

## 玉米秸秆在潮土中的降解及对有机质积累的影响<sup>①</sup>

王娅茹<sup>1,2</sup>, 熊简安然<sup>1</sup>, 赵占辉<sup>1</sup>, 吴其聪<sup>1</sup>, 张丛志<sup>1\*</sup>, 张佳宝<sup>1</sup>, 薛载琦<sup>1</sup>, 薛雅<sup>1,2</sup>,  
王红叶<sup>3</sup>, 陆芸萱<sup>1</sup>, 王擎运<sup>4</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 211135; 2 中国科学院大学南京学院, 南京 211135; 3 农业农村部耕地质量监测保护中心, 北京 100125; 4 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

**摘要:** 为探究玉米秸秆降解过程和秸秆有机碳基团的变化规律及其对于潮土有机质和腐殖酸的影响, 本文针对华北平原潮土, 设置了土壤与秸秆比为 200 : 1+不施氮肥(L); 土壤与秸秆比为 200 : 1+450 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥(LN); 土壤与秸秆比为 50 : 1+不施氮肥(H); 50 : 1+450 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥(HN)的四个处理。结果表明: ①玉米秸秆的降解量随培养时间的增加而增加, 培养至第 180 天时, H 和 HN 处理的玉米秸秆降解率最高, 达到 76.87%; ②在秸秆的降解过程中, 秸秆羰基碳、芳香碳和烷基碳的相对含量增加, 烷氧碳的相对含量降低; ③潮土有机质含量随秸秆用量和培养时间的增加而增加, 其中 HN 处理培养 180 d 后有机质提升最多, 增加了 4.34 g/kg。在相同施氮水平下, 与低量秸秆还田处理相比, 增加秸秆施用量后不施氮肥和施用氮肥处理有机质含量分别提升了 13.88% 和 12.19%。在潮土中腐殖酸的绝对含量与秸秆的施用量有关。与原始土样腐殖酸含量相比, HN 与 H 处理分别提升了 3.33% 和 5.58%, LN 与 L 处理却下降了 12.32% 和 13.79%。

**关键词:** 潮土; 秸秆还田; 有机碳; 土壤有机质

**中图分类号:** S141.4 **文献标志码:** A

### Degradation of Maize Straw in Fluvo-aquic Soil and Its Effect on Accumulation of Organic Matter

WANG Yaru<sup>1,2</sup>, XIONG Jian'anran<sup>1</sup>, ZHAO Zhanhui<sup>1</sup>, WU Qicong<sup>1</sup>, ZHANG Congzhi<sup>1\*</sup>, ZHANG Jiabao<sup>1</sup>, XUE Zaiqi<sup>1</sup>,  
XUE Ya<sup>1,2</sup>, WANG Hongye<sup>3</sup>, LU Yunxuan<sup>1</sup>, WANG Qingyun<sup>4</sup>

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Nanjing 211135, China*; 3 *Cultivated Land Quality Monitoring and Protection Center, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China*; 4 *College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China*)

**Abstract:** To investigate the decomposition dynamics of maize straw, the transformation of straw-derived organic carbon functional groups, and their effects on soil organic matter and humic acid in fluvo-aquic soil, we conducted an incubation experiment on soils from the North China Plain. Four treatments were established: 1) a soil-to-straw ratio of 200 : 1 without N fertilizer (L); 2) 200 : 1 with 450 kg/hm<sup>2</sup> of N fertilizer (LN); 3) 50 : 1 without N fertilizer (H); and 4) 50 : 1 with 450 kg/hm<sup>2</sup> of N fertilizer (HN). The results showed that: 1) The amount of maize straw degraded increased progressively over the incubation period. By day 180, the H and HN treatments showed the highest degradation rate, reaching 76.87%. 2) During straw decomposition, the relative proportions of carbonyl C, aromatic C, and alkyl C increased, whereas the relative proportion of O-alkyl C decreased. 3) Soil organic matter content increased with both straw application rate and incubation duration. The greatest increase occurred under the HN treatment after 180 days, with an increment of 4.34 g/kg. Under the same N level, compared with low straw addition, increasing straw input enhanced soil organic matter content by 13.88% (without N) and 12.19% (with N). The absolute content of humic acid in the fluvo-aquic soil was strongly influenced by straw application rate.

①基金项目: 安徽省重点研究与开发项目(2023n06020056)、国家重点研发计划项目(2022YFD1500905 和 2022YFD1500905)和中国科学院战略性先导科技专项预期重大成果攻关任务(XDA28110100)资助。

\* 通信作者(czzhang@issas.ac.cn)

作者简介: 王娅茹(2003—), 女, 河南信阳人, 硕士研究生, 研究方向为土壤地力提升。E-mail: wangyaru24@mails.ucas.ac.cn

Compared with the initial soil, humic acid increased by 3.33% and 5.58% under the HN and H treatments, respectively, whereas the LN and L treatments showed decreases of 12.32% and 13.79%.

**Key words:** Fluvo-aquic soil; Straw return; Organic carbon; Soil organic matter

华北平原是我国重要的粮食生产区,以小麦和玉米为主。主要耕作土壤类型是潮土,大多地势平坦、土壤耕层较厚、生产力高、增产潜力大<sup>[1]</sup>。然而,由于长期高强度利用,砂性质地的潮土有机质含量低下且积累困难,土壤结构差、养分不均衡、耕层浅薄以及水分和养分利用效率较低,制约着作物生产力的进一步提高和农业的可持续发展<sup>[2-5]</sup>。我国农作物秸秆资源巨大,年产量超过 10 亿吨,其中玉米秸秆产量最大且逐年增加<sup>[6-8]</sup>。秸秆不当焚烧不仅会造成生物资源浪费,水体、大气污染,还会导致土壤表层有机质流失。目前秸秆处理方式以秸秆还田为主,秸秆还田在减少化肥施用、促进土壤固碳、保持土壤肥力、促进团聚体碳、氮积累等方面发挥着关键作用<sup>[9-11]</sup>。不仅有助于改善土壤中的微生物群落结构,促进作物根系的健康发育<sup>[12-13]</sup>;作为外源碳还能够培肥土壤,提升土壤质量,同时实现秸秆资源的再循环利用<sup>[14-15]</sup>。施氮能够显著降低土壤溶解性有机碳含量,改变溶解性有机碳组分结构<sup>[16]</sup>。化肥与秸秆配合施用能够显著改善土壤团粒结构稳定性<sup>[17-18]</sup>。

目前关于秸秆还田的研究主要集中在对土壤有机质积累的影响<sup>[19-20]</sup>,而关于秸秆降解过程及潮土有机质各组分变化的响应机制尚不清楚。因此,本研究以华北平原潮土为研究对象,依托中国科学院封丘农业生态试验平台,研究玉米秸秆降解过程和秸秆有机碳基团的变化规律及其对于潮土有机质和腐殖酸的影响。旨在定量揭示潮土玉米秸秆降解过程及其对有机质积累的影响,为指导该地区秸秆还田提供数据支撑和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验土样采于中国科学院封丘农田生态系统国家试验站(35°00'N, 114°24'E),该试验站属半干旱、半湿润的暖温带季风气候,年平均降水量为 605 mm,年蒸发量在 1 875 mm,年平均气温为 13.9 °C,无霜期在 220 d 左右。站区地貌具有典型的黄河泛滥区特征,土壤类型主要为黄河沉积物发育的潮土,种植模式为夏玉米-冬小麦轮作。试验地基本理化性质见表 1。

表 1 试验区土壤基本理化性质

pH	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	速效氮 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
8.26	7.74	0.66	0.81	19.92	47.59	137.65

### 1.2 样品采集与处理

采用 S 形布点法采集表层土壤(0~20 cm),采集完成后装入无菌自封袋中,运回实验室。将土样全部混匀后自然风干,并去除可见的石块、植物残体等杂物,研磨过 10 目筛。过筛后部分土样供土壤基本理化性质等指标的测定;部分土样进行烘干,用于室内培养试验。培养中使用的秸秆为玉米秸秆,烘干后用粉碎机打碎至 5 mm 以下用作秸秆培养试验,另取一部分过 60 目筛用作初始样品秸秆碳基团的测定。

### 1.3 试验设计

试验共设 4 个处理,分别为土壤与秸秆比为 200 : 1+不施氮肥(L);土壤与秸秆比为 200 : 1+450 kg/hm<sup>2</sup>氮肥(LN);土壤与秸秆比为 50 : 1+不施氮肥(H);土壤与秸秆比为 50 : 1+450 kg/hm<sup>2</sup>氮肥(HN)。所用氮肥为尿素,含氮量 46.4%,施氮处理一次性施入;烘干土样称取 200 g,秸秆按混合比(200 : 1、50 : 1),分别施入 1 g 秸秆、4 g 秸秆。

准备长 12 cm、宽 7 cm、高 6 cm 的塑料盒,将烘干土样的三分之一平铺于塑料盒底部。采用网袋法施入秸秆,将秸秆装入 300 目的长 11 cm、宽 6 cm 的尼龙网袋中封口施入铺平。再放入剩余土样,轻微摇晃至表面平整,加水至 60% 田间持水量。用保鲜膜封住塑料盒顶端,再在保鲜膜上打 6~8 个小孔,保证土壤与外界空气流通。置于 25 °C 培养箱中进行培养,并保证整个培养期土壤含水量维持 60% 田间持水量。每个处理 3 次重复,分别于培养周期(7、20、90、180 d)结束后取样测定指标。

由于是破坏性取样,为便于取样每个重复设置 4 个盒子,每次采样后舍去该盒子。每个培养周期结束后,取出 12 个培养盒,收集网袋周围 1 cm 的土样,用于各指标的测定。将收集到的土样过 60 目筛后进行土壤有机质、腐殖质等指标的测定。并将网袋中的秸秆全部取出,烘干并称重,再使用球磨仪将秸秆磨碎过 60 目筛后进行秸秆碳基团的分析测定。

## 1.4 测定项目与方法

**1.4.1 土壤基本理化性质的测定** 土壤基本理化性质测定参考《土壤农化分析》<sup>[21]</sup>：环刀法测定土壤容重；玻璃电极法(水土质量比 5 : 1)测定土壤 pH；重铬酸钾氧化-外加热法测定土样有机质含量；半微量凯氏定氮法测定土壤全氮；硫酸-高氯酸消煮法测定土壤全磷；火焰光度法测定土壤全钾。

**1.4.2 土壤腐殖酸的测定** 参考《土壤农化分析》<sup>[21]</sup>，用 0.1 mol/L 氢氧化钠和 0.1 mol/L 焦磷酸钠混合液对土样进行处理，将土壤中难溶于水和易溶于水的结合态腐殖质络合成溶于水的腐殖质钠盐，从而较完全地将腐殖质提取出来。使用重铬酸钾氧化法测定土壤腐殖酸含量。

$$\text{腐殖酸总碳量}(\%) = \frac{(V_0 - V) \times C \times 0.003 \times 1.08}{m} \times 100$$

(1)

式中： $V_0$ ，空白实验消耗的硫酸亚铁铵标准溶液体积(mL)； $V$ ，待测液滴定消耗的硫酸亚铁铵标准溶液体积(mL)； $C$ ，硫酸亚铁铵标准溶液的浓度(mol/L)；0.003，碳的毫摩尔质量( $12 \text{ g/mol} \div 4 \times 10^{-3} = 0.003 \text{ g/mmol}$ )，其中 4 是电子转移数(每摩尔  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  接受 6 电子，对应氧化 1.5 mol 碳)；1.08，氧化校正系数(因重铬酸钾不能完全氧化有机碳，需校正)； $m$ ，腐殖酸样品的质量(g)；100，换算为百分数。

**1.4.3 秸秆降解率的测定** 使用失重法测定秸秆降解率。

$$\text{秸秆降解率}(\%) = \frac{(\text{施入秸秆量} - \text{秸秆残留量})}{\text{施入秸秆量}} \times 100$$

(2)

**1.4.4 秸秆碳基团的测定** 利用固体核磁共振技术<sup>[22-23]</sup>，使用 Bruker AVANCE III HD 400 MHz 固体核磁共振波谱仪进行测定。检测方法采用 H/X 双共振固体宽带探头、4 mm  $\text{ZrO}_2$  转子，转速 5 000 Hz， $^{13}\text{C}$  的检测共振频率为 100.625 Hz、以标准物甘氨酸标定化学位移、采样时间 5.12  $\mu\text{s}$ 、谱宽 100 kHz、90 脉宽 4  $\mu\text{s}$ 、循环延迟时间 5.47  $\mu\text{s}$ 、扫描次数为 4 096 次。放置约 100 mg 秸秆样品放入 4 mm 转子中，将图谱中共振区域划分为 8 个区段： $\delta=0\sim 45$ ，烷基 alkyl； $\delta=45\sim 60$ ，NCH/OCH<sub>3</sub>； $\delta=60\sim 93$ ，含氧烷基 O-alkyl； $\delta=93\sim 110$ ，二氧烷基 alkyl O-C-O； $\delta=110\sim 142$ ，芳香碳 C-C+/H aromatic C-C+/H； $\delta=142\sim 165$ ，芳香碳 C-O aromatic C-O； $\delta=165\sim 190$ ，COO/N-C=O 和  $\delta=190\sim 220$ ，醛酮类 ketones or aldehydes。

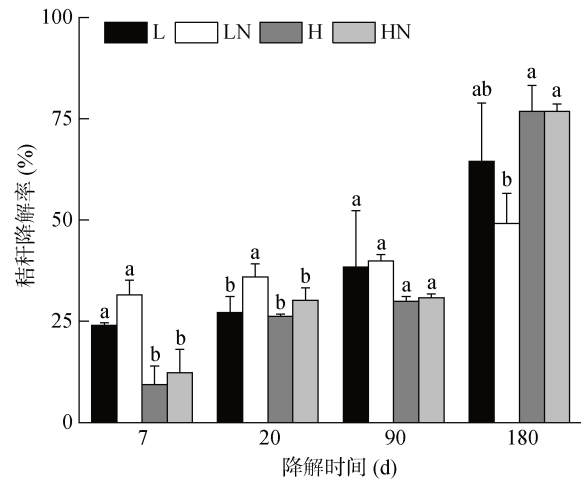
## 1.5 数据处理

试验数据用 Excel 2021 整理，用 SPSS Statistics 27 进行单因素方差分析，并采用单因素(one-way ANOVA)与邓肯检验(Duncan test)进行处理间显著性检验( $P < 0.05$ )，用 Origin 2022 进行作图，用 Adobe Illustrator 2025 对秸秆 NMR 图谱进行拼图处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施氮水平与还田量对玉米秸秆降解率的影响

由图 1 可知，经过 7 d 室内培养后，秸秆降解率从高到低依次为 LN(31.53%)、L(24.00%)、HN(12.25%)、H(9.41%)；培养 20 d 后，秸秆降解率从高到低依次为 LN(35.97%)、HN(30.15%)、L(27.13%)、H(26.17%)。90 d 后 LN 处理秸秆降解率达到 39.88%，降解率从高到低依次为 L、HN、H 处理。在第 20 天到第 90 天期间，L 处理降解率升高了 11.26%，而 HN 处理在此期间降解率仅升高了 0.62%。H 处理与 HN 处理降解率差距逐渐缩小，至 180 天时齐平。从第 90 天到第 180 天时，各处理降解情况与前面有所差异：相比于第 90 天，第 180 天时 H 处理秸秆降解率增加了 47.33%，第 180 天时 H 处理和 HN 处理降解率最高，达到了 76.87%，其余秸秆降解率从高到低依次 L(64.48%)、LN(49.15%)。



(不同小写字母表示同一时间不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )；L 为土壤与秸秆比为 200 : 1+不施氮肥处理；LN 为土壤与秸秆比为 200 : 1+450 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥处理；H 为土壤与秸秆比为 50 : 1+不施氮肥处理；HN 为土壤与秸秆比为 50 : 1+450 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥处理，下同)

图 1 潮土中不同秸秆添加量与施氮水平下玉米秸秆的降解率动态

Fig. 1 Dynamics of maize straw degradation rate under different straws application rates and nitrogen addition levels in fluvo-aquic soil.

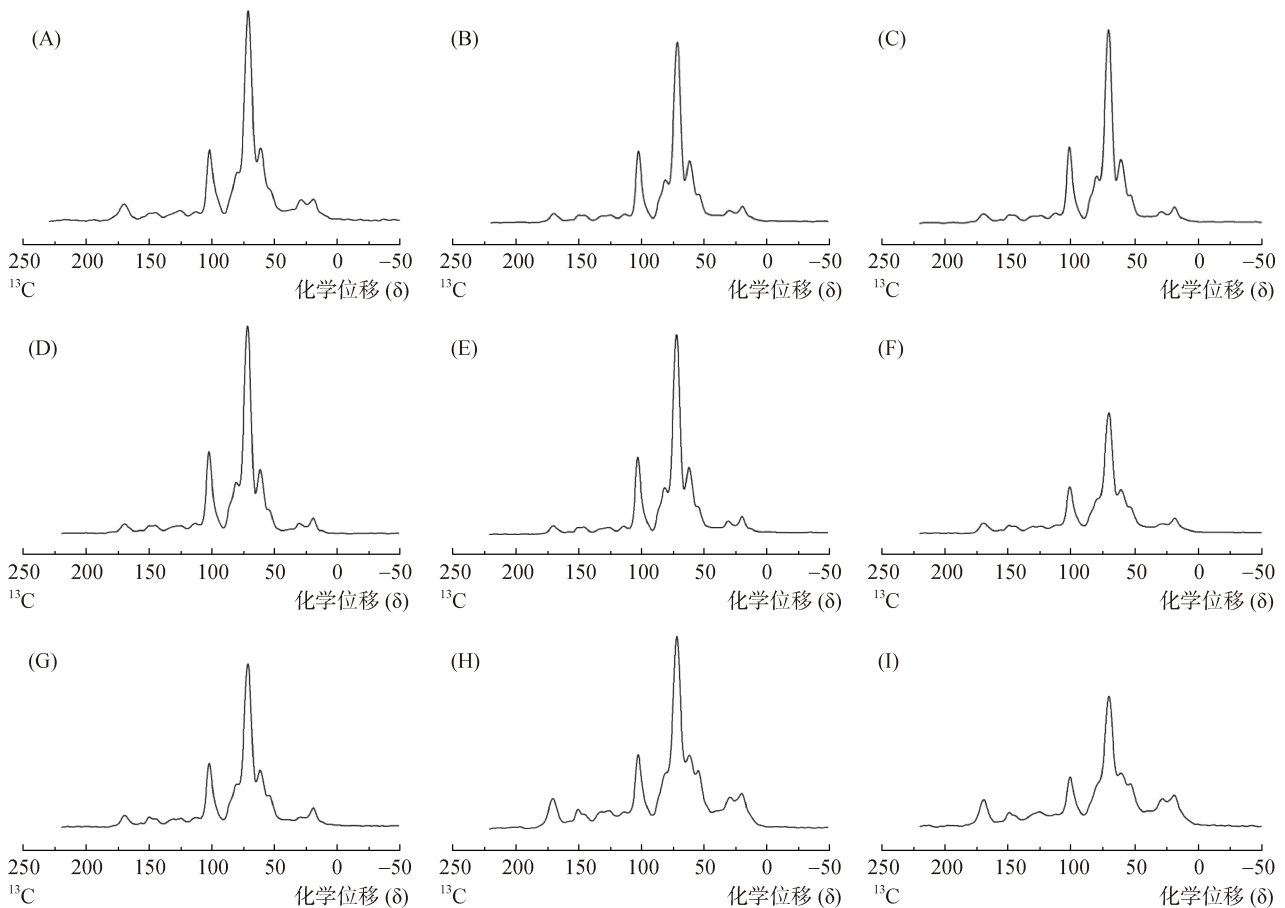
## 2.2 玉米秸秆降解过程中秸秆有机碳基团的变化

利用固体核磁共振技术研究玉米秸秆在不同处理下腐解 7、20、90、180 d 后的结构变化, 选取 H 和 HN 处理进行分析。

玉米秸秆降解前原始样品核磁共振图谱如图 2A 所示, 图谱中显示了分析结构中  $\delta=50\sim 220$  的所有碳位。初始样品图谱中氧烷基( $\delta=60\sim 93$ )和二氧烷基( $\delta=90\sim 110$ )区域呈现了尖而强的峰型。主要特征峰为  $\delta=62$  附近的氧烷基, 包含  $\text{OCH}_2$  基团;  $\delta=72$  附近的 OCH 基团(主要为碳水化合物);  $\delta=105$  附近的二氧烷基(alkyl O-C-O)等。在  $\delta=100\sim 142$ (芳香碳等)处没有明显信号, 在  $\delta=142\sim 165$  的芳香碳处的弱信号代表了木质素存在。此外, 初始秸秆在  $\delta=0\sim 45$ (烷基)处信号较弱,  $\delta=175$ (COO/N-C=O)信号也较弱, 这些信号主要与蛋白质与多肽有关。

玉米秸秆降解 7 d 后的核磁共振图谱见图 2B 和图 2C。从 NMR 图谱中可以看出, 图谱信号与原始

玉米秸秆样的图谱信号相近,  $\delta=72$  附近的 OCH 基团(含氧烷基, 主要为碳水化合物)有强烈的信号峰值。玉米秸秆中  $\delta=27$  处信号变化较小, 在  $\delta=62$  处信号增强, 不同处理间各样品 NMR 图谱信号强度差异不显著。玉米秸秆降解 20 d 后的核磁共振图谱(图 2D、图 2E)显示在  $\delta=0\sim 50$ 、 $\delta=50\sim 110$ 、 $\delta=110\sim 160$  和  $\delta=160\sim 220$  等处的信号强度与培养 7 d 后图谱有相似规律。由图 2F 和图 2G 可得, 玉米秸秆降解 90 d 后,  $\delta=72$  附近的含氧烷基信号较原状秸秆减弱, 且未施氮肥处理含氧烷基的信号下降更明显。玉米秸秆降解 180 d 后的核磁共振图谱见图 2H 和图 2I, 在秸秆降解过程中, 烷基的增加与含氧烷基的下降同时出现时, 可作为表征降解度的指标。从 NMR 图谱中可以看出, 与原状秸秆相比, 秸秆降解度增加, 且在施氮肥处理表现得更加明显。同时观察到  $\delta=100\sim 142$  处信号增强, 且观测到在  $\delta=50\sim 65$  中出现双信号峰。



(A, 原始样品; B, H 处理降解 7 天样品; C, HN 处理降解 7 天样品; D, H 处理降解 20 天样品; E, HN 处理降解 20 天样品; F, H 处理降解 90 天样品; G, HN 处理降解 90 天样品; H, H 处理降解 180 天样品; I, HN 处理降解 180 天样品。在玉米秸秆中, 信号所代表的官能团有: 烷基碳( $\delta=0\sim 50$ ); 烷氧碳( $\delta=50\sim 110$ ); 芳香碳( $\delta=110\sim 160$ ); 羰基碳( $\delta=160\sim 220$ ))

图 2 玉米秸秆 NMR 图谱

Fig. 2 NMR spectra of maize straw

玉米秸秆碳基团百分含量如图 3 所示。在玉米秸秆原始样品中，烷基碳(alkyl C)占比 8.11%，羰基碳(carbonyl C)占比 3.84%，芳香碳(aromatic C)占比 5.72%，烷氧碳(O-alkyl)占比 82.33%。降解至第 180 天时，H 处理和 HN 处理烷基碳、羰基碳和芳香碳的相对含量均增加，而烷氧碳(O-alkyl)的相对含量降低，其中 HN 处理的烷基碳、羰基碳和芳香碳的相对含量高于 H 处理，烷氧碳(O-alkyl)的相对含量低于 H 处理。

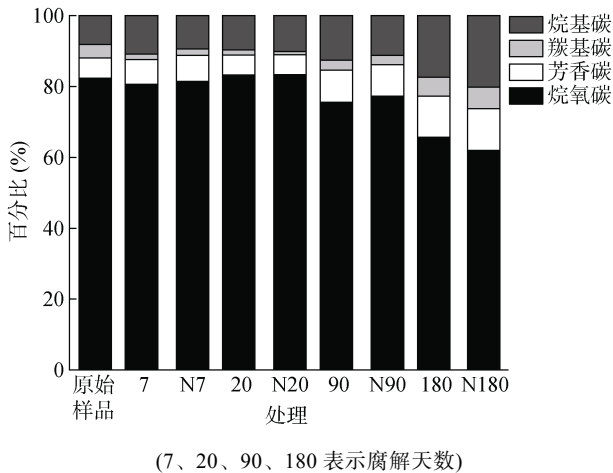


图 3 <sup>13</sup>C CP/MAS NMR 表征的玉米秸秆基团百分含量  
Fig. 3 Composition of functional groups (%) in maize straws characterized by <sup>13</sup>C CP/MAS NMR

### 2.3 玉米秸秆对潮土有机质的影响

**2.3.1 潮土有机质含量变化** 如图 4 所示，潮土有机质含量随着培养时间的增加而增加，培养至第 7 天时，HN 处理有机质积累最快，然后依次是 H 处理和 L 处理，LN 处理有机质积累最慢；培养至第 20 天时，HN 处理有机质含量最高，然后依次是 H 处理和 LN 处理和 L 处理；培养至第 90 天与第 180 天时，潮土有机质累积规律同培养至第 20 天时。培养至第 180 天时，相较于培养试验前的土样有机质含量 12.48 g/kg，L 处理有机质含量提升了 13.87%，LN 处理有机质含量提升了 20.15%，H 处理有机质含量提升了 29.68%，其中 HN 处理有机质含量提升最多，提升了 34.79%，为 4.34 g/kg；在相同施氮水平下，与低秸秆施用比例处理相比，增加秸秆施用量后不施氮肥和施用氮肥处理有机质含量分别提升了 13.88% 和 12.19%。

**2.3.2 潮土腐殖酸含量变化** 由图 5 可知，HN 处理与 H 处理的腐殖酸含量先下降而后有所增加，培养至第 7 天时腐殖酸含量最低，培养至第 180 天时腐殖酸含量最高，此时 HN 处理的腐殖酸含量为 2.10 g/kg，

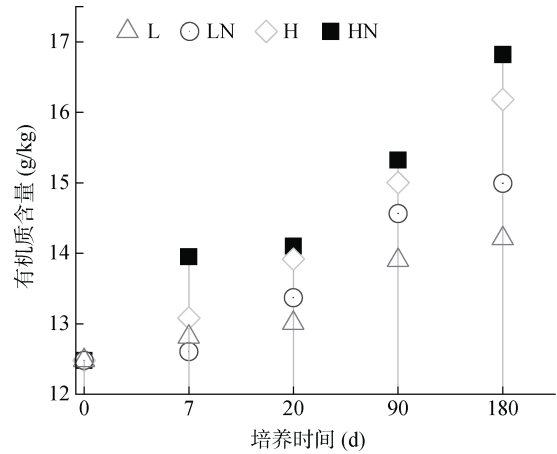


图 4 不同秸秆还田量与施氮水平下潮土有机质含量的动态变化  
Fig. 4 Dynamic changes in soil organic matter content under different straw return rates and nitrogen addition levels in fluvo-aquic soil.

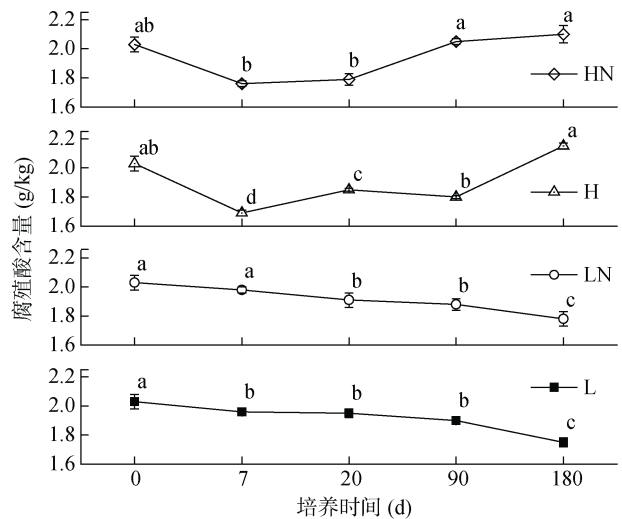


图 5 秸秆分解期间潮土腐殖酸含量变化  
Fig. 5 Changes of soil humic acid content in fluvo-aquic soil during straw decomposition

H 处理的腐殖酸含量为 2.15 g/kg，与原始土样腐殖酸含量 2.03 g/kg 相比分别提升 3.45%、5.91%；而 LN 处理与 L 处理的腐殖酸含量随着时间的延长而降低，180 d 时腐殖酸含量最低，此时 LN 处理的腐殖酸含量为 1.78 g/kg，L 处理的腐殖酸含量为 1.75 g/kg，较原始土样分别下降 12.32%、13.79%。

## 3 讨论

### 3.1 秸秆降解率

秸秆降解是一个以微生物为主导的生物学过程，其降解效率受秸秆种类、降解模式及环境气候条件等多因素调控<sup>[24]</sup>。如何快速降解秸秆，提高秸秆降解率是农业可持续发展研究的重要问题。本研究中培养试验前期(0~90 d)，低秸秆施用比例处理( $m_{\text{土壤}} : m_{\text{秸秆}} =$

200 : 1)表现出较高的降解率,可能是因为秸秆基数少,易分解成分快速分解;且施氮处理大于未施氮处理,可能是由于施用氮肥处理的前期,土壤与秸秆的碳氮比适合微生物活动,引起秸秆加速分解<sup>[25]</sup>。培养至 180 d 时,所有处理中易分解成分已基本分解完毕。随着培养时间的增加,后期高秸秆施用比例处理的秸秆降解率升高,其原因在于随着培养时间增加,土壤中的秸秆量大,可被降解的秸秆基数较大,因此高秸秆施用比例处理( $m_{\text{土壤}} : m_{\text{秸秆}}=50 : 1$ )的秸秆降解率大于低秸秆施用比例处理( $m_{\text{土壤}} : m_{\text{秸秆}}=200 : 1$ )。并且未施氮肥处理秸秆降解率更高,其原因可能在于后期秸秆被降解,施氮处理的土壤与秸秆的碳氮比降低,过量氮肥抑制了降解秸秆微生物的活动,进而阻遏秸秆分解<sup>[26]</sup>。

### 3.2 玉米秸秆降解过程中秸秆有机碳基团的变化

玉米秸秆降解前原始样品核磁共振图谱说明在玉米秸秆降解前主要由碳水化合物(纤维素、半纤维素)组成,蛋白质、脂类、木质素等含量较低,与前人<sup>[27-28]</sup>研究一致。室内培养 7 d 后,玉米秸秆在  $\delta=27$  处信号变化较小,在  $\delta=62$  处信号增强,说明降解过程对秸秆中的烷基( $\delta=0\sim 45$ )影响较小,此时氮肥对秸秆的碳官能团影响较小;降解 20 d 后,秸秆有机碳基团也未发生显著改变。秸秆有机碳的响应受到多种因素的影响<sup>[29-34]</sup>,在此可能是因为受到光照、湿度等限制了秸秆有机碳基团的转化。培养至第 90 天时, $\delta=72$  附近的含氧烷基信号较原状秸秆减弱,潮土中含氧烷基(O-alkyl)碳开始快速矿化,且未施氮肥处理含氧烷基的信号下降更明显,这与碳水化合物容易被微生物优先利用相关<sup>[35]</sup>。玉米秸秆降解 180 d 后,与原状秸秆相比,秸秆降解度增加,且在施氮肥处理表现得更加明显,可能是由于施入氮肥调节了土壤碳氮比促进了秸秆有机碳基团的转化<sup>[36]</sup>。在 7 d 与 90 d 时,氮肥的施用对秸秆碳基团的转化效用为负;在 20 d 与 180 d 时,氮肥的施用对秸秆碳基团的转化效用为正,说明氮肥的施用会影响秸秆有机碳基团的转化。

植物残体在土壤中的降解过程影响着有机碳在土壤中的累积和土壤有机质的形成,不同植物残体组分在土壤中的相对稳定性及其对土壤有机质形成和稳定的贡献程度不同。Cepáková 和 Frouz<sup>[37]</sup>总结分析了约 130 个凋落物的 NMR 图谱特征,发现在凋落物分解过程中脂肪族化合物(烷基碳)和芳香族化合物(芳香基碳)的相对比例显著增加,其中玉米秸秆降解过程中秸秆碳基团主要的变化为含氧烷基的减少,而烷基碳和芳香基碳含量呈增加趋势,与本研究结果一

致。在秸秆降解试验中,秸秆烷基碳、芳香基碳和烷基碳的相对含量增加,烷氧基碳的相对含量降低,是由于烷基碳主要来自不易分解的蜡质、角质、软木脂和脂质等,是凋落物中不易分解的顽固性组分<sup>[38-39]</sup>,而含氧烷基碳作为最容易被光照利用的成分<sup>[40]</sup>,经过快速矿化过程转变为了其余三种成分。整个降解过程在不同处理下化学结构组成有趋同效应。

### 3.3 玉米秸秆对潮土有机质的影响

玉米秸秆降解至第 7 天时, LN 处理秸秆降解率高于 L 处理,而有机质含量却低于 L 处理,是由于氮肥促进秸秆的降解,但由于加入秸秆引起土壤有机质的矿化速度发生变化,即激发效应,导致 LN 处理的有机质含量低于 L 处理<sup>[41]</sup>。玉米秸秆降解至第 180 天时,相较于原始土样,各处理土壤有机质含量均有所提升,且施用秸秆多的处理大于施用秸秆少的处理,施加氮肥处理大于未施氮肥处理。可能是由于施用氮肥,秸秆在土壤中被降解,一部分碳被微生物合成,形成腐殖物质。有机物降解形成的腐殖质中芳香基碳、烷基碳、含氧烷基碳等均可以促进土壤颗粒的团聚,提高土壤有机质的稳定性<sup>[35]</sup>。腐殖质含量的多少取决于形成量与分解量的相对大小值,因此在试验中所研究的腐殖物质的动态变化主要强调秸秆在分解过程中“新形成”的腐殖物质动态<sup>[42]</sup>,以腐殖酸(HA)的含量作为研究指标,可探明腐殖质形成量与分解量的相对大小值。在潮土中腐殖酸的含量与秸秆的施入量相关, HN 处理与 H 处理和原始土样腐殖酸含量相比分别提升 3.33% 和 5.58%; LN 处理和 L 处理较原始土样分别下降 12.32%、13.79%。土壤与秸秆比例为 200 : 1 时,活性腐殖酸不易累积,分解的腐殖酸大于形成的腐殖酸,腐殖酸在有机质含量较低的土壤中积累较为缓慢,被消耗的腐殖酸更多。

## 4 结论

1)玉米秸秆的降解受培养时间驱动,呈现出前期快速、后期趋缓的规律。尽管氮肥的施用在培养初期显著拉大了处理间的差异,但随着易分解组分的耗竭,这种差异逐渐缩小。培养至第 180 天时,高秸秆施用比例处理(H 和 HN 处理)的秸秆降解率最高,达到了 76.87%。经过 180 d 培养后,秸秆中大部分较容易降解的物质已被降解。

2)秸秆腐解是一个化学结构从不稳定向稳定定向转化的过程。原始秸秆中占据主导地位的烷氧基(O-alkyl C, 占比 82.33%)作为易分解组分被优先消耗,导致其相对含量大幅下降;而烷基碳(8.11%)、

芳香碳(5.72%)等顽固性组分则在残留物中逐渐富集。施氮虽能加速这一进程,但并未改变碳骨架最终趋向芳构化和去糖化的演变规律。

3)潮土有机质含量随秸秆用量和培养时间的增加而增加。培养至第 180 天时,相较于原始土样,L、LN、H 和 HN 处理有机质含量分别提升了 13.87%、20.15%、29.68% 和 34.79%,其中 HN 处理(土壤与秸秆比为 50 : 1+ 450 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥)是提升潮土有机质的最优模式,增加了 4.34 g/kg,显著优于单施秸秆或低量还田处理。在相同施氮水平下,增加秸秆施用量后不施氮肥和施用氮肥处理有机质含量分别提升了 13.88% 和 12.19%。高量还田(H 和 HN)实现了腐殖酸的净积累,含量分别提升了 5.58% 和 3.33%,相反,低量还田(L 和 LN)却下降了 12.32% 和 13.79%。施入秸秆较少时,活性腐殖酸不易累积。

### 参考文献:

- [1] 黄少辉, 杨军芳, 杨云马, 等. 长期不同施肥措施下华北潮土土壤有机碳的固存变化[J]. 华北农学报, 2019, 34(S1): 168-175.
- [2] Ding S J, Zhang X F, Yang W L, et al. Soil nutrients and aggregate composition of four soils with contrasting textures in a long-term experiment[J]. Eurasian Soil Science, 2021, 54(11): 1746-1755.
- [3] 郭伟, 李丹丹, 徐基胜, 等. 秸秆与有机无机肥配施对不同质地潮土土壤质量和小麦产量的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(5): 1360-1373.
- [4] 王梦宇, 仝昊天, 韩燕来, 等. 深耕及培肥对砂姜黑土理化性质和小麦产量的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(6): 1431-1439.
- [5] 孙波, 朱安宁, 姚荣江, 等. 潮土、红壤和盐碱地障碍消减技术与产能提升模式研究进展[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1231-1247.
- [6] 石祖梁, 王飞, 王久臣, 等. 我国农作物秸秆资源利用特征、技术模式及发展建议[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(5): 8-16.
- [7] 纪晓雪. 秸秆利用技术及秸秆粉碎设备的研究现状及发展探究[J]. 农业开发与装备, 2022(2): 103 - 105.
- [8] Chen L M, Sun S L, Zhou Y Y, et al. Straw and straw biochar differently affect fractions of soil organic carbon and microorganisms in farmland soil under different water regimes[J]. Environmental Technology & Innovation, 2023, 32: 103412.
- [9] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [10] Wang X G, Wang Q S, Zhang Y C, et al. Influence of decomposition agent application and schedule in wheat straw return practice on soil quality and crop yield[J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2023, 10(1): 8.
- [11] 吴艳, 宋惠洁, 胡丹丹, 等. 等碳量不同有机物料添加对红壤团聚体组分分布及有机碳、氮含量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(4): 556-564.
- [12] 潘越, 李思宇, 高捷, 等. 秸秆及其还田方式对不同轮作模式下稻田土壤性质影响的研究进展[J]. 作物杂志, 2024(2): 1-8.
- [13] Maarastawi S A, Frindte K, Bodelier P L E, et al. Rice straw serves as additional carbon source for rhizosphere microorganisms and reduces root exudate consumption[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 135: 235-238.
- [14] 张迎春, 王萍, 刘亚龙, 等. 长期种植作物对中国农田土壤有机碳影响的 Meta 分析[J]. 土壤学报, 2024, 61(6): 1628-1638.
- [15] 隽英华, 何志刚, 刘慧屿, 等. 秸秆还田与氮肥运筹对农田棕壤微生物生物量碳氮及酶活性的调控效应[J]. 土壤, 2023, 55(6): 1223-1229.
- [16] 王静, 朱猛, 赵鹏, 等. 氮肥配施生物质碳点对潮土微生物残体碳含量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(10): 1348-1357.
- [17] Guo W, Zhou Y P, Xu J S, et al. Straw management and fertilization improve soil aggregate stability by inducing biological binding agents and specific keystone genera[J]. Pedosphere, 34. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2024.10.005>.
- [18] Tian Y C, Wang J J, Liu S, et al. Soil organic carbon and aggregate characteristics in a subtropical cotton production field as influenced by century-long crop rotation and fertility management [J]. Pedosphere, 2025, 35(2): 373-386
- [19] Jian J S, Du X, Reiter M S, et al. A meta-analysis of global cropland soil carbon changes due to cover cropping[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 143: 107735.
- [20] Hao X X, Han X Z, Wang S Y, et al. Dynamics and composition of soil organic carbon in response to 15 years of straw return in a Mollisol[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 215: 105221.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 马红亮, 朱建国, 谢祖彬. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对植物—土壤系统地下过程影响的研究[J]. 土壤, 2003, 35(6): 465-472.
- [23] 苑学霞, 林先贵, 褚海燕, 等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对几种土壤微生物学特征的影响[J]. 中国环境科学, 2006, 26(1): 25-29.
- [24] 王炳坤, 郭立伟, 王刚, 等. 秸秆降解菌筛选及其应用研究进展[J]. 分子植物育种, 2024, 22(21): 7194-7205.
- [25] Jing X D, Chai X H, Long S Q, et al. Urea/sodium hydroxide pretreatments enhance decomposition of maize straw in soils and sorption of straw residues toward herbicides[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 431: 128467.
- [26] Meng F Q, Dungait J A J, Xu X L, et al. Coupled incorporation of maize (*Zea mays* L.) straw with nitrogen fertilizer increased soil organic carbon in Fluvic Cambisol[J]. Geoderma, 2017, 304: 19-27.

- [27] 徐鹏, 徐晓东, 李洋, 等. 木质纤维素降解菌在秸秆堆肥中的研究现状与进展[J]. 北方园艺, 2022(8): 122–128.
- [28] 李强, 吴晓青, 张新建. 微生物降解秸秆木质素的研究进展[J]. 微生物学报, 2023, 63(11): 4118–4132.
- [29] Bradford M A, Berg B, Maynard D S, et al. Understanding the dominant controls on litter decomposition[J]. *Journal of Ecology*, 2016, 104(1): 229–238.
- [30] Duval M E, Galantini J A, Martínez J M, et al. Labile soil organic carbon for assessing soil quality: Influence of management practices and edaphic conditions[J]. *Catena*, 2018, 171: 316–326.
- [31] Oliveira M, Barré P, Trindade H, et al. Different efficiencies of grain legumes in crop rotations to improve soil aggregation and organic carbon in the short-term in a sandy Cambisol[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 186: 23–35.
- [32] Zhang Y L, Yao S H, Mao J D, et al. Chemical composition of organic matter in a deep soil changed with a positive priming effect due to glucose addition as investigated by  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 85: 137–144.
- [33] Zhao H L, Shar A G, Li S, et al. Effect of straw return mode on soil aggregation and aggregate carbon content in an annual maize-wheat double cropping system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 178–186.
- [34] Zhu L Q, Hu N J, Zhang Z W, et al. Short-term responses of soil organic carbon and carbon pool management index to different annual straw return rates in a rice-wheat cropping system[J]. *Catena*, 2015, 135: 283–289.
- [35] 张焕军, 郁红艳, 丁维新. 土壤碳水化合物的转化与累积研究进展[J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1200–1206.
- [36] 张春霞, 郝明德, 魏孝荣, 等. 黑垆土长期轮作培肥土壤有机质氧化稳定性的研究[J]. 土壤肥料, 2004(3): 10–12, 16.
- [37] Cepáková S, Frouz J. Changes in chemical composition of litter during decomposition: A review of published  $^{13}\text{C}$  NMR spectra[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2015, 15 (3): 805–815.
- [38] Heitkamp F, Wendland M, Offenberger K, et al. Implications of input estimation, residue quality and carbon saturation on the predictive power of the Rothamsted Carbon Model[J]. *Geoderma*, 2012, 170: 168–175.
- [39] Ono K, Hirai K, Morita S, et al. Organic carbon accumulation processes on a forest floor during an early humification stage in a temperate deciduous forest in Japan: Evaluations of chemical compositional changes by  $^{13}\text{C}$  NMR and their decomposition rates from litterbag experiment[J]. *Geoderma*, 2009, 151(3/4): 351–356.
- [40] 张继宏, 谭世文, 刘晓砚, 等. 不同肥力土壤有机质氧化稳定性和有机磷组分的研究[J]. 土壤通报, 1988, 19(2): 60–62.
- [41] 吕殿青, 张树兰, 杨学云. 外加碳、氮对土壤氮矿化、固定与激发效应的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 223–229.
- [42] 于水强, 窦森, 张晋京, 等. 不同氧气浓度对玉米秸秆分解期间腐殖物质形成的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2005, 27(5): 528–533.

(责任编辑: 王方方)