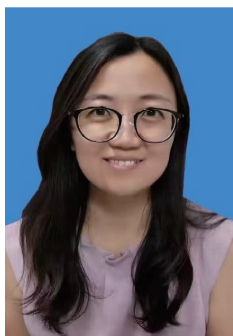
参考文献 References

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627
- [2] Kuzyakov Y, Gunina A, Zamanian K, Tian J, Luo Y, Xu X L, Yudina A, Aponte H, Alharbi H, Ovsepyan L, Kurganova I, Ge T D, Guillaume T. New approaches for evaluation of soil health, sensitivity and resistance to degradation[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2020, 7(3): 282-288
- [3] 徐明岗, 张旭博, 孙楠, 张文菊. 农田土壤固碳与增产协同效应研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1441-1449
Xu M G, Zhang X B, Sun N, Zhang W J. Advance in research of synergistic effects of soil carbon sequestration on crop yields improvement in croplands[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6): 1441-1449 (in Chinese)
- [4] Zhang J, Hu K L, Li K J, Zheng C L, Li B G. Simulating the effects of long-term discontinuous and continuous fertilization with straw return on crop yields and soil organic carbon dynamics using the DNDC model[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 302-314
- [5] Zhao Y C, Wang M Y, Hu S J, Zhang X D, Ouyang Z, Zhang G L, Huang B A, Zhao S W, Wu J S, Xie D T, Zhu B, Yu D S, Pan X Z, Xu S X, Shi X Z. Economics- and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4045-4050
- [6] Cherubin M R, da Silva Oliveira D M, Feigl B J, Pimentel L G, Lisboa I P, Gmach M R, Varanda L L, Morais M C, Santos Satiro L, Popin G V, de Paiva S R, dos Santos A K B, de Vasconcelos A L S, de Melo P L A d, Cerri C E P, Cerri C C. Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: A review[J]. *Scientia Agricola*, 2018, 75(3): 255-272
- [7] Dai Y J, Sun Q Y, Wang W S, Lu L, Liu M, Li J J, Yang S S, Sun Y E, Zhang K X, Xu J Y, Zheng W L, Hu Z Y, Yang Y H, Gao Y W, Chen Y J, Zhang X, Gao F, Zhang Y. Utilizations of agricultural waste as adsorbent for the removal of contaminants: A review [J]. *Chemosphere*, 2018, 211: 235-253
- [8] Qiu Q Y, Wu L F, Ouyang Z, Li B B, Xu Y Y, Wu S S, Gregorich E. Priming effect of maize residue and urea N on soil organic matter changes with time[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 100: 65-74
- [9] Schmatz R, Recous S, Aita C, Tahir M M, Schu A L, Chaves B, Giacomini S J. Crop residue quality and soil type influence the priming effect but not the fate of crop residue C[J]. *Plant and Soil*, 2017, 414(1-2): 229-245
- [10] Sinsabaugh R L, Manzoni S, Moorhead D L, Richter A. Carbon use efficiency of microbial communities: Stoichiometry, methodology and modelling[J]. *Ecology Letters*, 2013, 16: 930-939
- [11] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和粮食安全[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(4): 384-393
Pan G X, Zhao Q G. Study on evolution of organic carbon stock in agricultural soils of China: Facing the challenge of global change and food security[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20(4): 384-393 (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] Liu W X, Qiao C L, Yang S, Bai W M, Liu L L. Microbial carbon use efficiency and priming effect regulate soil carbon storage under nitrogen deposition by slowing soil organic matter decomposition[J]. *Geoderma*, 2018, 332: 37-44
 - [14] Kirkby C A, Richardson A E, Wade L J, Passioura J B, Batten G D, Blanchard C, Kirkegaard J A. Nutrient availability limits carbon sequestration in arable soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 68: 402-409
 - [15] Neff J C, Townsend A R, Gleixner G, Lehman S J, Turnbull J, Bowman W D. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon[J]. *Nature*, 2002, 419(6910): 915-917
 - [16] Meng F Q, Dungait J A J, Xu X L, Bol R, Zhang X, Wu W L. Coupled incorporation of maize (*Zea mays* L) straw with nitrogen fertilizer increased soil organic carbon in Fluvic Cambisol[J]. *Geoderma*, 2017, 304: 19-27
 - [17] Wu L, Zhang W J, Wei W J, He Z L, Kuzyakov Y, Bol R, Hu R G. Soil organic matter priming and carbon balance after straw addition is regulated by long-term fertilization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 135: 383-391
 - [18] Fontaine S, Henault C, Aamor A, Bdioui N, Bloor J M G, Maire V, Mary B, Revallot S, Maron P A. Fungi mediate long term sequestration of carbon and nitrogen in soil through their priming effect[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(1): 86-96
 - [19] Moorhead D L, Sinsabaugh R L. A theoretical model of litter decay and microbial interaction[J]. *Ecological Monographs*, 2006, 76(2): 151-174
 - [20] 胡侨宇. 气候变化和人类活动对中国不同分区干湿程度的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021
Hu Q Y. Effects of climate change and human activities on the degree of dryness and wetness in different districts of China [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021 (in Chinese)
 - [21] Cui Y Q, Zhang B, Huang H, Zeng J J, Wang X D, Jiao W H. Spatiotemporal characteristics of drought in the North China plain over the past 58 years [J/OL]. *Atmosphere*, (2021-06-29) [2022-12-29]. DOI: doi.org/10.3390/atmos12070844
 - [22] 唐国勇, 董成立, 苏以荣, 吴金水, 肖和艾. 含水量对¹⁴C标记秸秆和土壤原有有机碳矿化的影响[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(3): 538-543
Tang G Y, Tong C L, Su Y R, Wu J S, Xiao H A. Effects of soil moisture content on the mineralization of added ¹⁴C-labelled straw and native soil organic carbon in upland soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(3): 538-543 (in Chinese)
 - [23] 张晓宁. 冬小麦-夏玉米轮作体系有机肥对化肥的替代效应研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017
Zhang X N. Substitution effect of organic manure for chemical fertilizer in winter wheat-summer maize rotation system [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017 (in Chinese)
 - [24] Chen R R, Senbayram M, Blagodatsky S, Myachina O, Dittert K, Lin X G, Blagodatskaya E, Kuzyakov Y. Soil C and N availability determine the priming effect; Microbial N mining and stoichiometric decomposition theories[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(7): 2356-2367
 - [25] 林启美, 吴玉光, 刘焕龙. 熏蒸法测定土壤微生物量碳的改进[J]. *生态学杂志*, 1999, 18(2): 63-66
Lin Q M, Wu Y G, Liu H L. Modification of fumigation extraction method for measuring soil microbial biomass carbon[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(2): 63-66 (in Chinese)
 - [26] De Troyer I, Amery F, Van Moorlegheem C, Smolders E, Merckx R. Tracing the source and fate of dissolved organic matter in soil after incorporation of a ¹³C-labelled residue: A batch incubation study[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(3): 513-519

- [27] Bei S K, Li X, Kuyper T W, Chadwick D R, Zhang J L. Nitrogen availability mediates the priming effect of soil organic matter by preferentially altering the straw carbon-assimilating microbial community [J/OL]. *Science of the Total Environment*, [2022-12-12]. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152882
- [28] Sauvadet M, Lashermes G, Alavoine G, Recous S, Chauvat M, Maron P A, Bertrand I. High carbon use efficiency and low priming effect promote soil C stabilization under reduced tillage[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 123: 64-73
- [29] Majumder B, Kuzyakov Y. Effect of fertilization on decomposition of ¹⁴C labelled plant residues and their incorporation into soil aggregates[J]. *Soil & Tillage Research*, 2010, 109(2): 94-102
- [30] Chen L, Zhang J B, Zhao B Z, Xin X L, Zhou G X, Tan J F, Zhao J H. Carbon mineralization and microbial attributes in straw-amended soils as affected by moisture levels[J]. *Pedosphere*, 2014, 24(2): 167-177
- [31] Soares M, Rousk J. Microbial growth and carbon use efficiency in soil: Links to fungal-bacterial dominance, SOC-quality and stoichiometry[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 131: 195-205
- [32] de Boer W, Folman L B, Summerbell R C, Boddy L. Living in a fungal world; impact of fungi on soil bacterial niche development[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2005, 29(4): 795-811
- [33] Rochette P, Gregorich E G. Dynamics of soil microbial biomass C, soluble organic C and CO₂ evolution after three years of manure application[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1998, 78(2): 283-290
- [34] Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles[J]. *Plant and Soil*, 1997, 191(1): 77-87
- [35] 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: 155-176
- [36] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, Plante A F, Six J. Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 86(1): 19-31
- [37] West T O, Six J. Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity [J]. *Climatic Change*, 2007, 80(1-2): 25-41
- [38] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, Plante A F, Six J. Soil carbon saturation: Evaluation and corroboration by long-term incubations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(7): 1741-1750
- [39] 吕元春, 薛丽佳, 尹云锋, 高人, 马红亮, 杨玉盛. 外源新碳在不同类型土壤团聚体中的分配规律[J]. *土壤学报*, 2013, 50(3): 534-539
- Lü Y C, Xue L J, Yin Y F, Gao R, Ma H L, Yang Y S. Distribution of fresh carbon in aggregate fractions of different soil types [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(3): 534-539 (in Chinese)
- [40] 苏朋, 傅昱, 何艳, 徐建明, 吴建军, 吴良欢. 控制条件下水肥耦合对黄泥田还田秸秆腐解及土壤碳转化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(1): 1-11
- Su P, Fu Y, He Y, Xu J M, Wu J J, Wu L H. Effect of soil moisture and nitrogen fertilizer on the decomposition of straw returned to field and the transformation of carbon under controlled conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(1): 1-11 (in Chinese)
- [41] 朱义族, 李雅颖, 韩继刚, 姚槐应. 水分条件变化对土壤微生物的影响及其响应机制研究进展[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4323-4332
- Zhu Y Z, Li Y Y, Han J G, Yao H Y. Effects of changes in water status on soil microbes and their response mechanism: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(12): 4323-4332 (in Chinese)
- [42] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. *土壤学报*, 2004, 41(4): 544-552
- Li Z P, Zhang T L, Chen B Y. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 544-552 (in Chinese)
- [43] 李佳玉, 吕茂奎, 李晓杰, 姜永孟, 谢锦升. 水分对武夷山草甸土壤有机碳激发效应的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(4): 1250-1258
- Li J Y, Lv M K, Li X J, Jiang Y M, Xie J S. Effects of soil moisture on priming effect of soil organic carbon in meadow in Wuyi Mountain, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(4): 1250-1258 (in Chinese)

责任编辑：吕晓梅



第一作者简介：李侠，博士，山西大同大学农学与生命科学学院副教授，主要从事土壤微生物环境调控研究。曾参与 2 项国家自然科学基金项目，主持 1 项山西省应用基础研究计划项目，在《中国农业大学学报》、《植物营养与肥料学报》、*Microbiome*、*Environmental Microbiology*、*Applied Soil Ecology* 等国内、外期刊上发表学术论文 30 余篇。



通讯作者简介：胡一民，中国农业大学国家农业科技战略研究院职员，中国农业大学农学院在读博士研究生，主要从事宏观农业与农业生态研究。作为主要完成人参与国家和部级重点、重大项目 5 项，参编农业领域科技建设咨询相关著作 4 部。