

DOI: 10.11766/trxb201810210315

植物秸秆腐解特性与微生物群落变化的响应*

张红 曹莹菲 徐温新 吕家珑[†]

(西北农林科技大学资源环境学院、农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要 采用网袋法探讨不同新鲜秸秆在农田土壤的腐解特征, 结合 Biolog 微平板技术, 对不同秸秆处理中土壤微生物群落多样性进行了研究。结果表明, 随着腐解时间的增加, 新鲜秸秆的残留率波动不大, 秸秆的腐解速度为玉米秸秆大于大豆秸秆。整个腐解时期, 不同秸秆处理中土壤微生物群落的平均颜色变化率 AWCD 值由高到低依次为 FCN (新鲜玉米秸秆+氮)、FC (新鲜玉米秸秆)、FB (新鲜大豆秸秆), 说明玉米不同秸秆处理中土壤微生物群落的密度大、稳定性好, 大豆秸秆处理中土壤微生物群落相对密度小, 稳定性差, 3 种不同秸秆处理中土壤微生物的 AWCD 值之间没有显著差异 ($P>0.05$), 但不同秸秆类型与腐解时间的交互作用之间的差异达到极显著水平 ($P<0.01$)。3 种不同秸秆处理中土壤微生物的优势种群主要以糖类和多聚物为主, 在腐解中后期难分解物质逐渐累积, 均表现为对芳香化合物的利用最弱。3 种秸秆的腐解残留率与土壤 pH、有机质、碱解氮、速效钾、土壤温度、氨基酸、多胺类的碳源利用方面影响较大, 土壤含水量和秸秆含水量的高低在一定程度上影响不同秸秆的腐解残留率。

关键词 农田; 长期试验; 秸秆腐解; Biolog 法; 微生物群落

中图分类号 S154.4 **文献标识码** A

农作物秸秆是宝贵的自然资源, 它含有大量有机质及植物生长所必需的氮、磷、钾和其他中微量元素。秸秆还田是发展有机可持续农业的有效途径, 对于促进作物生长、改善和提高土壤质量具有重要作用^[1-4]。作物秸秆在土壤中的腐解是一个复杂的变化过程, 其转化速率不仅与秸秆本身的物质构成有关, 还与温度、水分、土壤性状等环境条件有关, 因此, 研究和分析不同环境条件对农业资源合理利用十分重要^[5-6]。

微生物是地球化学循环中的重要组成部分, 在秸秆腐解过程中发挥着很重要的作用, 不同秸秆的性质和环境因素会导致微生物群落多样性的差异^[7-9]。目

前, 植物残体腐解过程中关于养分与能量的动态研究以及不同气候、水热条件、施肥方式对土壤微生物群落代谢特征的影响比较多。秸秆进入土壤在腐解早中期分解有机酸影响其分解率, 热重曲线和土壤温度、水分状况也与作物秸秆种类和腐解时期有关^[10]; 大气 CO₂ 浓度和升温程度可以通过植物根系分泌物和根际沉积物影响微生物的生长环境, 改变土壤微生物群落的结构和功能^[11]; 不同施肥种类、施肥方式和土壤性质能影响土壤微生物功能多样性, 改善土壤的微生态环境^[12]。而关于农田土壤不同秸秆在分解期间其腐解特征与微生物群落多样性的响应机制却鲜见报道。本试验利用网袋法与

* “十三五”科技部重点专项 (2017YFD0200200)、陕西省科技统筹创新工程计划项目 (2016KTZDNY03-01) 与陕西省水利厅科技项目 (2016slkj-15) 共同资助 Supported by Key Project of the Ministry of Science and Technology during the 13th Five-Year Plan (No. 2017YFD0200200), the Shaanxi Province Innovative Engineering Project (No. 2016KTZDNY03-01), and the Shaanxi Provincial Water Resources Department Science and Technology Project (No. 2016slkj-15)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: ljll@nwsuaf.edu.cn

作者简介: 张红 (1981—), 女, 陕西韩城人, 博士, 高级实验师, 主要从事土壤化学与环境化学研究。E-mail: zhanghong628@nwsuaf.edu.cn

收稿日期: 2018-10-21; 收到修改稿日期: 2018-12-17; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-03-26

Biolog 分析研究同一环境下不同秸秆在腐解过程的微生物群落多样性变化, 可为秸秆生物质能源发挥最大效益研究奠定基础, 并为长期试验地土壤中有有机碳转化和科学养地用地研究提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究在位于黄土高原南部的陕西省杨凌示范区五泉镇 (34°17'51"N, 108°00'48"E) 的国家黄土肥力与肥料效益野外科学观测站进行, 该区为渭河三级阶地, 属暖温带半湿润易旱气候区, 海拔 524.7m, 年均气温 13℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 4196℃, 年均降水量 550~600mm, 主要集中在 7—9 三个月, 年均蒸发量 993mm, 无霜期 184~216d。种植方式为冬小麦-夏玉米轮作, 一年两熟。

1.2 供试材料

供试土壤为瘠土 (土垫旱耕人为土)。试验前土壤样地 (0~20 cm) 的基本理化性质为: pH8.17, 有机质 32.25g·kg⁻¹, 碱解氮 141.6 mg·kg⁻¹, 有效磷 37.8 mg·kg⁻¹, 速效钾 145.8 mg·kg⁻¹, 土壤含水量 20.7g·kg⁻¹。

供试植物秸秆为玉米和大豆秸秆, 其中玉米秸秆原样的全碳 402.5 g·kg⁻¹, 全氮 11.31 g·kg⁻¹, C/N35.59; 大豆秸秆原样的全碳 373.2 g·kg⁻¹, 全氮 25.47g·kg⁻¹, C/N14.65。

1.3 试验设计

选用新鲜的玉米秸秆和大豆秸秆, 采用尼龙网袋法在室外农田土壤中进行植物腐解试验。由于新鲜秸秆水分较多, 所以实验室内快速将秸秆处理为 1~2 cm 大小, 在冰箱 4℃ 冷藏保鲜备用。

由于玉米秸秆的 C/N 远高于微生物腐解的最佳 C/N25 : 1, 为加速腐解进程, 玉米秸秆另设计加氮处理, 因此本试验共设新鲜豆秸 (FB)、新鲜玉米秸 (FC)、新鲜玉米秸+氮 (FCN) 3 个处理。具体操作步骤为: 分别称取不同处理的秸秆残体 (30 g·袋⁻¹) 装入 350 目的尼龙网袋中, 加氮处理添加尿素 10.34 g·kg⁻¹, 封口, 于 2011 年 10 月 31 日埋入农田土壤 20cm 深处, 同时在 20 cm 深处埋入土壤温度记录仪 (美国 TidbiT v2)。埋入后 10、20、30、45、60、90、120、150、180、210、240、270、300、330、

360 d 采样。每个处理每次取 6 袋, 装入自封袋后迅速带回实验室冰箱 4℃ 冷藏, 部分样品用来测定不同秸秆腐解样品的质量和含水量, 为了避免灌溉和降雨对秸秆腐解过程中质量的影响, 将取回的样品放在烘箱中烘至恒重计算秸秆的腐解残留率; 另一部分样品采用 Biolog-Eco 分析方法测定微生物群落多样性变化。

1.4 土壤与植物样品分析方法

土壤含水量用烘箱干燥法测定, pH 采用 320 型 pH 计测定 (水土比 2.5 : 1), 有机质采用重铬酸钾外加热法测定, 碱解氮采用硼酸扩散吸收法测定, 有效磷采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定, 速效钾采用 1.0 mol·L⁻¹ 乙酸铵-浸提火焰光度法测定。植物秸秆全碳采用重铬酸钾外加热法测定, 全氮采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法测定^[13]。

秸秆残体微生物群落功能多样性具体方法: 称取相当于 0.10 g 干土重的新鲜秸秆样品, 加入到 49.9 mL 0.85% (w/v) 的灭菌 NaCl 溶液中, 振荡 30 min 后取出以 4000 r·min⁻¹ 的速度离心 1 min, 吸取 1 mL 上悬液, 用灭菌的 0.85% NaCl 溶液稀释 10 倍, 吸取稀释液接种到 ECO 板, 每孔接种量 150 μL。将接种后的 ECO 板 25℃ 培养, 每隔 24 h 时在 590 nm 波长下测定吸光度 (OD) 值, 持续 6 d^[7, 14]。参照 Qian 等^[15]的方法计算平均颜色变化率 (AWCD) 和多样性指数, 根据贾夏等^[16]的研究结果, 选取 144h 的数据进行分析和多样性指数的计算。

1.5 数据处理

$$\text{秸秆腐解残留率} (\%) = X_t / X_0 \times 100\%$$

式中, X_0 为秸秆腐解前的初始质量, X_t 为分解 t 时的秸秆腐解后剩余质量。

根据 Biolog 的分析结果, 采用孔的平均颜色变化率 AWCD 测定微生物利用单一碳源的能力。AWCD = $\Sigma (C_i - R) / 31$, 其中 C_i 为 31 种碳源在 590 nm 的吸收值; R 为 Eco 板对照孔的吸收值, 物种丰富度香农指数 (H)、优势度辛普森指数 (D) 和群落均匀度 McIntosh 指数 (E) 均采用 144h 的测定值计算^[15, 17]。

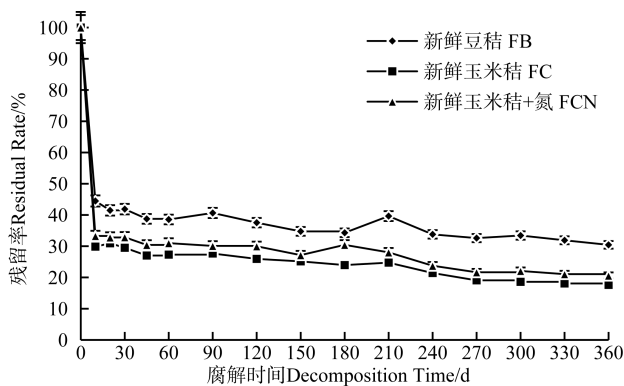
测定数据采用 Microsoft Excel 2013 进行处理和制图, 采用 SPSS 17.0 软件进行主成分分析和方差分析。

2 结果

2.1 不同腐解期不同秸秆的残留率变化

由图 1 可知,新鲜秸秆在整个腐解期的腐解残留率分为 2 个阶段:0~10d 迅速下降,10~360d 缓慢下降。FB、FC、FCN 处理的腐解残留率在 0~10d 从初始的 100% 分别下降至 44.48%、29.86% 和 33.27%,而在 10~360d 呈缓慢降低趋势,360d 时分别降至原来的 30.43%、17.61% 和 20.58%。

总体而言,随着腐解时间的增加,不同秸秆腐解残留率变化的主要趋势为 FB>FCN>FC,说明 C/N 低的新鲜秸秆腐解速度较慢,C/N 高的新鲜秸秆相对腐解速度快,残留率低。



注:FB:新鲜豆秸;FC:新鲜玉米秸;FCN:新鲜玉米秸+氮 Note: FB, Fresh bean straw; FC, Fresh corn straw; FCN, Fresh corn straw + nitrogen fertilizer

图 1 农田不同腐解期残留率的变化

Fig. 1 Straws residual rates in farmland relative to decomposition stage

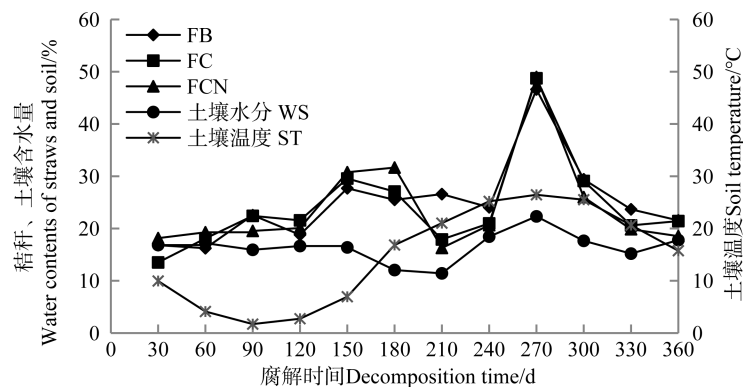


图 2 农田不同腐解期不同秸秆含水量及土壤含水量、土壤温度的变化

Fig. 2 Variation of straw water content, soil water content and soil temperature with type of the straw and decomposition stage in farmland

2.2 不同腐解期不同秸秆含水量及土壤温度、土壤含水量的变化

水分状况影响土壤的物理化学性质,其差异导致残体分解率不同^[18]。大多数土壤微生物活动的最适温度在 25~35℃,因此在热带地区残体降解速率和养分转化较快^[19]。温度、水分是影响植物残体矿化的重要环境因子,同时又有一定的互作效应^[20-21]。

由图 2 可以看出,整个腐解期间,土壤温度(ST)呈倒“S”变化,土壤含水量(WS)在腐解前期 0~150d 变化不大,腐解中后期 150~360d 波动变化,3 种秸秆的含水量在 0~150d 上升,150~210d 下降,210~270d 急剧上升,270~360d 下降。直到腐解结束,农田土壤含水量较埋入初期高出 105.6%,而土壤中 FB、FC 和 FCN 处理的最终含水量分别较埋入初期高出 119.9%、123.2% 和 111.2%,且整个腐解期土壤含水量相比秸秆含水量波动变化较小。土壤温度的变化随季节温度的变化而变化,而秸秆含水量的高低则与土壤含水量和季节降雨量有关。这可能是由于新鲜秸秆埋在 20cm 深处,秸秆本身的含水量损失较小,在高温雨季时更容易增加秸秆含水量。而随着温度和水分的降低,降解速率也随之减小。新鲜秸秆的含水量较高,容易抑制微生物活性,导致秸秆腐解速率减慢。

2.3 不同秸秆处理对微生物平均颜色变化率 AWCD 的影响

Biolog-Eco 板是基于氧化还原反应的一种研究环境微生物群落代谢功能的载体^[22],其每孔的平均颜色变化率(AWCD)表征微生物群落碳源利用率,

反映了微生物活性及群落生理功能多样性^[16]，是土壤微生物群落利用单一碳源能力的一个重要指标，反映了土壤微生物活性、微生物群落生理功能多样性^[23]。值越大表明微生物的活性越高，密度越大。

根据贾夏等^[24]的结果，本研究均采用培养 144h 的数据来进行分析微生物群落多样性的变化(图 3)。可以看出，3 个秸秆处理土壤微生物群落代谢的 AWCD 值随培养时间的延长呈现波动变化，尤其在 240~300d 之间随着土壤温度和秸秆含水量的剧烈变化，FB 和 FC 处理土壤微生物群落代谢的 AWCD 值明显较 FCN 处理的波动剧烈，这可能是因为 FCN 处理是加氮处理后的玉米秸秆，在高温、高湿环境中干扰了微生物对其碳源利用能力。农田土壤微生物的 AWCD 值在腐解初期 0~60d 相对较低，随着腐解时间的延长呈上下波动变化。整体而言，FB 处理

土壤微生物群落代谢的 AWCD 值波动幅度最大，说明 FB 处理土壤微生物活性低、密度小，其次为 FCN 和 FC 处理，农田土壤微生物在腐解前期活性低、密度小，随着腐解时间的延长土壤微生物活性升高，表现的越来越稳定。整个腐解期，3 种秸秆处理随着腐解时间的延长 AWCD 值不断波动变化，最终均有所降低，至腐解试验结束，FB、FC 和 FCN 处理土壤微生物群落代谢的 AWCD 值分别降至原来的 89.84%、95.88%和 98.95%，农田土壤的 AWCD 值增至初始值的 103.8%。方差分析发现，3 种不同秸秆处理中土壤微生物的 AWCD 值均没有显著差异 ($P>0.05$)，而在不同腐解时间差异达到极显著水平 ($P<0.01$)，且秸秆类型与不同腐解时间的交互作用也达到极显著水平 ($P<0.01$)；农田土壤微生物群落代谢的 AWCD 值在不同腐解时间差异达到极显著水平 ($P<0.01$)^[25]。

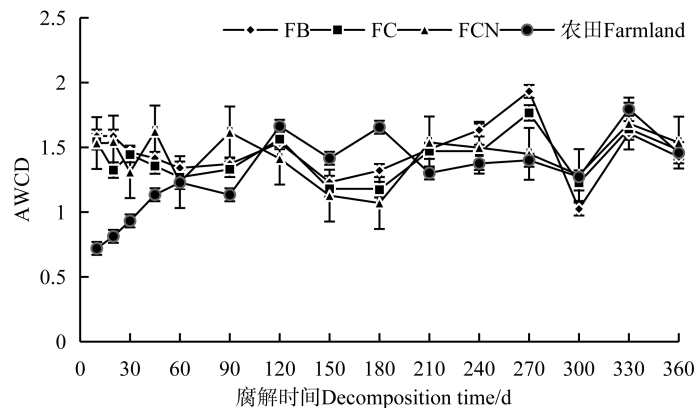


图 3 农田土壤及不同秸秆在平均颜色变化率 (AWCD) 随腐解时间的变化

Fig. 3 Temporal variation of average well color development (AWCD) of the microbial community with the farmland soil and the type of the straw in different decomposition stage

2.4 不同秸秆腐解过程中微生物对 6 类碳源的利用率

表征微生物活性的 AWCD 值和微生物功能多样性指数仅能反映土壤微生物的总体变化情况，并不能反映微生物群落代谢的详细信息。微生物对不同碳源的利用可以反映微生物的代谢功能类群。为便于比较不同秸秆处理在整个腐解期中微生物对 6 类碳源的利用率情况，本研究选用秸秆腐解 10、90、180、270、360d 的结果来探讨土壤微生物对六大类碳源利用的变化趋势。由表 1 可以看出，FB、FC、FCN 处理的土壤微生物群落在腐解前后对芳香化合物的利用差异均不显著，此外，FCN 处理的土壤微生物群落在腐解前后对多胺的利用差异不显著之

外，对其他 4 种碳源利用差异显著，且 FB、FC 处理的土壤微生物群落在腐解前后对氨基酸、羧酸、糖类、多胺以及多聚物类的利用差异达到极显著水平。直至腐解结束，FB、FC、FCN 处理土壤微生物群落对氨基酸的利用分别增至原来的 348.9%、368.1%、367.4%，对羧酸的利用分别增至 297.9%、340.9%、229.3%，对糖类的利用分别增至 244.4%、288.1%、198.5%，对多胺的利用分别增至 333.3%、351.3%、156.5%，对多聚物的利用分别增至 181.9%、276.6%、195.8%，对芳香化合物的利用则分别变成原来的 144.7%、90.00%、70.45%。根据 3 种秸秆处理对 6 类碳源的利用情况可以看出，FB 处理土壤微生物群落的优势种群为多聚物和糖类代谢群，FC 处

表 1 农田土壤腐解过程中不同秸秆处理土壤微生物对六大类碳源的利用 (144 h)

Table 1 Utilization of six categories of carbon sources by the strains of microbe in type of the straws and decomposition stage in farmland soil (144 h)

秸秆类型	腐解时间	氨基酸类	羧酸类	糖类	多胺类	多聚物类	芳香化合物类
Straw type	Decomposition time/d	Amino acid	Carboxylic acid	Saccharides	Polyamine	Polymer	Aromatic compound
FB	10	0.47e	0.48d	0.72d	0.39d	0.83c	0.38c
	90	1.22d	1.16c	1.61b	0.79c	1.76ab	1.19ab
	180	1.31cd	1.17c	1.59bc	0.79c	1.37b	0.97abc
	270	2.29a	1.66a	1.94a	2.31a	1.98a	1.25a
	360	1.64b	1.43b	1.76ab	1.30b	1.51b	0.55bc
FC	10	0.47d	0.48d	0.72d	0.39d	0.83d	0.38d
	90	1.22c	1.16c	1.61b	0.79c	1.76ab	1.19b
	180	1.31c	1.17c	1.59bc	0.79c	1.37c	0.97bc
	270	2.29a	1.66a	1.94a	2.31a	1.98a	1.25a
	360	1.64b	1.43b	1.76ab	1.30b	1.51b	0.55cd
FCN	10	0.43d	0.41c	0.65d	0.46d	0.72c	0.44c
	90	1.47ab	1.35a	1.79a	1.40a	1.95a	1.68a
	180	0.97c	0.80b	1.42bc	0.56d	1.27b	0.67bc
	270	1.58a	1.34a	1.67a	1.27ab	1.47ab	0.47c
	360	1.58a	0.94b	1.29c	0.72cd	1.41ab	0.31c

注: 同列不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Note: Different letters in the same column mean significant difference between treatments at $P < 0.05$ of Duncan's test

理土壤微生物群落的优势种群为糖类代谢群, FCN 处理和农田土壤微生物群落的优势种群均为糖类和多聚物代谢群。

2.5 不同秸秆处理土壤微生物群落多样性指数

由表 2 可以看出, 3 种不同秸秆处理中土壤微生物的 H 值 (丰富度) 在腐解前后波动较大, 除了 FCN 处理的 H 值在腐解前后差异显著之外, FB 和 FC 处理的 H 值均在腐解前后差异不大。直至腐解结束, FB、FC、FCN 处理土壤微生物群落的 H 值分别下降至初始值 (10d) 的 99.44%、99.16% 和 95.84%。根据方差分析的结果得出, 3 种不同秸秆处理中土壤微生物群落的丰富度在腐解前后差异显著, 其中 FB 处理 (平均值 3.62)、FC 处理 (平均值 3.58) 之间差异不显著, FCN 处理 (平均值 3.53) 与 FB、FC 处理之间差异均显著。农田土壤中不同秸秆处理中土壤微生物群落的丰富度顺序为 FB > FC > FCN。

3 种不同秸秆处理中土壤微生物的 D 值 (优势度) 变化较小, 基本上在 0.95~0.96 之间。根据方差分析的结果, 除 FCN 处理的 D 值在腐解前后差异比

较显著外, FB、FC 处理的 D 值均在腐解前后差异不大, 说明随着 3 种秸秆随着腐解时间的延长土壤微生物群落的优势度变化不明显。

3 种不同秸秆处理中土壤微生物群落的 E 值 (均匀度) 与 H 值的变化比较相似。直至腐解结束, FB、FC、FCN 处理微生物群落的均匀度分别下降到初始阶段 (10d) 的 98.13%、95.37% 和 94.50%。说明不同秸秆处理中土壤微生物群落的均匀度也在降低, 除了 FCN 处理的 E 值在腐解前后差异显著之外, FB 和 FC 处理的 E 值也在腐解前后差异不大。其中 FB 处理 (平均值 1.07)、FCN 处理 (平均值 1.05) 之间差异显著, FC 处理 (平均值 1.06) 与 FB、FCN 处理之间差异均不显著。农田土壤中不同秸秆处理中土壤微生物群落的均匀度顺序为 FB > FC > FCN。

2.6 土壤性质及不同秸秆处理中土壤微生物群落多样性与秸秆残留率的关系

相关分析表明 (表 3), 3 种秸秆的腐解残留率与土壤 pH、有机质、碱解氮含量呈显著正相关关系, 与土壤速效钾、土壤温度、氨基酸、多胺呈极显著

负相关关系, 此外 FCN 处理的腐解残留率还与土壤含水量、AWCD 值呈显著负相关关系, 与不同秸秆处理中土壤微生物群落的丰富度和均匀度呈极显著相关关系。

表 2 农田土壤不同秸秆处理中土壤微生物群落功能多样性指数 (144h)

Table 2 Richness, dominance and evenness indices of the straw microbial community for farmland soil relative to type of the straw returned (144 h)

腐解时间 Decomposition time/d	FB			FC			FCN		
	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
10	3.60a	0.96ab	1.07a	3.56a	0.96b	1.08a	3.61ab	0.96ab	1.09a
90	3.62a	0.96ab	1.07a	3.49ab	0.96ab	1.03ab	3.57ab	0.96a	1.04ab
180	3.57a	0.96ab	1.05ab	3.64a	0.96bc	1.09a	3.65a	0.96abc	1.08a
270	3.37b	0.96a	1.00c	3.43b	0.96a	1.00b	3.32c	0.96ab	0.99c
360	3.58a	0.96ab	1.05ab	3.53ab	0.96ab	1.03b	3.46c	0.96d	1.03bc

注: *H*, 香农指数; *D*, 辛普森指数; *E*, McIntosh 指数。同一列中无相同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Note: *H*, Shannon index; *D*, Simpson index; *E*, McIntosh index. Different letters in the same column mean significant difference between treatments at 0.05 level of Duncan's test

表 3 土壤性质及不同秸秆处理中土壤微生物多样性与不同秸秆腐解残留率的相关性

Table 3 Relationships of soil properties and straw microbial diversity with straw residual rate relative to type of the straw

项目 Item	腐解残留率 Residual rate			项目 Item	腐解残留率 Residual rate		
	FB	FC	FCN		FB	FC	FCN
pH	0.43*	0.57**	0.62**	糖类 Saccharide	-0.08	-0.12	-0.13
土壤有机质 OM	0.74**	0.81**	0.86**	氨基酸 Amino acid	-0.54**	-0.66**	-0.68**
碱解氮 Alkalyic N	0.45*	0.61**	0.67**	羧酸 Carboxylic acid	-0.22	-0.26	-0.28
有效磷 Available P	-0.17	-0.02	0.02	多聚物 Polymer	0.29	0.36	0.26
速效钾 Readily available K	-0.79**	-0.85**	-0.88**	芳香化合物 Aromatic compound	0.36	0.41	0.34
土壤温度 Soil temperature	-0.59**	-0.76**	-0.71**	多胺 Polyamine	-0.55**	-0.68**	-0.71**
秸秆含水量 Water content of straw	-0.54**	-0.54**	-0.40	香农指数 <i>H</i> Shannon index	-0.03	0.05	0.63**
土壤含水量 Soil moisture content	-0.33	-0.32	-0.44*	辛普森指数 <i>D</i> Simpson index	-0.02	-0.04	0.27
AWCD	-0.14	-0.37	-0.43*	McIntosh 指数 <i>E</i> McIntosh index	-0.07	-0.01	0.63**

注: *和**分别表示在 5%和 1%的水平显著的相关性 Note: * and ** indicate significant correlation at the 5% and 1% levels, respectively

这说明不同秸秆的腐解残留率与不同秸秆处理中土壤微生物群落多样性之间的关系不完全一样,3种秸秆的腐解残留率对土壤有效磷及不同秸秆处理中土壤微生物群落的糖类、羧酸、多聚物、芳香化合物的利用以及微生物群落的优势度无任何相关关系,而对土壤 pH、有机质、碱解氮、速效钾、土壤温度、氨基酸和多胺类的碳源利用方面影响较大。C/N 比适中的 FCN 处理较 FB、FC 处理受到的影响因素更多。

3 讨 论

3.1 秸秆 C/N 比对植物残体腐解的影响

秸秆腐解的快慢与其自身的物质条件和所处的环境因素有关。有研究表明,有机物料的 C/N 是控制有机物料腐解和养分释放的重要因素,秸秆 C/N 控制了氮素在土壤中的释放量,影响微生物活性的高低^[26-27]。本研究中 3 种新鲜秸秆在相同的土壤环境中进行腐解试验,其 C/N 的大小顺序为 FC>FCN>FB,而 3 种秸秆的腐解速度为 FC>FCN>FB,说明玉米秸秆较大豆秸秆更容易腐解,这可能是因为长期试验站的土壤 C/N 在 8.3 左右,玉米秸秆较大豆秸秆更容易争夺土壤中的氮素,使附着在秸秆的微生物加快秸秆的腐解速度。FCN 处理加氮处理后,C/N 适合微生物活动的最佳比例,虽然体积比较大,比表面积小,与微生物接触少,影响微生物的分解能力,但这种秸秆会在腐解中后期加快分解,与 FB、FC 处理之间的差异逐渐拉开,这与王晓玥等^[7]的研究结果是一致的。此外,FCN 处理添加尿素作为微生物的氮源物质,在腐解过程中,可以增加秸秆周围微生物的数量,快速增长微生物群落,提高微生物功能的多样性,这与 Hoyle 等^[28]研究结果相似。FB 处理由于 C/N 比较低,在腐解过程中,自身的氮素可能受到水分的限制释放速度较慢,需要通过尼龙网袋让外界土壤微生物平衡适应到一定程度,刺激腐解微生物对秸秆的分解速度。因此,FB 处理在整个腐解期的腐解残留率最高。

3.2 土壤温度、土壤含水量和秸秆含水量对植物残体腐解的影响

Avrahami 等^[29]研究发现微生物群落功能多样性受土壤温湿度的影响,主要表现在影响土壤中一

些微生物群落的生长繁殖和生理机能,以及可溶性有机物的含量,秸秆分解速度的快慢,直接造成底物供给差异,导致微生物群落活性和功能不同^[30]。土壤温度明显影响 3 种秸秆腐解残留率,土壤含水量仅对 FCN 处理的腐解残留率有影响,而 FB、FC 处理的含水量影响其自身的腐解残留率,说明秸秆含水量高并不一定能加快腐解速度,这可能是因为新鲜秸秆质量大,分解需要更多的能量,同时其体积较大,比表面积小,降低了微生物对秸秆的分解作用,所以整个腐解期残留率变化不大,这与 Ibrahim 等^[31]的研究是一致的。本研究中在秸秆腐解 270 d 时,秸秆含水量随着降雨量增加导致土壤含水量达到最大值,秸秆腐解微生物功能多样性指数随着土壤温度升高而降低,秸秆腐解微生物的 AWCD 值和对六大类碳源的利用相对整个腐解期较高,随着腐解时间的延长,土壤温度、土壤含水量以及秸秆含水量的变化对土壤微生物群落的影响呈波动变化,与周桂香等^[32]的研究不太一致。这可能是因为大田试验受到的影响因素更多导致的,在高温高湿环境下,土壤微生物活性较强,秸秆中的养分本应相对释放较快,但是秸秆含水量较高,导致 O₂ 不足,不利于土壤与秸秆间可溶性物质的扩散和迁移,影响土壤中好氧微生物对秸秆的分解。

3.3 不同秸秆处理中土壤微生物群落对植物残体腐解的影响

随着腐解时间的增加,易腐解的物质不断减少,难分解的复杂化合物逐渐积累。利用 Biolog 法测定微生物活性时发现,秸秆在水热条件好的地区经过分解后其微生物活性不断降低,导致 AWCD 值表现出随水热条件增加而降低的趋势^[7]。Kemmitt^[33]以及 Fierer^[34]等发现碳中残留的复杂化合物的分解不是由微生物驱动的,而是在长期分解的过程之后,微生物碳源代谢活性随着水热条件增加而降低的趋势逐渐减弱,这与本研究的研究结果是一致的。

通过研究发现,3 种秸秆中只有 FCN 处理随腐解时间的延长,整体 AWCD 值变化不大,说明 FCN 处理的土壤微生物活性相对比较稳定,而 FB 和 FC 处理在不同时期下降的程度略有不同。3 种不同秸秆处理中土壤微生物群落的优势种群主要为糖类和多聚物类代谢群,糖类物质组分容易分解,在被微生物分解利用的同时又可以作为次生代谢物产生^[2]。研

究发现, 微生物群落的优势种群以多聚物类代谢群为主, 容易降低微生物群落结构的稳定性^[35], 从而导致腐解残留率增加, 微生物群落的优势种群以糖类和氨基酸类代谢群为主, 土壤微生物可以利用的碳源则趋于稳定^[36], 因此 FC、FCN 处理比 FB 处理的腐解速度要快, 这与本研究中不同秸秆腐解残留率变化的主要趋势一致。不同秸秆中最弱碳代谢群落均为芳香化合物代谢群, 且芳香化合物不易分解, 这与张海涵等^[37]的实验结果一致。整个研究结果说明糖类和多聚物类代谢群是这 3 种不同秸秆处理中土壤微生物群落变化的敏感碳源, 与王静娅等^[38]的实验结果相同。随着腐解时间的延长, 不同秸秆处理中土壤微生物群落的丰富度最终降低, 且不同秸秆处理中土壤微生物群落的均匀度随之下降。Kunito 和 Nagaoka^[39]指出秸秆类型对微生物群落功能多样性有显著影响, 与本研究结论一致。综上所述, 多聚物类代谢群成为制约秸秆腐解残留率的关键组分, 如何在秸秆还田中进行有效处理, 达到资源充分利用值得考虑。

Biolog 技术可以快速测定不同秸秆处理中土壤微生物群落的功能多样性, 只能对不同秸秆处理中土壤微生物群落活性与功能进行分析, 不能全面反映不同秸秆处理中土壤微生物群落的多样性。因此, 结合其他先进技术手段, 才能更全面认识到秸秆在腐解过程中微生物群落结构和功能的多样性, 从而为秸秆有效还田研究奠定基础, 实现科学养地用地提供更有力的依据。

4 结 论

新鲜秸秆腐解速度为玉米秸秆大于大豆秸秆。土壤 pH、有机质、碱解氮、速效钾、土壤温度、氨基酸和多胺类的碳源利用方面对秸秆腐解残留率的影响比较大, 土壤含水量和秸秆含水量的高低在一定程度上影响不同秸秆的腐解残留率。在腐解过程中 3 种不同秸秆处理中土壤微生物的优势种群主要以糖类和多聚物为主, 且随着芳香化合物在腐解中后期逐渐累积, 基本上表现为对芳香化合物的利用最弱。随着腐解时间的延长, 3 种不同秸秆处理中土壤微生物群落稳定性逐渐发生变化。尤其在腐解中后期高温高湿环境下, 不同秸秆处理中土壤微生物群落之间的差异越来越明显。在腐解结束时, 加

氮的 FCN 处理土壤微生物群落差异明显大于不加任何处理的秸秆。秸秆还田时, 调整秸秆适宜的 C/N, 筛选降解多聚物类代谢群的微生物菌剂, 可以促进秸秆的分解效果, 提高秸秆还田的利用率。

参 考 文 献

- [1] 伍玉鹏, 彭其安, Muhammad Shaaban, 等. 秸秆还田对土壤微生物影响的研究进展. 中国农学通报, 2014, 30 (29): 175—183
Wu Y P, Peng Q A, Muhammad S, et al. Research progress of effect of straw returning on soil microorganism (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin. 2014, 30 (29): 175—183
- [2] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响. 土壤学报, 2003, 40(4): 618—623
Lao X R, Sun W H, Wang Z, et al. Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(4): 618—623
- [3] Witt C, Cassman KG, Olk DC, et al. Crop rotation and residue management effects on carbon sequestration, nitrogen cycling and productivity of irrigated rice systems. Plant and Soil, 2000, 225 (1): 263—278
- [4] 宋莉, 韩上, 鲁剑巍, 等. 油菜秸秆、紫云英绿肥及其不同比例配施还田的腐解及养分释放规律研究. 中国土壤与肥料, 2015 (3): 100—104
Song L, Han S, Lu J W, et al. Study on characteristics of decomposing and nutrients releasing of differentproportional mixture of rape straw and Chinese milk vetch in rice field (In Chinese). Soils and Fertilizers Sciences in China, 2015 (3): 100—104
- [5] 王旭东, 陈鲜妮, 王彩霞, 等. 农田不同肥力条件下玉米秸秆腐解效果. 农业工程学报, 2009, 25 (10): 252—257
Wang X D, Chen X N, Wang C X, et al. Decomposition of corn stalk in cropland with different fertility (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25 (10): 252—257
- [6] 韩锦泽, 匡恩俊, 迟凤琴, 等. 秸秆深还田对土壤微生物特征及其影响因素的研究. 土壤通报, 2016, 47(5): 1154—1161
Han J Z, Kuang E J, Chi F Q, et al. Effects of different depths of straw returned to soil on biological characteristics (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47 (5): 1154—1161
- [7] 王晓玥, 蒋瑞霖, 隋跃宇, 等. 田间条件下小麦和玉米秸秆腐解过程中微生物群落的变化—BIOLÓG 分析. 土壤学报, 2012, 49 (5): 1003—1011
Wang X Y, Jiang Y J, Sui Y Y, et al. Changes of microbial communities during decomposition of wheat and maize straw: Analysis by BIOLÓG (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2012, 49 (5): 1003—1011

- [8] Merilä P, Malmivaara-Lämsä M, Spetz P, et al. Soil organic matter quality as a link between microbial community structure and vegetation composition along a successional gradient in a boreal forest. *Applied Soil Ecology*, 2010, 46 (2): 259—267
- [9] Feng X, Simpson M J. Temperature and substrate controls on microbial phospholipid fatty acid composition during incubation of grassland soils contrasting in organic matter quality. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41 (4): 804—812
- [10] Cao Y F, Zhang H, Liu K, et al. Organic acids variation in plant residues and soils among agricultural treatments. *Agronomy Journal*, 2015, 107 (6): 2171—2180
- [11] Liu Y, Li M, Zheng J, et al. Short-term responses of microbial community and functioning to experimental CO₂ enrichment and warming in a Chinese paddy field. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 77: 58—68
- [12] Chen X F, Li Z P, Liu M, et al. Microbial community and functional diversity associated with different aggregate fractions of a paddy soil fertilized with organic manure and/or NPK fertilizer for 20 years. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15 (2): 292—301
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2007: 30—113
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). 3rd ed. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2007: 30—113
- [14] Garland J L, Mills A L. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbon-source utilization. *Applied and Environmental Microbiology*, 1991, 57 (8): 2351—2359
- [15] Qian X, Gu J, Sun W, et al. Changes in the soil nutrient levels, enzyme activities, microbial community function, and structure during apple orchard maturation. *Applied Soil Ecology*, 2014, 77: 18—25
- [16] 贾夏, 董岁明, 周春娟. 土壤低含量铅时冬小麦幼苗根际微生物群落的变化. *农业机械学报*, 2013, 44 (2): 103—108, 141
Jia X, Dong S M, Zhou C J. Changes of microbial communities in rhizosphere of winter wheat seedlings under low lead content (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2013, 44 (2): 103—108, 141
- [17] Liu W, Pan N, Chen W. Effect of veterinary oxytetracycline on functional diversity of soil microbial community. *Plant, Soil and Environment*, 2012, 58: 295—301
- [18] 张薇, 王子芳, 王辉, 等. 土壤水分和植物残体对紫色水稻土有机碳矿化的影响. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13 (6): 1013—1019
Zhang W, Wang Z F, Wang H, et al. Organic carbon mineralization affected by water content and plant residues in purple paddy soil (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13 (6): 1013—1019
- [19] 丁雪丽, 何红波, 白震, 等. 作物残体去向与利用及对土壤氮素转化的影响. *土壤通报*, 2008, 39 (6): 1454—1461
Ding X L, He H B, Bai Z, et al. Fate and utilization of crop residues and their effect on soil nitrogen turnover (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39 (6): 1454—1461
- [20] Kruse J, Kisse D E, Cabrera M L. Effects of drying and rewetting on carbon and nitrogen mineralization in soils and incorporated residues. *Nutrient Cycling Agroecosystems*, 2004, 69: 247—256
- [21] Villegas P G, Blair G J, Lefroy R. Measurement of decomposition and associated nutrient release from straw (*Oryza sativa* L.) of different rice varieties using a perfusion system. *Plant and Soil*, 2000, 223: 1—11
- [22] 吴家森, 张金池, 钱进芳, 等. 生草提高山核桃林土壤有机碳含量及微生物功能多样性. *农业工程学报*, 2013, 29 (20): 111—117
Wu J S, Zhang J C, Qian J F, et al. Intercropping grasses improve soil organic carbon content and microbial community functional diversities in Chinese hickory stands (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29 (20): 111—117
- [23] Zabinski C A, Gannon J E. Effects of recreational impacts on soil microbial communities. *Environmental Management*, 1997, 21 (2): 233—238
- [24] 贾夏, 董岁明, 罗春娟. 微生物生态研究中 Biolog Eco 微平板培养时间对分析结果的影响. *应用基础与工程科学学报*, 2013, 21 (1): 10—19
Jia X, Dong S M, Luo C J. Effects of Biolog Eco-plates incubation time on analysis results in microbial ecology researches (In Chinese). *Journal of Basic Science and Engineering*, 2013, 21 (1): 10—19
- [25] Zhang H, Xu W X, Li Y B, et al. Changes of soil microbial communities during decomposition of straw residues under different land uses. *Journal of Arid Land*, 2017, 9 (5): 666—677
- [26] 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. *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 (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (5): 1206—1217
- [27] 程存刚, 赵德英, 吕德国, 等. 植物源有机物料对果园土壤微生物群落多样性的影响. *植物营养与肥料学报*,

- 2014, 20 (4): 913—922
- Cheng C G, Zhao D Y, Lü D G, et al. Effects of plant-derived organic materials and humification driving forces on soil microbial community diversity in orchards (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20 (4): 913—922
- [28] Hoyle F C, Murphy D V, Brookes P C. Microbial response to the addition of glucose in low-fertility soils. *Biology Fertility of Soils*, 2008, 44: 571—579
- [29] Avrahami S, Liesack W, Conrad R. Effects of temperature and fertilizer on activity and community structure of soil ammonia oxidizers. *Environmental Microbiology*, 2003, 5 (8): 691—705
- [30] Tian G, Badejo MA, Okoh AI, et al. Effects of residue quality and climate on plant residue decomposition and nutrient release along the transect from humid forest to Sahel of West Africa. *Biogeochemistry*, 2007, 86 (2): 217—229
- [31] Ibrahim M, Cao C G, Zhan M, et al. Changes of CO₂ emission and labile organic carbon as influenced by rice straw and different water regimes. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, 12 (1): 263—274
- [32] 周桂香, 陈林, 张丛志, 等. 温度水分对秸秆降解微生物群落功能多样性影响. *土壤*, 2015, 47 (5): 911-918
Zhou G X, Chen L, Zhang C Z, et al. Effects of temperature and moisture on microbial community function responsible for straw decomposition (In Chinese). *Soils*, 2015, 47 (5): 911—918
- [33] Kemmitt SJ, Lanyon CV, Waite IS, et al. Mineralization of native soil organic matter is not regulated by the size, activity or composition of the soil microbial biomass—A new perspective. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40 (1): 61—73
- [34] Fierer N, Schimel J, Holden P. Influence of drying-rewetting frequency on soil bacterial community structure. *Microbial Ecology*, 2003, 45 (1): 63—71
- [35] 甄丽莎, 谷洁, 胡婷, 等. 黄土高原石油污染土壤微生物群落结构及其代谢特征. *生态学报*, 2015, 35 (17): 5703—5710
Zhen L S, Gu J, Hu T, et al. Microbial community structure and metabolic characteristics of oil-contaminated soil in the Loess Plateau (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (17): 5703—5710
- [36] 唐海明, 肖小平, 李超, 等. 冬季覆盖作物秸秆还田对双季稻田根际土壤微生物群落功能多样性的影响. *生态学报*, 2018, 38 (18): 6559—6569
Tang H M, Xiao X P, Li C, et al. Effects of recycling straw of different winter covering crops on rhizospheric microbial community functional diversity in a double-cropped paddy field (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38 (18): 6559—6569
- [37] 张海涵, 唐明, 陈辉. 黄土高原典型林木根际土壤微生物群落结构与功能特征及其环境指示意义. *环境科学*, 2009, 30 (8): 2432—2437
Zhang H H, Tang M, Chen H. Characterization of soil microbial community function and structure in rhizosphere of typical tree species and the meaning for environmental indication in the Loess Plateau (In Chinese). *Environmental Science*, 2009, 30 (8): 2432—2437
- [38] 王静娅, 王明亮, 张凤华. 干旱区典型盐生植物群落下土壤微生物群落特征. *生态学报*, 2016, 36 (8): 2363—2372
Wang J Y, Wang M L, Zhang F H. Soil microbial properties under typical halophytic vegetation communities in arid regions (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (8): 2363—2372
- [39] Kunito T, Nagaoka K. Effects plant litter type and additions of nitrogen and phosphorus on bacterial community-level physiological profiles in a brown forest soil. *Microbes and Environments*, 2009, 24 (1): 68—71

Decomposition of Plant Straws and Accompanying Variation of Microbial Communities

ZHANG Hong CAO Yingfei XU Wenxin LÜ Jialong[†]

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract 【Objective】 Plant residue is an important source of soil organic matter. Returning Straw to the field is an effective way to develop sustainable organic agriculture. In this paper, characteristics of the decomposition of plant straws, soil microbial functional diversity and their relationship was studied in an attempt to lay down a scientific basis for research on transformation of organic carbon in soil and rational exploitation of land resources.

【Method】 The mesh bag method was used to explore how fresh plant straws decompose in farmland soil and the biolog plate technology was adopted to determine changes in soil microbial community relative to type of the plant straw incorporated. **【Result】** Results show that with decomposition going on, residue rate of fresh plant straws did not vary much. Corn straw decomposed faster than bean straw. In terms of mean AWCD (the average well colour development) of soil microbial communities, a declining order of FCN (Fresh corn straw + nitrogen fertilizer) > FC (Fresh corn straw) > FB (Fresh bean straw), indicating that the soil microbial community in the soil applied with corn straw was relatively high in density and stability, while that in the soil applied with bean straw was lower during the whole decomposition period. No significant difference in microbial AWCD was found between the three treatments ($P > 0.05$), but sharp differences were between treatments different in types of straw and in duration of decomposition ($P < 0.01$). Analysis of effects of microbial community structures on utilization efficiency of the six categories of carbon sources indicates that the predominant populations in the three treatments fed mainly on saccharides and polymers. When decomposition went on, hard-to-decompose substances gradually accumulated in the middle and later stages of the decomposition, showing that the populations were the weakest in utilization of aroma compounds. Polymers could reduce structure stability of the microbial community and affect residual rate of the straws under decomposition. Correlation analysis shows that decomposition residual rate was significantly related to soil pH, organic matter, alkalyic N, readily available K, soil temperature, the utilization of carbon sources, like amino acids and polyamines, and by a certain degree to soil water content and water content of straw. **【Conclusion】** FCN with a proper C/N ratio is susceptible to impact of more factors than FB and FC, when decomposing in the field. Therefore, in the practice of returning straw in the field, it is recommended to adjust C/N ratio of the straw incorporated to a proper degree and to apply microbial agents that are capable of degrading the metabolites of polymers, so as to promote decomposition of the straws incorporated and improve utilization rate of the straws returned.

Key words Farmland; Long term experiment; Straw decomposition; Biolog; Microbial community

(责任编辑: 卢 萍)