

添加不同类型秸秆对土壤CO₂排放和化学性质的影响

李欢, 赵平, 陈林康, 李连华, 向蕊, 龙光强

引用本文:

李欢, 赵平, 陈林康, 李连华, 向蕊, 龙光强. 添加不同类型秸秆对土壤CO₂排放和化学性质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4): 909–918.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

蚯蚓作用下不同C/N秸秆还田对土壤CO₂及N₂O排放的影响

王争妍, 雷紫烟, 叶志雄, 伍玉鹏

农业环境科学学报. 2017, 36(9): 1908–1915 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0187>

添加生物炭对海南燥红壤N₂O和CO₂排放的影响

刘丽君, 朱启林, 李凯凯, 李淼, 孟磊, 伍延正, 汤水荣, 何秋香

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2049–2056 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0187>

双氰胺减少铵态氮肥施用后潮土N₂O排放的机制

马兰, 李晓波, 马舒坦

农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2801–2808 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0459>

生物基包膜抑制型尿素对土壤温室气体排放及小青菜产量的影响

刘楚桐, 陈松岭, 邹洪涛, 叶旭红, 陈春羽, 雷洋, 张玉龙

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 677–684 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0658>

稻麦轮作下秸秆不同利用方式还田对稻田甲烷排放的影响

张熙栋, 严玲, 周伟, 吴秋玲, 杨波, 马煜春

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 685–692 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李欢, 赵平, 陈林康, 等. 添加不同类型秸秆对土壤 CO₂ 排放和化学性质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4): 909–918.

LI H, ZHAO P, CHEN L K, et al. Effects of addition of different types of straw on soil CO₂ emission and soil chemical properties[J].

Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(4): 909–918.



开放科学 OSID

添加不同类型秸秆对土壤 CO₂ 排放和化学性质的影响

李欢¹, 赵平^{1,2}, 陈林康¹, 李连华¹, 向蕊¹, 龙光强^{1,2*}

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 农业农村部云南耕地保育科学观测实验站, 昆明 650201)

摘要: 秸秆组成和土壤性质是秸秆腐解的重要影响因素, 进而调控着秸秆还田后的土壤 CO₂ 排放和土壤养分动态。本研究选取了玉米秸秆(MS)、马铃薯秸秆(PS)及其等比例混合秸秆(CS)3种秸秆类型, 分别添加到3种植植模式[玉米单作(MM)、马铃薯单作(MP)和玉米马铃薯间作(I)]土壤中, 进行 105 d 的室内恒温培养试验, 以探究秸秆类型在不同环境中的 CO₂ 排放及土壤化学性质变化。结果表明: 土壤种植模式显著影响 MS 的 CO₂ 累积排放量, 而对 CS、PS 没有显著影响。与玉米和马铃薯单一秸秆的加权平均(WM)相比, 秸秆混合分别增加了 MM 土壤中 CO₂ 累积排放量和净累积排放量 19.2% 和 19.9%。与培养前相比, MS 在培养结束时增加了土壤 pH 和可溶性有机碳含量, 但对速效磷和速效钾的影响较小, 且显著低于 PS 和 CS。当同一秸秆添加到不同作物种植模式土壤中, MP 土壤的速效磷、速效钾和铵态氮含量的增幅(相对于培养前)均高于 I 和 MM。研究表明, 秸秆在土壤中的腐解与碳排放首先受碳氮比调控, 而土壤种植模式的作用较小, 同时这些因素均对腐解过程土壤化学性质产生显著影响。

关键词: 秸秆还田; CO₂ 排放速率; CO₂ 累积排放量; 土壤养分

中图分类号: S154.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2022)04-0909-10 **doi:** 10.11654/jaes.2021-1007

Effects of addition of different types of straw on soil CO₂ emission and soil chemical properties

LI Huan¹, ZHAO Ping^{1,2}, CHEN Linkang¹, LI Lianhua¹, XIANG Rui¹, LONG Guangqiang^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2 Yunnan Scientific Observation Station for Cultivated Land Conservation of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Kunming 650201, China)

Abstract: Straw composition and soil properties are the important factors effecting straw decomposition, and they thus affect the soil CO₂ emission and nutrient dynamics. In this study, three types of straw [maize (MS), potato (PS), and maize-potato mixed straw (CS)] were selected and added into three cropping pattern soils [maize monoculture (MM), potato monoculture (MP), and maize-potato intercropping (I)], respectively. A 105-day, indoor, constant temperature culture experiment was conducted to explore the CO₂ emission and soil chemical properties changes of the straw types in the different sub-environments. The results showed that the soil cropping pattern significantly affected the cumulative CO₂ emission after incorporating MS straw but that it had no significant effect on PS or CS straw. Compared with the weighted average (WM) of MS and PS single straw, CS increased the cumulative CO₂ emission and the net cumulative CO₂ emission in MM soil by 19.2% and 19.9%, respectively. Compared with the before-culture condition, MS increased the soil pH and dissolved organic carbon content by the end of the culture, but it had little effect on available P and available K and had a significantly lower effect than PS or CS. When the same straw was added to the soils with the different cropping patterns, the increases of available P, available K, and ammonium N were higher in MP soil (relative to before culture) than in I or MM soil. In conclusion, straw decomposition

收稿日期: 2021-09-02 录用日期: 2021-11-29

作者简介: 李欢(1996—), 男, 云南宣威人, 硕士研究生, 从事旱地土壤碳平衡研究。E-mail: 278312466@qq.com

*通信作者: 龙光强 E-mail: ynaulong2316@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41967004); 云南省重点研发计划项目(2018BB015)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41967004); The Key Research and Development Program of Yunnan Province (2018BB015)

and carbon emission in soil are firstly affected by straw autacoids, and the influence of the soil cropping pattern is lower. These factors have an important influence on soil chemical properties during the decomposition process.

Keywords: straw return; CO₂ emission rate; cumulative CO₂ emission; soil nutrient

我国秸秆资源丰富,据统计2017年主要农作物秸秆约9亿t,可收集利用资源达7.36亿t^[1-2]。在秸秆综合利用的方法中,秸秆还田是一种相对较优的方式。秸秆还田可改善土壤团粒结构和养分状况,降低土壤容重和促进土壤酶活性,丰富土壤微生物多样性^[3-4],进而提高作物产量和增加土壤有机碳固存,实现作物可持续生产^[5-7]。

种植模式和秸秆组成均会影响秸秆腐解和土壤有机碳的转化,改变土壤碳储量,同时调控土壤化学性质和养分状况^[8-9]。一方面,秸秆腐解过程中CO₂排放和土壤化学性质受作物秸秆化学性质、还田部位、还田方式以及还田深度等的影响^[10-12]。当不同化学性质的有机物混合,它们的分解速率通常不等于每个单一物种的算数平均值(即预期的分解速率),而是会导致正向或负向非加性效应,这在森林和草地生态系统中研究较多^[13-14]。相应地,分解过程中的CO₂排放和土壤性质响应亦不同于单一组成的有机物^[15]。在农田生态系统中,间作或混作模式下通常有两种或多种作物秸秆同时进入土壤,这如何进一步影响秸秆分解和土壤性质,以及土壤碳固存和土壤肥力,值得关注。

另一方面,种植模式对秸秆腐解后的CO₂排放和土壤化学性质也存在影响。不同种植模式常导致土壤pH、速效养分和微生物群落组成等产生差异,进而调控秸秆腐解及养分释放与周转^[16]。研究表明,由于微生物的特异性演化,木本和草本植物凋落物在原地分解更快,具有“主场优势”,这在各种自然生态系统中得到了广泛验证^[17]。但是由于有机底物-土壤环境-微生物的复杂相互作用,这一机制产生的原因仍难以归纳和界定,尤其是在有机物组成和分解环境高度多样化的农田生态系统中。在农田土壤中,“主场

优势”并不一定代表真正的“优势”,秸秆过度分解不利于有机质的保存,同时秸秆在原地腐解可能带来病虫害频发和连作障碍等问题。因此,关注秸秆在异位条件下(非主场)腐解对碳排放和土壤性质的影响,对探索秸秆异位还田具有重要指导意义。

因此,本文采集3种植植模式(玉米单作、马铃薯单作和玉米马铃薯间作)的多年田间定位试验土壤,分别加入玉米秸秆、马铃薯秸秆及其混合秸秆,进行室内培养试验,探究不同秸秆组成和不同种植模式对秸秆腐解过程中CO₂排放及土壤化学性质的影响,加深对秸秆腐解过程中土壤碳排放和养分变化规律的理解,为秸秆还田增强土壤碳汇功能和合理养分供应提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

本培养试验于2019年10—11月在云南农业大学现代农业教育科研基地实验室(23°32'N、103°13'E)进行。供试土壤来自于在云南农业大学现代农业教育科研基地从2014年开始的田间定位试验小区,土壤为山原红壤。于田间小区试验第6a(2019年)作物收获后采集表层(0~20 cm)土壤开展培养试验,试验前基本理化性质如表1所示。

玉米、马铃薯秸秆采自2018年作物收获后,经70℃烘干后,粉碎过1 mm筛备用。试验前玉米秸秆和马铃薯秸秆的化学性质如表2所示。

1.2 试验设计

本研究采用两因素(包含土壤种植模式和秸秆类型)交互的室内培养试验。其中土壤种植模式为连续6a的玉米单作种植土壤(MM)、马铃薯单作种植土壤

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 The basic chemical properties of soils

种植模式 Cropping pattern	pH	有机质 OM/ (g·kg ⁻¹)	N乙酰-β-D-葡 萄糖苷酶NAG/ (μg·d ⁻¹ ·g ⁻¹)	多酚氧化酶 PPO/ (mg·h ⁻¹ ·g ⁻¹)	蔗糖酶 SC/ (mg·h ⁻¹ ·g ⁻¹)	木质素过氧化 物酶LiP/ (nmol·d ⁻¹ ·g ⁻¹)	速效磷 Available P/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg·kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ -N/ (mg·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ -N/ (mg·kg ⁻¹)
玉米马铃薯间作 Maize-potato intercropping	7.57	20.77	86.72	16.20	66.68	13 927.55	13.86	142.52	29.32	3.44
玉米单作 Maize monoculture	7.52	19.59	66.51	10.33	61.14	11 832.15	7.70	109.01	37.49	5.78
马铃薯单作 Potato monoculture	7.49	19.68	81.15	13.75	67.43	12 928.23	11.40	172.98	37.25	4.10

表2 试验用玉米和马铃薯秸秆基本化学性质

Table 2 Basic chemical properties of maize and potato straws used in this study

秸秆 Straw	总碳 Total C/ (g·kg ⁻¹)	总氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	总磷 Total P/ (g·kg ⁻¹)	总钾 Total K (g·kg ⁻¹)	碳氮比 C/N
玉米 Maize	405.11	7.96	2.02	5.69	50.92
马铃薯 Potato	360.01	9.66	2.41	17.70	37.27

(MP)和玉米与马铃薯间作种植土壤(I);3种秸秆类型为玉米秸秆(MS)、马铃薯秸秆(PS)和玉米马铃薯混合秸秆(CS,质量混合比例为1:1),同时以不添加秸秆(CK)作为对照。共12个处理,每个处理3次重复。在25℃恒温箱中在未添加秸秆和黑暗条件下进行好氧预培养7 d,待恢复土壤微生物活性后,按碳排放和养分动态监测两个研究目的分别进行如下试验。

1.2.1 CO₂排放培养试验

称取干质量50 g的鲜土放入250 mL三角瓶中,在其中添加1 g秸秆样品^[18](混合秸秆样品包括玉米秸秆和马铃薯秸秆各0.5 g),同时设置不添加秸秆作为对照。各处理均采用完全随机设计,3次重复,放在25℃恒温培养箱中不添加秸秆和黑暗条件下进行培养。培养过程中用透气薄膜封口,以减少水分散失。用称质量法来控制土壤水分,使土壤含水率始终维持在20%,抽气时用胶塞封口,取气时间间隔为0、1、2 h。在培养开始后的第1、3、5、7、10、14、18、22、28、42、56、77、105 d分别采集气体样品,测定土壤CO₂浓度。

1.2.2 土壤化学性质培养试验

称取干质量50 g的鲜土,放入塑料封口袋中,塑料袋上留通气小孔(保证通气正常和控制水分散失),在其中添加1 g秸秆,同时设置未添加秸秆的对照试验。培养试验过程中采用称质量法使土壤含水量维持在20%,在培养后的第0、4、7、15、30、60、105 d分别进行破坏性取样,测定土壤pH值、可溶性有机碳(DOC)、速效磷、速效钾、硝态氮和铵态氮含量。

1.3 指标测定

气体样品采用气相色谱仪(GC; 7890B GC System, Agilent Technologies, US)测定CO₂浓度。土壤pH值用电位计法(土:水=1:2.5)测定;DOC经去离子水浸提后用TOC仪进行测定。速效磷(AP)采用NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定,速效钾(AK)用NH₄OAc浸提-火焰光度法测定。硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)均以1 mol·L⁻¹ KCl溶液浸提,用流

动分析仪进行测定。

1.4 数据处理与分析

土壤CO₂排放通量计算公式为:

$$F = \rho \times Dc/Dt \times 273/(273 + T) \times V/A$$

式中: F 为CO₂排放通量,mg·kg⁻¹·h⁻¹;正值为排放,负值为吸收; ρ 为标准状态下被测气体浓度; Dc/Dt 为单位时间内取样瓶内被测气体浓度的变化量; T 为采样时瓶内温度,℃; V 为取样瓶体积,m³;A为培养干土质量,kg。

CO₂累积排放量计算公式为:

$$M = \sum (F_{N+1} + F_N)/2 \times (t_{N+1} - t_N) \times 24/10^4$$

式中: M 为培养过程中气体排放量,g·kg⁻¹;F为气体排放速率,mg·kg⁻¹·h⁻¹;N为采样次数;t为采样时间,d。

CO₂净累积排放量(NM)计算公式为:

$$NM = M_s - M_o$$

式中: M_s 为添加秸秆后土壤的累积排放量,g·kg⁻¹;M_o为供试土壤不添加秸秆对照处理的累积排放量,g·kg⁻¹。

两种单一秸秆CO₂累积排放量的加权平均值(WM)计算公式为:

$$WM = WM_m \times F_m + WM_p \times F_p$$

式中,WM_m和WM_p分别为单作玉米和单作马铃薯的CO₂累积排放量,g·kg⁻¹;F_m和F_p分别为混合秸秆中玉米秸秆和马铃薯秸秆的比例,本研究中F_m和F_p均为0.5。

使用Excel 2010 软件进行数据的整理,Origin 2018软件作图,用SPSS 20.0软件的LSD和Duncan进行差异显著性分析(P<0.05)。采用Amos 23.0软件包构建SEM方程模型,用χ²值、自由度、假定值、拟合优度指数(GFI)和近似的均方根误差(RMSEA)来评估拟合度。SEM建模时,对测定的土壤化学性质动态指标进行了平均,以代替分解过程中不同处理间的土壤性质差异。Canoco 5.0 进行主成分分析,并用R 4.0.2 进行置换多元方差分析(PERMANOVA)。

2 结果与分析

2.1 CO₂排放速率和累积排放量

整个培养期间,不同作物种植模式土壤中秸秆CO₂排放速率均呈现出前期(0~28 d)较快、中期(28~56 d)减缓、后期(56~105 d)稳定的趋势(图1)。在3种作物种植模式的土壤中,与不添加秸秆(CK)相比,除第105 d,其余时间秸秆添加(CS、MS和PS)均显著增加了CO₂排放速率。

在同一种植模式土壤中添加不同秸秆,腐解前期

PS的CO₂排放速率较快,其中,在玉米与马铃薯间作(I)种植的土壤中,第1、5、10 d PS的CO₂排放速率显著高于CS和MS,在玉米单作种植(MM)和马铃薯单作种植(MP)土壤中,在第1、5、7 d PS的CO₂排放速率显著高于CS和MS;腐解的中后期CS、MS和PS的CO₂排放速率差距较小。

不添加秸秆时,不同作物种植模式的土壤之间CO₂排放速率无显著差异。同一秸秆在不同种植模式下,CS的土壤中CO₂排放速率在第1、3、28 d的MP土壤中显著高于I土壤中;MS在第1、18、22 d的MM土壤中显著低于I和MP土壤中;对于PS而言,第3、5、10 d的I土壤中显著低于MM和MP土壤中。

秸秆类型和种植模式均对土壤CO₂累积排放量和去除对照的CO₂净累积排放量有显著影响(图2)。就秸秆而言,CS和PS在不同种植模式土壤中CO₂累积排放量和净累积排放量均没有显著差异,而MS则在MM土壤中显著低于I和MP土壤中,即玉米秸秆原位添加抑制了土壤CO₂排放。相比于CK,秸秆添加的处理CS、MS和PS均有效增加了CO₂累积排放量和CO₂净累积排放量。

就种植模式而言,在MP土壤中添加不同秸秆后,CO₂累积排放量和净累积排放量无显著差异,而在I土壤中,添加PS后,CO₂累积排放量显著低于添加MS(图2a),在MM土壤中,添加CS后的CO₂累积排放量和CO₂净累积排放量显著高于添加MS的。此外,与玉米和马铃薯单一秸秆的加权平均(WM)相比,秸秆混合后分别显著增加了MM土壤中CO₂累积排放量19.2%、CO₂净累积排放量19.9%,同时降低了MP土壤中CO₂累积排放量的8.6%和CO₂净累积排放量的9.6%。

2.2 土壤化学性质变化

2.2.1 土壤pH和DOC含量

无秸秆添加的土壤(CK)在培养过程中pH波动较小(图3)。添加秸秆后,土壤pH在培养期呈现先快速下降而后缓慢上升的趋势。在I和MP土壤中,CS在培养结束时的pH较CK升高,在MM土壤中pH降低;在I、MM和MP土壤中,MS在培养结束时的pH均升高;在整个培养过程中,3种作物种植模式下,添加PS土壤中的pH均为降低,培养结束时I和MM土壤中下降幅度较大。此外,整个腐解过程中,添加MS的不同土壤的pH均高于添加CS和PS。

相比于CK,添加秸秆处理(CS、MS和PS)在培养的前60 d均能增加土壤DOC含量(图3)。CS和PS在60~105 d的DOC含量均呈现下降趋势,在105 d时除I土壤中的CS高于CK,其余处理的DOC含量均低于CK。添加MS处理下DOC含量持续增加,在I土壤中后期的增加效果最为显著,在MM和MP土壤中后期表现为下降趋势。培养结束时,添加MS的3种作物种植模式土壤中DOC含量与CK相比均有提高。同时,添加PS在培养的第4 d时对DOC含量的增加效果最为显著。

2.2.2 土壤速效养分

在整个培养过程中,土壤速效磷(AP)在3种种植模式土壤中的变化趋势基本一致(图4)。在3种作物种植模式土壤中,添加秸秆均能增加AP的含量,除I土壤添加CS效果最佳外,MM和MP土壤均表现为添加PS效果最好。不添加秸秆时,MP土壤中AP含量下降幅度最大。添加CS后,I土壤中AP含量较高,而添加MS和PS后,均为在MP土壤中AP含量最高。

在3种作物种植模式土壤中,添加秸秆后均能显

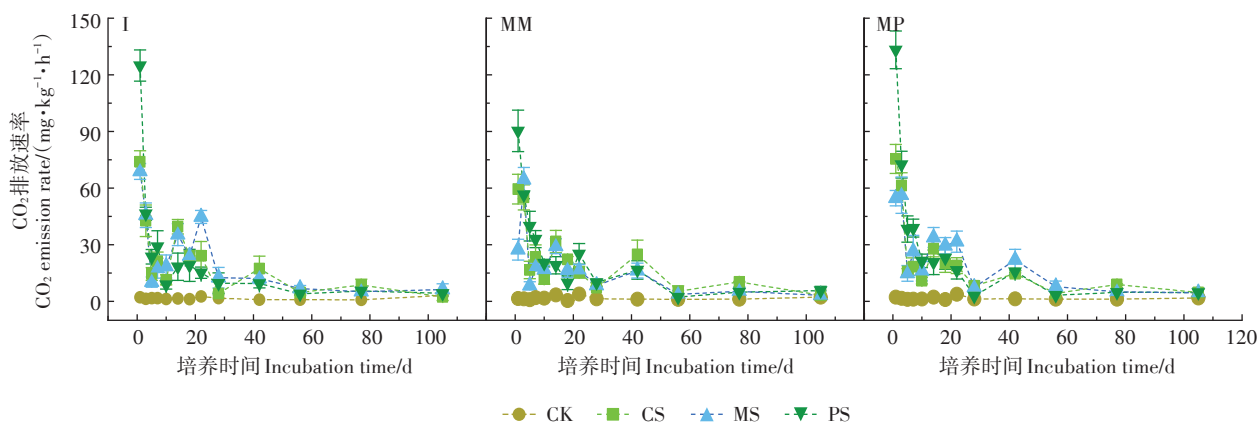
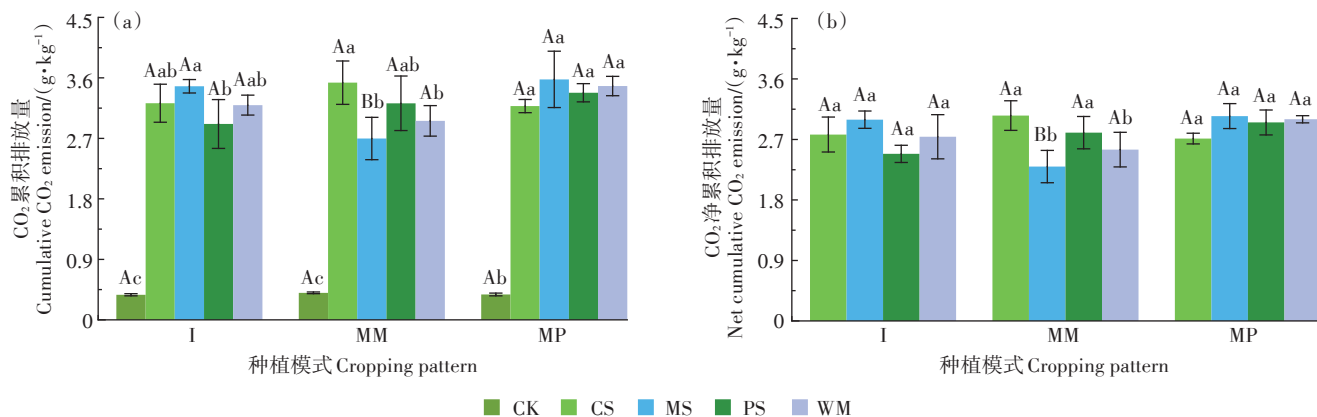


图1 整个培养期CO₂排放速率

Figure 1 CO₂ emission rate throughout the incubation period



不同大写字母表示同一秸秆在不同种植模式土壤中的差异,不同小写字母表示在同一种种植模式土壤中不同秸秆的差异($P<0.05$)
Different capital letters indicate the difference of the same straw in soils with different cropping patterns, while different lowercase letters indicate the difference of different straws in soils with the same cropping pattern($P<0.05$)

图2 CO₂累积排放量和CO₂净累积排放量

Figure 2 Cumulative CO₂ emissions and net cumulative CO₂ emissions

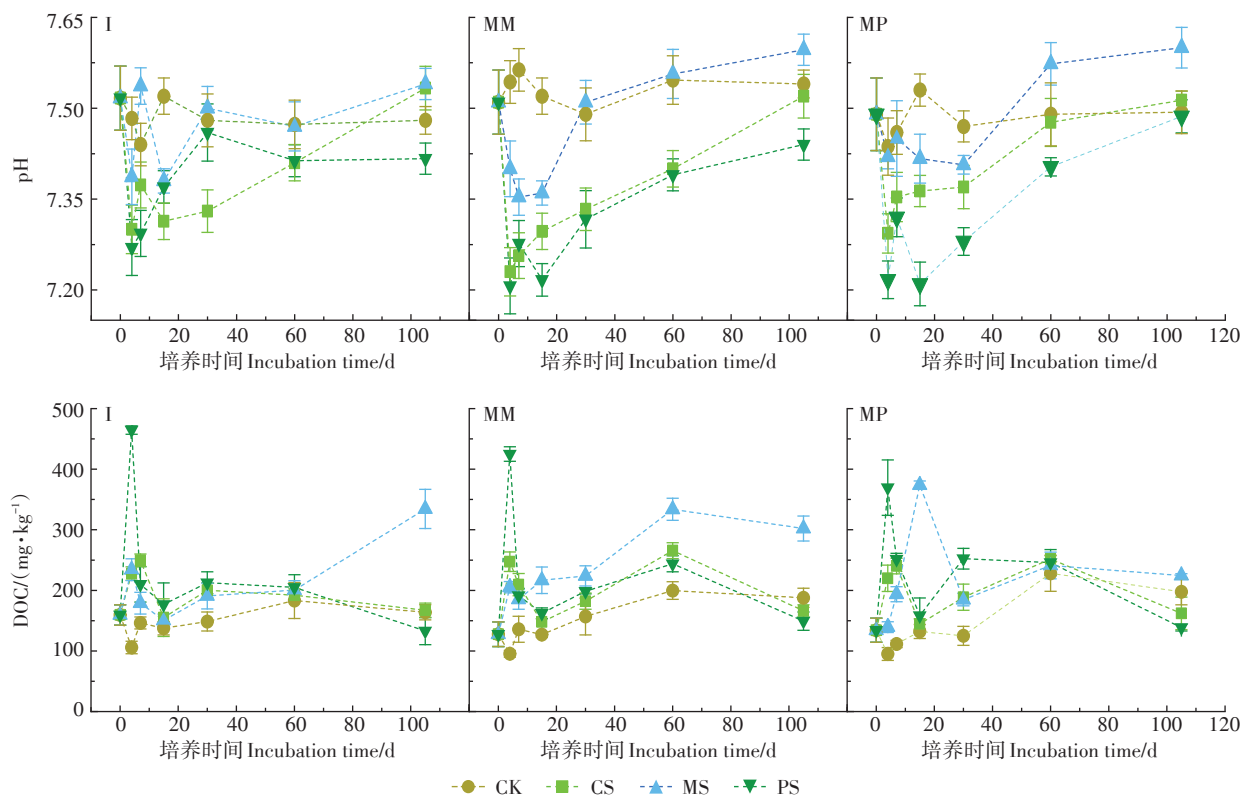


图3 3种作物种植模式的土壤pH和可溶性有机碳(DOC)含量的动态变化

Figure 3 Dynamic changes of pH and DOC in soil under different decomposition environments

著增加土壤速效钾(AK)含量(图4)。添加不同秸秆后,3种植模式土壤中均为MP土壤增加AK含量的效果最佳,培养结束时,3种土壤中AK含量均为PS>CS>MS>CK。不添加秸秆时,不同作物种植模式土壤中AK含量表现为I和MM土壤中变化较小,MP土壤中变化较大。

添加秸秆后,3种土壤中的硝态氮(NO₃-N)含量均显著降低(图5)。就CK而言,NO₃-N含量前期迅速上升,中后期不断下降;此外,I土壤培养结束后NO₃-N含量显著增加。在I和MP土壤中,添加秸秆后NO₃-N含量在前期急剧下降,中期先升后降,后期变化较小。在MM土壤中,添加3种秸秆后前期NO₃-N含量快速

下降,中期缓慢降低,后期几乎无波动。添加3种秸秆后对土壤中 NO_3^- -N含量的降低效果依次为 $\text{MS}>\text{CS}>\text{PS}$ 。

无论添加秸秆与否,培养结束时土壤铵态氮(NH_4^+ -N)含量均有不同程度的下降(图5)。CK在3种作物种植模式土壤中,前期含量逐渐下降,中后期基本不变。与CK相比,添加CS和MS在前期时增加 NH_4^+ -N含量,中后期与CK保持一致;添加PS在前期对土壤 NH_4^+ -N含量的促进作用最为显著,中期略有上升,后期逐渐下降。

2.3 CO_2 累积排放量与土壤化学性质的关系

主成分分析(PCA)表明,前两轴的环境变量累计解释了 CO_2 累积排放量变化的88.15%,同一秸秆在不同种植模式土壤中的样本点离散较小,而不同秸秆在同一种种植模式土壤中的样本点离散较大,DOC和C/N是影响 CO_2 累积排放量的主要因素(图6)。同时对 CO_2 累积排放量进行置换多元方差分析(PERMANOVA)得出,秸秆类型和种植模式均对 CO_2 累积排放量存在显著差异($P<0.001$),且秸秆类型对 CO_2 排放的影响大于种植模式。

结构方程模型(SEM)结果表明,模型解释了 CO_2

累积排放量93%的变异,在不同秸秆类型和作物种植模式土壤中C/N、DOC和土壤硝态氮(NO_3^- -N)和对 CO_2 累积排放量的路径系数分别为0.56、0.26和-0.46,直接影响着 CO_2 累积排放量(图7)。此外,土壤速效磷(AP)、土壤速效钾(AK)、pH、N乙酰- β -D-葡萄糖苷酶(NAG)和木质素过氧化物酶(LiP)通过影响DOC来间接影响 CO_2 累积排放量,LiP也可通过影响 NO_3^- -N含量来间接影响 CO_2 累积排放量。

3 讨论

3.1 秸秆类型和种植模式对秸秆腐解土壤 CO_2 排放的影响

本研究中,前期添加马铃薯秸秆(PS)的 CO_2 排放最高,后期添加3种秸秆 CO_2 排放无显著差异。前人研究得出,高质量秸秆(低C/N)和低质量秸秆(高C/N)会发生互补效应,氮素会从高质量残体迁移到低质量残体,以促进低质量组分的降解(互补效应),同时秸秆化学组成(例如C/N)是影响腐解速率的关键因素^[19-20]。这种差异导致土壤中有机的激发强度不同,使得土壤呼吸强度发生变化,进而影响 CO_2 排放速率^[21-22]。此外,混合秸秆与玉米和马铃薯单一秸

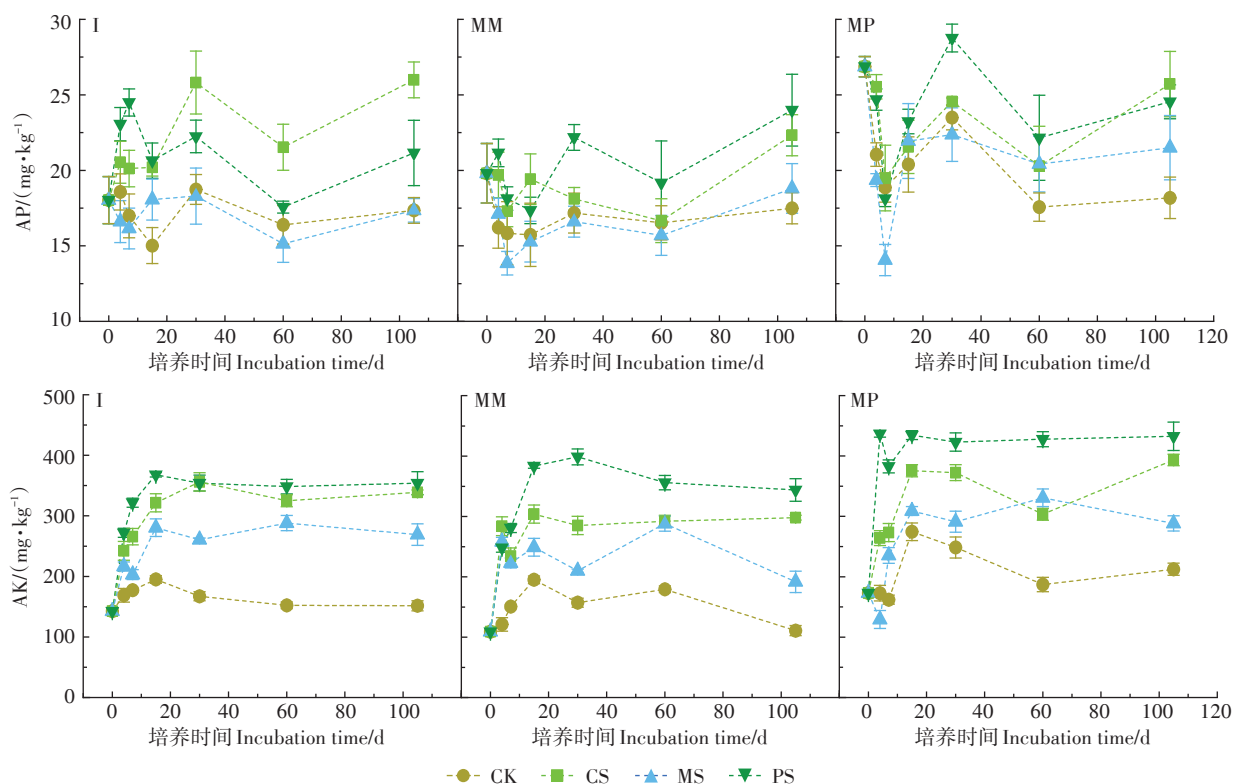
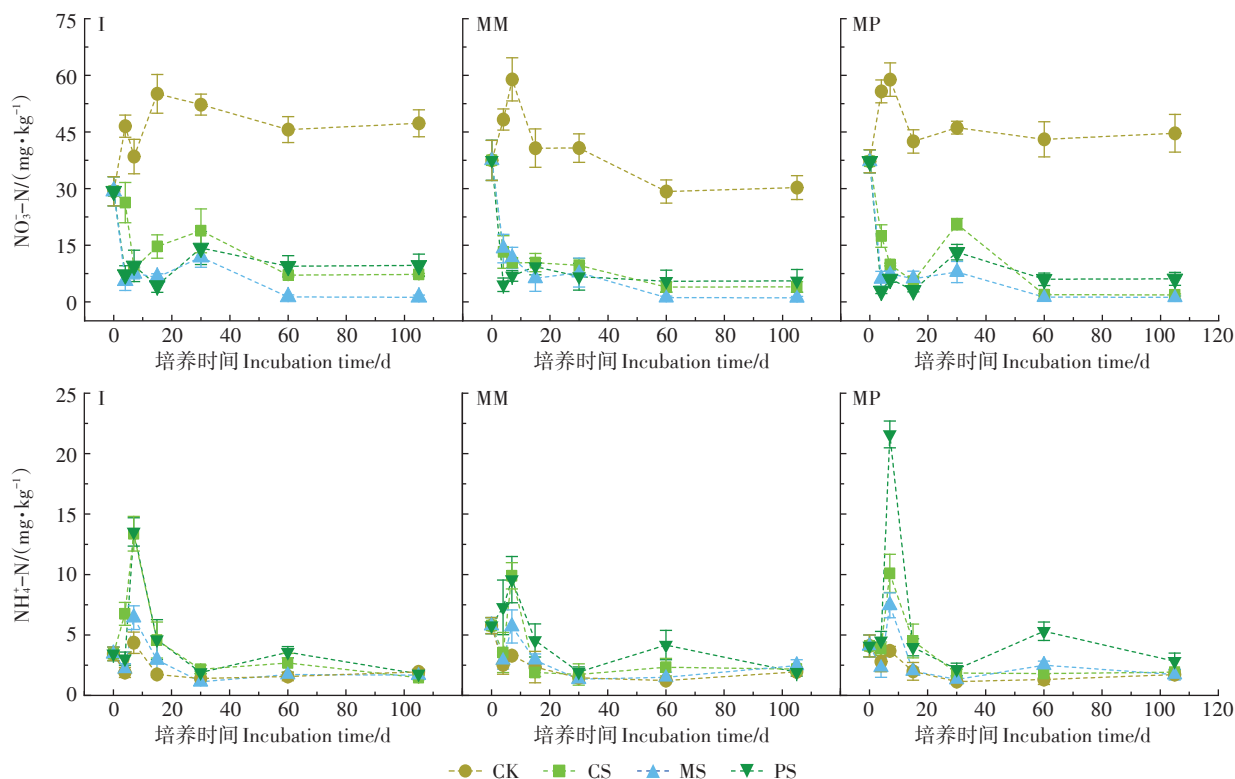


图4 培养过程中土壤速效磷(AP)和速效钾(AK)的含量变化

Figure 4 Changes of soil available phosphorus (AP) and available potassium (AK) during incubation

图5 土壤硝态氮(NO₃-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)含量变化Figure 5 Changes of soil nitrate nitrogen (NO₃-N) and ammonium nitrogen (NH₄⁺-N) content

秆的加权平均相比,增加了I和MM土壤中的CO₂累积排放量,降低了MP土壤中的CO₂累积排放量。因此,在对I和MM土壤中,需要控制因添加混合秸秆后而导致的CO₂的排放,比如调整混合比例或者降低添加的量。添加混合秸秆后在I和MM土壤中表现为促进分解(协同作用),在MP土壤中为抑制分解(拮抗作用)。然而秸秆混合后对碳排放的影响为累加性还是非累加性需要进一步研究。

未添加秸秆时,3种植植模式土壤在整个培养过程中CO₂排放无显著差异(图2),表明不同种植模式土壤对CO₂排放的影响相对较小,这与前人的研究结果相反。之前的研究结论主要源于自然生态系统,而本研究涉及农田生态系统,大量的氮素输入可能减缓了养分互补的作用,进而弱化了土壤种植模式的影响^[23]。添加秸秆显著增加了CO₂排放,在MP土壤中添加CS和PS,CO₂排放最高,而在I土壤中添加MS,CO₂排放最高。有研究发现,玉米-小麦轮作土壤中,还田玉米秸秆的腐解速率高于玉米长期连作土壤,可能是由于玉米长期连作使得土壤微生物、功能微生物生理类群数量及土壤酶活性等降低所致^[24]。此外,同一秸秆在不同作物种植模式土壤中表现为MS在原位(MM)土壤环境中的CO₂累积排放量最低,CS和PS的

CO₂累积排放量则分别在MM和MP土壤中最,暗示不同种植模式对秸秆腐解的影响还与秸秆组成相关。这与土壤的遗留效应有关,特别是土壤的养分状况、酶活性、微生物群落组成等,其中最为重要的是原生微生物群落,它决定了“主场优势”的强度^[25]。结合主成分分析(图6)和结构方程模型(图7)得出,秸秆类型和种植模式显著影响CO₂排放,其中秸秆类型对CO₂排放的影响更大。影响CO₂排放的主要因素是秸秆C/N、土壤DOC和土壤硝态氮(NO₃-N)含量,其他土壤养分和土壤酶活性也会间接影响CO₂排放。

3.2 秸秆类型和种植模式对秸秆腐解过程中土壤速效养分动态的影响

本研究发现,秸秆添加后土壤AP、AK、DOC和NH₄⁺-N的含量提高,土壤pH和NO₃-N含量降低,表明添加秸秆改善了土壤微环境,进而保证了养分的持续供应^[26-28]。一方面,秸秆经矿化作用释放养分到土壤中,进而增加了土壤速效磷钾含量^[29]。另一方面,秸秆能够为微生物生命活动提供充足碳源,增强微生物活性,加速氮同化,一定程度上降低了土壤NO₃-N,减少了淋失风险并增加了氮素供应^[30]。秸秆腐解105 d后,土壤速效养分因秸秆类型的不同存在差异。添加MS土壤的pH始终高于添加CS和PS的,且培

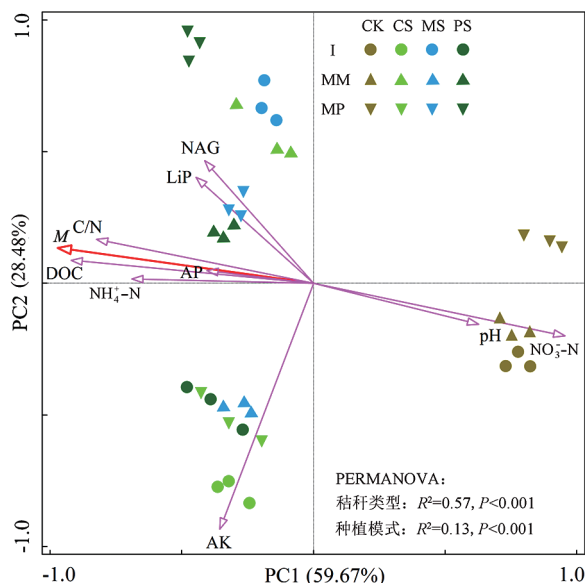


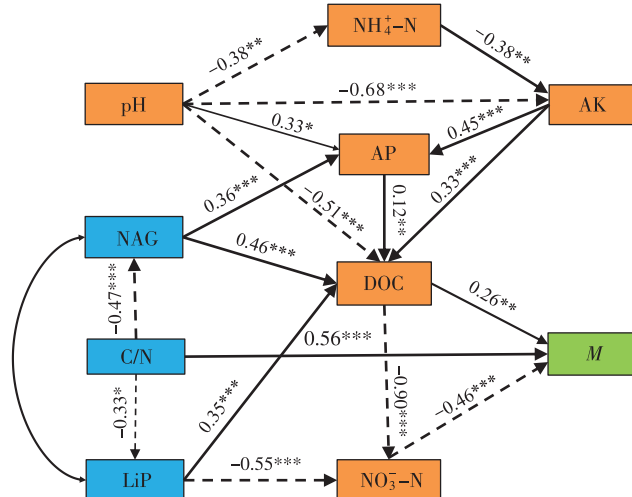
图6 CO₂累积排放量的主成分分析

Figure 6 Principal component analysis of cumulative CO₂ emission

养结束时MS相比于CS和PS可显著增加DOC含量;不同秸秆提高土壤AK的效果表现为PS>CS>MS,而对土壤NO₃-N和NH₄⁺-N含量的影响3种秸秆间差别较小。这些研究结果表明,秸秆类型对土壤化学性质的影响要大于秸秆混合带来的差异,因此农田秸秆混合还田如何调控土壤肥力,仍需针对不同类型秸秆的混合组合开展更广泛的研究。

李昌明等^[31]的研究表明,由于不同土壤类型间通气性、机械组成、养分状况等存在差异,显著影响秸秆分解过程的养分释放。本研究中,不同种植模式土壤添加同一秸秆后,土壤pH、DOC和NO₃-N的变化较小,而土壤AP、AK和土壤NH₄⁺-N含量在马铃薯单作(MP)土壤中增幅最大,同时原位土壤(MP)中添加PS对增加土壤AP、AK和NH₄⁺-N的含量体现出优势,这与土壤中参与有机物分解和碳氮转化相关酶的活性有关^[32-35]。PS的原位土壤(MP)环境中的酶活性高于异位土壤(I和MM)环境,加速了有机底物的降解,进而增加土壤中AP、AK和NH₄⁺-N含量。培养试验结果表明,与原位相比,秸秆异位还田对土壤养分释放和供应没有显著优势。

本研究通过添加秸秆到不同种植模式的土壤中,分析CO₂排放差异以初步分析秸秆腐解的变化,同时



每个箭头的粗细和箭头上的数值分别代表路径系数及其大小,实线代表正相关,虚线代表负相关;***表示 $P<0.001$,**表示 $P<0.01$,*表示 $P<0.05$

Thickness of an arrow and the number on the arrow represent path coefficient; solid or dashed line represents positive or negative correlational relationship, respectively; ***, $P<0.001$; **, $P<0.01$; *, $P<0.05$

图7 主要指标与CO₂累积排放量的结构方程模型(SEM)

Figure 7 Structural equation modeling (SEM) of main indicators and cumulative CO₂ emissions

探讨土壤化学性质动态。然而,秸秆组成中,哪些物质或结构对有机物分解起决定性作用有待进一步研究。同时,结合16S rDNA、ITS和GeoChip等高通量测序技术,分析土壤中影响秸秆分解的关键微生物类群,明确它们与有机物降解功能的关系,对揭示农田生态系统中作物秸秆混合和异位还田的机制十分重要^[36-37]。此外,本试验为室内进行的恒温培养,今后的研究亟需拓展更丰富的秸秆类型和混合比例,并在大田试验中进行深入分析,明确秸秆混合还田和异位还田对有机碳固存及土壤肥力的长期影响。

4 结论

(1)在间作和玉米单作土壤中添加混合秸秆促进了CO₂排放,而在马铃薯单作土壤抑制了CO₂排放。添加玉米秸秆后土壤pH高于混合秸秆和马铃薯秸秆,培养105 d后显著增加土壤可溶性有机碳含量;马铃薯秸秆提高土壤速效钾的效果显著;秸秆类型对土壤NO₃-N和NH₄⁺-N含量的影响较小。

(2)马铃薯秸秆在原地(马铃薯单作)土壤环境中腐解表现出优势,马铃薯单作土壤中添加不同秸秆后增加土壤速效磷、速效钾和NH₄⁺-N含量的效果最佳。

(3)在本研究条件下,添加混合秸秆后间作和玉

米单作土壤中的CO₂排放增加。添加秸秆后可增加土壤速效养分(速效磷和速效钾),提高土壤肥力。秸秆类型对CO₂排放和土壤养分变化的影响大于种植模式,因此拓展不同类型秸秆(如豆科和非豆科)在不同分解环境中的田间腐解研究,对指导秸秆还田有重要意义。

参考文献:

- [1] 刘晓永, 李书田. 中国秸秆养分资源及还田的时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 1-19. LIU X Y, LI S T. Temporal and spatial distribution characteristics of crop straw nutrient resources and returning to farmland in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(21): 1-19.
- [2] 赵静. 中国农作物秸秆综合利用分析与对策[J]. 农业展望, 2019, 15(12): 121-124. ZHAO J. Analysis and countermeasure of comprehensive utilization of crop straw in China[J]. *Agricultural Outlook*, 2019, 15(12): 121-124.
- [3] CHAORAN Y, XIAO J W, BO H, et al. Effects of wheat straw incorporation in cotton-wheat double cropping system on nutrient status and growth in cotton[J]. *Field Crops Research*, 2016, 197: 39-51.
- [4] SIEDT M, SCHAFFER A, SMITH K E C, et al. Comparing straw, compost, and biochar regarding their suitability as agricultural soil amendments to affect soil structure, nutrient leaching, microbial communities, and the fate of pesticides[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 751: 141607.
- [5] ZHI Q T, CONG F L, JING J L, et al. Tillage and straw mulching impacts on grain yield and water use efficiency of spring maize in northern Huang-Huai-Hai Valley[J]. *The Crop Journal*, 2015, 3(5): 445-450.
- [6] NOBUHISA K, HIROYUKI T. Effects of reduced tillage, crop residue management and manure application practices on crop yields and soil carbon sequestration on an andisol in northern Japan[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, 55(4): 546-557.
- [7] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [8] YAKOV K. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(9): 1363-1371.
- [9] SUSAN E C, KATE L, RICHARD D B, et al. Increased coniferous needle inputs accelerate decomposition of soil carbon in an old-growth forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(10): 2224-2232.
- [10] 赵亚丽, 郭海斌, 薛志伟, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤微生物数量、酶活性及作物产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1785-1792. ZHAO Y L, GUO H B, XUE Z W, et al. Effects of tillage and straw returning on microorganism quantity, enzyme activities in soils and grain yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1785-1792.
- [11] LEI W, WEN J Z, WEN J W, et al. 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.
- [12] 杨滨娟, 黄国勤, 钱海燕. 秸秆还田配施化肥对土壤温度、根际微生物及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 150-157. YANG B J, HUANG G Q, QIAN H Y. Effects of straw incorporation plus chemical fertilizer on soil temperature, root micro-organisms and enzyme activities[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(1): 150-157.
- [13] PORRE R J, WERF W, DEYN G B, et al. Is litter decomposition enhanced in species mixtures? A meta-analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 145: 107791.
- [14] HANDA I T, AERTS R, BERENDSE F, et al. Consequences of biodiversity loss for litter decomposition across biomes[J]. *Nature*, 2014, 509: 218-221.
- [15] SHEN D, YE C, HU Z, et al. Increased chemical stability but decreased physical protection of soil organic carbon in response to nutrient amendment in a Tibetan alpine meadow[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 126: 11-21.
- [16] CHEN X, XU Y, GAO H, et al. Biochemical stabilization of soil organic matter in straw-amended, anaerobic and aerobic soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 1065-1073.
- [17] LIU J, LIU X, SONG Q, et al. Synergistic effects: A common theme in mixed-species litter decomposition[J]. *New Phytologist*, 2020, 227: 757-765.
- [18] BERGER T W, DUBOC O, DJUKIC I, et al. Decomposition of beech (*Fagus sylvatica*) and pine (*Pinus nigra*) litter along an Alpine elevation gradient: Decay and nutrient release[J]. *Geoderma*, 2015, 251/252: 92-104.
- [19] JULIA E P, ZOE L. Pure and mixed litters of *Sphagnum* and *Carex* exhibit a home-field advantage in Boreal peatlands[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 115: 161-168.
- [20] 栗杰, 刘慧, 董静超, 等. 秸秆还田对棕壤呼吸强度及土壤团聚体有机碳分布的影响[J]. 北方园艺, 2019(11): 97-103. LI J, LIU H, DONG J C, et al. Effects of respiration intensity and soil aggregate organic carbon distribution on straw returning in brown earth[J]. *Northern Horticulture*, 2019(11): 97-103.
- [21] 代文才, 高明, 兰木玲, 等. 不同作物秸秆在旱地和水田中的腐解特性及养分释放规律[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 188-199. DAI W C, GAO M, LAN M L, et al. Nutrient release patterns and decomposition characteristics of different crop straws in drylands and paddy fields[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(2): 188-199.
- [22] 王佳佳, 奚永兰, 常志州, 等. 麦秸不同部位生物降解速率差异[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(1): 74-80. WANG J J, XI Y L, CHANG Z Z, et al. The differences of biodegradation rates in the different parts of wheat straw[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(1): 74-80.
- [23] XU Y, KATALIN S, SCOTT L P, et al. The partitioning of litter carbon fates during decomposition under different rainfall patterns: A laboratory study[J]. *Biogeochemistry*, 2020, 148: 153-168.
- [24] 张叶叶, 莫非, 韩娟, 等. 秸秆还田下土壤有机质激发效应研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1381-1392. ZHANG Y Y, MO F, HAN J, et al. Research progress on the native soil carbon priming after straw addition[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(6): 1381-

- 1392.
- [25] 李寒冰, 金晓斌, 杨绪红, 等. 不同农田管理措施对土壤碳排放强度影响的Meta分析[J]. 资源科学, 2019, 41(9): 1630–1640. LI H B, JIN X B, YANG X H, et al. Meta-analysis of the effects of different farmland management measures on soil carbon intensity[J]. *Resources Science*, 2019, 41(9): 1630–1640.
- [26] 于寒, 谷岩, 梁烜赫, 等. 玉米秸秆腐解规律及土壤微生物功能多样性研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 305–309. YU H, GU Y, LIANG X H, et al. Study on decomposition characteristics of maize straw and soil microbial functional diversity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(2): 305–309.
- [27] 解文孝, 李建国, 刘军, 等. 不同土壤背景下秸秆还田量对水稻产量构成及氮吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(2): 248–255. XIE W X, LI J G, LIU J, et al. Effects of straw returning amounts on rice yield components and N uptake of different soil background[J]. *Soil and Fertilizer Science in China*, 2021(2): 248–255.
- [28] 李新华, 郭洪海, 朱振林, 等. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 130–135. LI X H, GUO H H, ZHU Z L, et al. Effects of different straw return modes on contents of soil organic carbon and fractions of soil active carbon[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(9): 130–135.
- [29] 王学霞, 张磊, 梁丽娜, 等. 秸秆还田对麦玉系统土壤有机碳稳定性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1774–1782. WANG X X, ZHANG L, LIANG L N, et al. Effects of straw returning on the stability of soil organic carbon in wheat-maize rotation systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(8): 1774–1782.
- [30] 王学敏, 刘兴, 郝丽英, 等. 秸秆还田结合氮肥减施对玉米产量和土壤性质的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(2): 507–516. WANG X M, LIU X, HAO L Y, et al. Effects of straw returning in conjunction with different nitrogen fertilizer dosages on corn yield and soil properties[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(2): 507–516.
- [31] 李昌明, 王晓玥, 孙波. 不同气候和土壤条件下秸秆腐解过程中养分的释放特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1206–1217. LI C M, WANG X Y, SUN B. Characteristics of nutrient release and its affecting factors during plant residue decomposition under different climate and soil conditions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(5): 1206–1217.
- [32] 刘文国, 赵强, 杨艳美. 秸秆还田处理对土壤化学性状及玉米产量的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(27): 111–117. LIU W G, ZHAO Q, YANG Y M. Straw returning: Effects on soil physical and chemical properties and maize yield[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(27): 111–117.
- [33] 宫秀杰, 钱春荣, 曹旭, 等. 玉米秸秆还田配施氮肥对土壤酶活、土壤养分及秸秆腐解率的影响[J]. 玉米科学, 2020, 28(2): 151–155. GONG X J, QIAN C R, CAO X, et al. Effects of nitrogen fertilizer on soil enzymatic activity, soil nutrients and decomposition rate of maize straw[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2020, 28(2): 151–155.
- [34] HU Y J, SUN B H, WU S F, et al. After-effects of straw and straw-derived biochar application on crop growth, yield, and soil properties in wheat (*Triticum aestivum* L.) – maize (*Zea mays* L.) rotations: A four-year field experiment[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 780: 146560.
- [35] GHOSH A, KUMAR R V, MANNA M C, et al. Eco-restoration of degraded lands through trees and grasses improves soil carbon sequestration and biological activity in tropical climates[J]. *Ecological Engineering*, 2021, 162(7/8): 106176.
- [36] LIN Y, YE G, KUEYAKOV Y, et al. Long-term manure application increases soil organic matter and aggregation, and alters microbial community structure and keystone taxa[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 134: 187–196.
- [37] WANG X, BIAN Q, JIANG Y, et al. Organic amendments drive shifts in microbial community structure and keystone taxa which increase C mineralization across aggregate size classes[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 153: 108062.

(责任编辑:叶飞)