

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.01.006

黄薇, 吴凉萍, 宋路遥, 等. 配施不同腐秆剂对还稻田麦秸腐解和水稻产量的影响. 土壤, 2022, 54(1): 40–46.

配施不同腐秆剂对还稻田麦秸腐解和水稻产量的影响^①

黄薇¹, 吴凉萍¹, 宋路遥¹, 柴如山¹, 刘梦丽³, 陆银萍⁴, 曹小闯⁵, 邬刚^{2*}, 马超^{1*}

(1 安徽农业大学资源与环境学院农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室, 江淮耕地资源保护与生态修复重点实验室, 合肥 230036; 2 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230031; 3 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 4 中盐安徽红四方肥业股份有限公司, 合肥 230000; 5 水稻生物学国家重点实验室, 中国水稻研究所, 杭州 310006)

摘要: 为阐明沿淮地区秸秆还田配施不同腐秆剂在秸秆腐解和水稻产量方面的差异, 遴选出适合该区域使用的腐秆剂。本研究通过安徽省霍邱县的麦秆促腐还田定位试验, 深入分析了秸秆还田和氮磷钾优化平衡施肥后不施腐秆剂(SF)、施腐秆剂 1 号(SFD1)、施腐秆剂 2 号(SFD2)和施腐秆剂 3 号(SFD3)等处理连续两年在秸秆腐解和水稻产量等方面的差异。结果表明: ①不同处理间秸秆累积腐解率连续两年的差异均不大, 但秸秆腐解速率第一年存在较大差异, 其中 SFD2 处理的最大, 较 SF、SFD1 和 SFD3 处理分别增加了 70.6%、262.5% 和 93.3%; ②水稻产量连续两年也均以 SFD2 处理为最高, 分别为 8 592.84 kg/hm² 和 7 538.70 kg/hm², 显著高于其余腐秆剂施用处理($P < 0.05$); 相关性分析显示, 水稻产量与秸秆腐解速率之间相关性最高(第一年, $r = 0.45$; 第二年, $r = 0.48$); ③不同处理对土壤微生物量的影响在两年间均表现出显著作用, 但无明显规律可循; 偏最小二乘法回归分析显示, 两年的还田麦秸腐解速率均受土壤微生物生物量 C/N 的调控。综上, 沿淮地区麦秸促腐还稻田配施 2 号腐秆剂最利于秸秆促腐和作物增产。

关键词: 秸秆还田; 腐秆剂; 秸秆腐解; 水稻生产; 土壤微生物生物量

中图分类号: S154.3; S147.3 **文献标志码:** A

Impact of Various SDMIs on Wheat Straw Decomposition and Rice Yield

HUANG Wei¹, WU Liangping¹, SONG Luyao¹, CHAI Rushan¹, LIU Mengli³, LU Yinping⁴, CAO Xiaochuang⁵, WU Gang^{2*}, MA Chao^{1*}

(1 Anhui Province Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, Key Laboratory of JiangHuai Arable Land Resources Protection and Eco-restoration, College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2 Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agriculture Sciences, Hefei 230031, China; 3 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 4 CNSG Anhui Hongshifang Co., Ltd., Hefei 230000, China; 5 State Key Laboratory of Rice Biology, China National Rice Research Institute, Hangzhou 310006, China)

Abstract: This study investigated the impact of the different straw decomposing microorganism inoculum (SDMI) on straw decomposition and rice yield in a paddy soil along the Huai River, Huoqiu County of Anhui Province, in which four treatments were designed, which included straw returning with optimized NPK fertilization then applied SDMI NO.1 (SFD1), or SDMI NO.2 (SFD2), or SDMI NO.3 (SFD3) or nothing (SF). No significant differences occurred in total decomposition rates of straws among different treatments in two consecutive years, but significant differences were found in straw decomposition rates in the first year. Straw decomposition rate increased by 70.59%, 262.5%, and 93.33% in SFD2 compared with SF, SFD1, and SFD3, respectively. Among all treatments, SFD2 had the highest rice yield in two consecutive years (8 592.84 kg/hm² and 7 538.70 kg/hm², respectively, $P < 0.05$). Rice yield and straw decomposition rate had the highest correlation (Pearson correlation coefficient was 0.45 in the first year and 0.48 in the second year). All treatments had significant effects on soil microbial biomass, but no clear pattern was found among different treatments. In addition, soil microbial biomass C/N ratio was the main attribute to determine the decomposition rate of straws. In conclusion, our study suggests that the application of different SDMIs can promote straw decomposition and increase rice yield, and SDMI No.2 is most promising due to its highest efficacy in stimulating soil

①基金项目: 安徽省自然科学基金项目(1808085MD97)、中国科学院 STS 区域重点项目(KFJ-STQ-QYZD-164)和大学生创新创业项目(XJDC2020455, 202010364071)资助。

* 通讯作者(chaoma@ahau.edu.cn; gangw1987@163.com)

作者简介: 黄薇(1999—), 女, 安徽桐城人, 本科生, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: hwei@stu.ahau.edu.cn

microbial communities, accelerating straw degradation and promoting rice growth.

Key words: Straw returning to field; Straw decomposing microorganism inoculum (SDMI); Straw decomposition; Rice yield; Soil microbial biomass

我国主要粮食作物秸秆年均产量为 7.8 亿 t, 将其合理还田不仅能够改善土壤结构、丰富土壤生物种群和培肥地力, 还可降低农业化学品的投入^[1-3]。但还田秸秆腐解缓慢引起的土壤整地播种质量差、当季作物产量下降等问题, 在一定程度上限制了秸秆还田的应用与推广^[4]。为解决上述问题, 前人尝试筛选秸秆降解微生物并制成腐秆剂, 企望加速秸秆腐解^[5-6]。然而, 在田间应用时, 腐秆剂却常因功能菌存活不佳或酶活降低而导致实际效果不稳定^[7-8]。

研究发现, 不同腐秆剂田间施用后的促腐或增产效应也会存在显著的差异^[9-10]。例如, 匡恩俊等^[9]研究发现鸡西市生物制剂厂腐熟剂的促腐效果显著高于上海市或东莞市生物工程公司的腐熟剂; 王喜枝等^[10]在河南郑州的试验也表明不同腐秆剂的增产效果不同, 具体表现为微生物腐秆剂>有机物料腐熟剂>秸秆生物降解专用菌剂>秸秆腐熟剂。这可能是由于腐秆菌进入土壤后的存活状况会受到土壤环境的影响, 不同腐秆菌会因其对使用地土壤环境的适应度差异而导致效用不同^[11]。此外, 腐秆剂田间促腐和增产作用之间的关系也存在争议^[12-13]。例如, 张莹莹和曹慧英^[12]在山东齐河潮土上的试验发现, 施用腐秆剂相比不施腐秆剂处理的玉米秸秆腐解率和小麦产量分别提高了 18.5% 和 10.7%; 而杨光海等^[13]指出施用腐秆剂处理下的水稻秸秆腐解率较不施腐秆剂处理提高了 2.2%, 但是油菜的产量却降低了 0.7%。造成上述差异的原因可能是因为腐秆剂田间施用对秸秆腐解和作物产量的提升作用会受到气候类型、还田条件、秸秆种类等因素的影响^[14]。安徽沿淮地区的农田多为中低产田, 存在土壤物理性状差、肥力水平低等问题, 因而很可能对腐秆剂的品种有特殊需求, 并对腐秆剂促腐和增产之间的关系产生影响^[15]。再者, 前人开展的腐秆剂田间应用研究多数仅关注于一季的结果, 少有涉及年际差异方面的研究。

由上, 本文利用布设于沿淮稻麦轮作区的麦秸还田定位试验, 分析了秸秆还田配施不同腐秆剂对当年和次年秸秆腐解状况、水稻产量和土壤微生物量的影响, 以期探明不同腐秆剂的促腐、增产效果及二者关系, 初步揭示腐秆剂调控稻田秸秆腐解和水稻生产的机制。相关研究结果可为遴选适应于安徽沿淮区稻麦轮作体系的秸秆腐熟剂产品、优化秸秆还田促腐技术

提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验区位于安徽省霍邱县宋店乡(116°32'E, 32°36'N), 地处淮河流域南岸, 属北亚热带季风气候, 年均气温 15.4 °C, 年均降水量 951.3 mm, 年均积温 5 623 °C。种植制度为小麦-水稻轮作。

1.2 试验材料

供试土壤: 水稻土, 0~15 cm 土层土壤的机械组成为砂粒(2~0.05 mm)28%、粉粒(0.05~0.002 mm)37%、黏粒(<0.002 mm)35%, 土壤 pH(土水比 1:2.5)、有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为 6.05、21.3 g/kg、1.12 g/kg、112.0 mg/kg、21.2 mg/kg 和 180.0 mg/kg。

供试秸秆和作物: 还田秸秆为小麦(周麦 23 号)秸秆, 其碳、氮、磷、钾的含量分别为 342.3、3.3、0.46 和 16.5 g/kg; 种植作物为水稻(新两优 6 号)。

供试化肥和腐秆剂: 氮肥选用尿素(N 46%), 磷肥选用过磷酸钙(P₂O₅ 12%), 钾肥选用氯化钾(K₂O 60%)。1 号腐秆剂产自北京, 主要包含枯草芽孢杆菌(2.03×10⁸ cfu/g)、米曲霉(3.1×10⁷ cfu/g)、黑曲霉(6.4×10⁷ cfu/g)、白地霉(1.21×10⁸ cfu/g)和酿酒酵母(2.7×10⁷ cfu/g); 2 号腐秆剂产自上海, 其主要成分包含枯草芽孢杆菌(2.21×10⁸ cfu/g)、嗜热脂肪地芽孢杆菌(5.4×10⁵ cfu/g)、天青链霉菌(1.7×10⁷ cfu/g)和白链霉菌(2.76×10⁸ cfu/g)等 4 种功能菌; 3 号腐秆剂产自广东, 其主要成分为枯草芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌和多粘芽孢杆菌等微生物。

1.3 试验设计

试验采用随机区组设计, 设置 4 个处理: 在秸秆粉碎全量还田和氮磷钾优化平衡施肥的基础上, ①不施腐秆剂(SF); ②施腐秆剂 1 号(SFD1); ③施腐秆剂 2 号(SFD2); ④施腐秆剂 3 号(SFD3)。每个处理 3 次重复, 小区面积为 24 m²。氮磷钾优化平衡施肥的施肥方案参照试验点测土配方施肥的建议, 氮磷钾施用量分别为 N 225 kg/hm², P₂O₅ 37.5 kg/hm², K₂O 67.5 kg/hm², 其中磷、钾肥做基肥一次性施入, 氮肥按照基肥: 分蘖肥: 穗肥=6.3:2.3:1.3 分次施用。

秸秆还田方式为粉碎(约为 10 cm)全量(约为

6 000 kg/hm²)翻耕还田。腐秆剂按 30 kg/hm²用量均匀撒施到铺好秸秆的田内并立即翻耕。同时取出一部分秸秆烘干后截成 1~3 cm 段,称取 20 g 秸秆段均匀置于 15 cm × 20 cm 的 200 目尼龙网袋后埋入试验小区,每个生育期各取出 3 袋,共需 48 袋,竖直放置在土层中。

1.4 样品采集与测定

1.4.1 小麦秸秆累积分解率和腐解速率 于水稻分蘖、拔节、抽穗和成熟期即自腐解后第 60、105、115、180 天分别从每个小区各随机取样 3 袋,取出网袋后先用自来水洗净表面粘附的泥土,再用蒸馏水冲洗 3 次,在 60 °C 烘箱中烘干后称重,用公式(1)分别计算秸秆各时期的腐解率和全生育期的腐解率^[16]。

$$N(\%) = (M_0 - M_t) / M_0 \times 100 \quad (1)$$

式中: N 为秸秆腐解率(%); M_0 为原始秸秆干物质质量(g); M_t 为腐解 t 天后的秸秆干物质质量(g)。

秸秆腐解速率可通过一级动力学方程进行拟合获得^[16]:

$$N_t = N_0(1 - e^{-kt}) \quad (2)$$

式中: N_t 为 t 天秸秆腐解率(%); N_0 为秸秆的腐解潜力(%); k 为秸秆腐解速率常数; t 为腐解时间(d)。

1.4.2 水稻产量及其构成因素 水稻成熟时,先在各小区随机选 10 穴进行有效穗数、每穗粒数、结实率、千粒重以及风干籽粒含水率测定;随后,进行全区收割、脱粒和风干,得到水稻实际产量。

1.4.3 土壤微生物生物量 于水稻分蘖、拔节、抽穗和成熟期,用土钻在各试验小区内按“S”法采集 0~15 cm 土层土壤 7 个点混合,去杂过筛后将一部分保存于 4 °C 冰箱中用于土壤微生物性状测定。土壤微生物生物量测定采用氯仿熏蒸提取法,微生物生物量碳、氮的换算系数分别取 0.38 和 0.45;土壤微生物生物量 C/N 为土壤微生物生物量碳和微生物生物量氮的比值^[17]。

1.5 数据分析

采用单因素方差(One-way ANOVA)和邓肯检验(Duncan test)分析不同处理对各采样期秸秆腐解率、水稻产量及其构成因素和土壤微生物生物量的影响;采用重复测量方差(Repeat-measure ANOVA)分析不同处理对秸秆腐解率与土壤微生物生物量的总体影响;采用皮尔逊相关系数(Pearson correlation coefficients)定量分析秸秆腐解率与水稻产量之间的相关关系;采用偏最小二乘法(Partial least squares, PLS)进行秸秆腐解率与土壤微生物性状的回归分析。

统计分析由 SPSS 21.0 完成,图形绘制以及秸秆腐解过程的一级动力学曲线拟合采用 Origin 9.0 完成。

2 结果与分析

2.1 不同处理下小麦秸秆腐解的动态变化

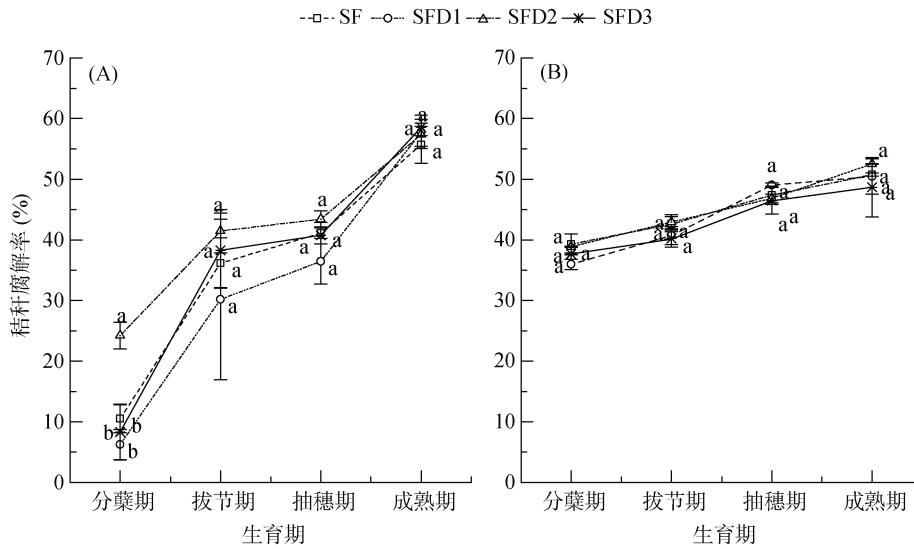
第一年,随着水稻的生长发育,各处理的秸秆腐解率均呈上升趋势,并表现为前期快、中期慢、后期快的规律,SF、SFD1、SFD2 和 SFD3 处理的秸秆累积腐解率分别为 55.7%、57.8%、57.3% 和 58.6%(图 1A)。SFD2 的腐解率在水稻前 3 个生育期内均为最高,其中在分蘖期同其余 3 个处理有显著差异($P < 0.05$,图 1A)。第二年,SF、SFD1、SFD2 和 SFD3 处理的秸秆腐解率随水稻生育期发展而不断上升,最终分别达 50.8%、50.5%、52.5% 和 48.7%,但各处理间差异不显著(图 1B)。

小麦秸秆腐解率随时间的变化规律可用一级动力学方程 $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$ 进行拟合($R^2 \geq 0.80$)。拟合结果显示,第一年 SFD2 处理的秸秆腐解速率常数(k)最高,较 SF、SFD1 和 SFD3 分别增加 70.6%、262.5% 和 93.3%;第二年 SFD2 处理下的秸秆腐解速率常数(k)较 SFD1 处理高 19.0%,但比 SF 和 SFD3 却分别下降了 9.1% 和 5.7%(表 1)。

2.2 不同处理下水稻的产量及其构成因素

与不施腐秆剂相比,施用 2 号腐秆剂(SFD2)处理的两年水稻产量均有所增加(11.23%, 0.54%),而施用 1 号(SFD1)和 3 号腐秆剂(SFD3)的水稻产量却均有所下降(分别为 18.12%, 10.55%; 4.89%, 8.41%)(表 2)。第一年,SFD2 处理为最高且较其他 3 个处理水稻产量增幅显著($P < 0.05$);第二年,SFD2 处理的水稻产量较 SFD1 和 SFD3 处理分别显著增加了 12.4% 和 9.8%,但较对照处理无显著变化(表 2)。进一步分析不同处理的水稻产量构成因素可知,与不施腐秆剂相比,第一年施用 1 号腐秆剂可显著增加千粒重,施用 2 号和 3 号腐秆剂可显著增加水稻穗粒数($P < 0.05$);第二年,与不施腐秆剂相比,除 2 号腐秆剂外,其余腐秆剂施用均会显著降低水稻有效穗数和穗粒数(表 2)。

相关性分析表明,无论是第一年还是第二年,水稻产量与秸秆腐解速率的相关性(0.45 和 0.48)都明显高于其与秸秆累积腐解率的相关性(0.18 和 -0.05);除水稻穗粒数和秸秆腐解速率的相关性在第二年稍高外,其余水稻产量构成因素与秸秆累积腐解率或腐解速率的相关性均较小(表 3)。



(A. 第一年秸秆腐解率; B. 第二年秸秆腐解率; 图中小写字母不同表示同一生育期不同处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平)

图 1 不同处理下秸秆腐解率的变化规律

Fig.1 Changes of decomposition rates under different treatments

表 1 不同处理下秸秆腐解率与还田时间关系的拟合

Table 1 Relationship fitting between decomposition rates and returning time under different treatments

时间	处理	腐解率 $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$		
		$N_0(\%)$	k	R^2
第一年	SF	68.083	0.017 ± 0.004	0.92**
	SFD1	98.979	0.008 ± 0.006	0.80**
	SFD2	59.487	0.029 ± 0.003	0.97**
	SFD3	75.246	0.015 ± 0.005	0.89**
第二年	SF	48.829	0.055 ± 0.006	0.98**
	SFD1	50.303	0.042 ± 0.005	0.98**
	SFD2	49.908	0.050 ± 0.005	0.98**
	SFD3	47.221	0.053 ± 0.010	0.95**

注: **表示达 $P < 0.01$ 显著水平。

表 2 不同处理对水稻产量及其构成因素的影响

Table 2 Effects of different treatments on rice yield and its components

时间	处理	有效穗数($10^4/\text{hm}^2$)	穗粒数	结实率(%)	千粒重(g)	实际产量(kg/hm^2)
第一年	SF	13.76 ± 1.40 a	240.97 ± 9.58 b	79.08 ± 6.08 a	26.87 ± 0.74 b	$7\ 724.69 \pm 496.08$ b
	SFD1	13.74 ± 0.21 a	230.94 ± 13.61 b	75.98 ± 7.39 a	27.81 ± 0.42 a	$6\ 325.04 \pm 194.89$ c
	SFD2	13.28 ± 0.25 a	261.55 ± 10.81 a	82.94 ± 4.36 a	26.99 ± 0.30 ab	$8\ 592.84 \pm 88.59$ a
	SFD3	12.74 ± 0.37 a	263.68 ± 9.12 a	74.99 ± 7.10 a	26.92 ± 0.21 b	$7\ 346.73 \pm 40.92$ b
第二年	SF	15.03 ± 1.26 a	252.80 ± 13.40 a	72.40 ± 2.83 a	29.03 ± 3.85 a	$7\ 498.30 \pm 256.17$ a
	SFD1	11.66 ± 0.58 b	188.90 ± 34.97 b	76.20 ± 4.37 a	29.16 ± 3.28 a	$6\ 707.56 \pm 515.96$ b
	SFD2	13.05 ± 1.23 ab	234.80 ± 1.22 a	78.98 ± 3.73 a	28.97 ± 2.17 a	$7\ 538.70 \pm 230.21$ a
	SFD3	12.91 ± 0.96 b	178.27 ± 14.33 b	79.32 ± 3.34 a	30.29 ± 0.25 a	$6\ 867.51 \pm 12.97$ b

注: 表中数据为平均值 \pm 标准差($n=3$); 同列小写字母不同表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.3 不同处理下土壤微生物性状的动态变化

第一年,不同处理之间的土壤微生物性状差异在分蘖期最为明显(图 2A~2C)。在这一时期,土壤微生物生物量碳以 SFD2 处理为最低,且与其他腐秆剂处理间差异显著($P < 0.05$);土壤微生物生物量氮以 SF 处理为最低,其与 SFD2 差异不大,但却与 SFD1 和 SFD3 差异显著($P < 0.05$);处理间微生物生物量 C/N 大小顺序为 SF>SFD2>SFD3>SFD1,其中 SF 处理显著高于其他处理。

第二年,不同处理的土壤微生物性状几乎在各生育期均存在显著差异(图 2D~2F)。除拔节期外,其余生育期土壤微生物生物量碳均以 SFD2 处理为最高;微生物生物量氮仅在水稻生长前期存在显著差异(分蘖期和拔节期),分别以 SFD2 和 SFD3 处理为最高;微生物生物量 C/N 各生育期变化无明显规律,分蘖期以 SFD3 处理最高,拔节期以 SFD1 处理为最高,抽穗期除 SF 处理较小外其余处理无显著差异,成熟期以 SFD2 处理为最高。

表 3 成熟期秸秆累积腐解率和腐解速率与作物产量及其构成因素之间的相关系数

Table 3 Correlation analysis of straw cumulative decomposition rate, decomposition rate and rice yield as well as its components

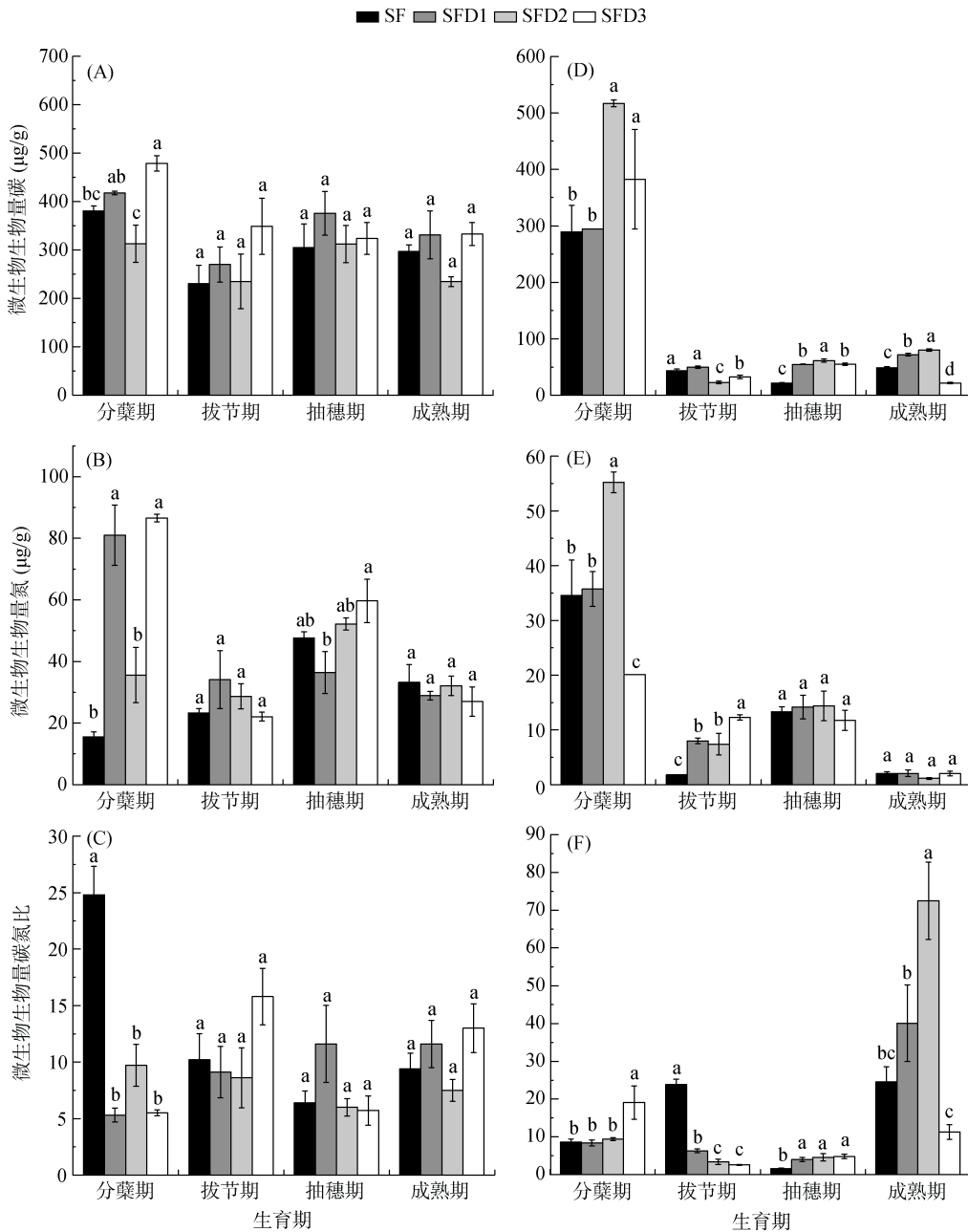
产量指标	第一年		第二年	
	累积腐解率	腐解速率	累积腐解率	腐解速率
有效穗数	0.21	-0.34	0.24	0.17
穗粒数	0.13	0.22	-0.02	0.43
千粒重	0.19	-0.13	-0.01	-0.22
实际产量	0.18	0.45	-0.05	0.48

偏最小二乘法回归分析(表 4)显示: 秸秆降解速率主要由土壤微生物生物量 C/N 决定, 其中第一年拔节期秸秆降解速率随 C/N 增大而增加, 其余时期为 C/N 越大则秸秆降解越慢。

3 讨论

3.1 配施不同腐秆剂对还稻田麦秸腐解的影响

本研究发现连续两年不同处理间秸秆腐解率差异均不显著(图 1), 这与胡宇容等^[18]的结果类似, 可



(图 A、B 和 C 代表第一年微生物性状, 图 D、E 和 F 代表第二年微生物性状; 图中小写字母不同表示同一生育时期不同处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平)

图 2 不同处理下土壤微生物性状的变化

Fig.2 Changes of microbial characters under different treatments

表 4 不同处理下秸秆腐解速率与土壤微生物性状的偏小二乘法回归分析

Table 4 Partial least square regression analysis of straw decomposition rate and microbial characters under different treatments

时间	生育期	模型	决定系数
第一年	分蘖期	$Y=3.028-0.001X_1-0.021X_2-0.068X_3$	0.767
	拔节期	$Y=0.050-0.003X_1+0.022X_2+0.064X_3$	0.472
	抽穗期	$Y=0.209+0.002X_1-0.008X_2-0.019X_3$	0.165
	成熟期	$Y=0.112+0.001X_1-0.001X_2-0.003X_3$	0.152
第二年	分蘖期	$Y=1.884+0.001X_1-0.010X_2-0.023X_3$	0.051
	拔节期	$Y=0.235+0.001X_1-0.001X_2-0.009X_3$	0.240
	抽穗期	$Y=0.265+0.001X_1-0.004X_2-0.006X_3$	0.107
	成熟期	$Y=0.146+0.001X_1-0.006X_2-0.014X_3$	0.107

注： X_1 ，微生物生物量碳； X_2 ，微生物生物量氮； X_3 ，微生物生物量 C/N； Y ，秸秆腐解速率。

能是因为秸秆还田后的总腐解量主要由其自身的组成与特性决定，而与降解者种群关系不大^[19]。然而，不同处理的秸秆腐解速率在第一年时差异显著，SFD2 处理的秸秆腐解速率最大，第二年无显著差异（图 1）。这可能是因为第一年分蘖期时 SFD2 的秸秆腐解量显著高于其他处理。另外，SFD1 与 SFD3 无显著作用可能是由于该两种腐熟剂功能微生物与供试土壤性状不匹配^[11]。

偏小二乘法回归分析显示秸秆腐解速率由土壤微生物生物量碳氮比决定（表 4），与前人研究结果一致^[20]，主要是因为土壤微生物生物量碳氮比反映了土壤中微生物群落结构状况，而微生物群落恰恰是驱动外来有机物料土壤降解过程的关键因子^[21-22]。研究还发现，SFD2 处理的土壤微生物生物量 C/N 在第一年分蘖期维持在 10 : 1 左右，比较利于还田秸秆的降解（图 2），这也可归因于前述理论^[20-22]。至于 2 号腐秆剂的秸秆促腐功效在不同试验年度间的差异，则可能因为下述两点：一方面，年度之间气候不同，与第一年相比，第二年降雨量明显下降（其中，第一年和第二年分别为 1 639 mm 和 1 056 mm），旱情严重，进而导致腐秆剂在第二年时功效不显著^[14, 23]；另一方面，腐秆菌进入土壤后可能会对土著微生物产生影响，而还田秸秆的降解需由外源微生物和土著菌共同作用，腐秆菌在第一年侵入对土著微生物造成的影响可能直接导致其第二年无法与土著菌“合作”促腐^[24]。

3.2 配施不同腐秆剂对水稻产量的影响

研究结果显示，秸秆还田配施 2 号腐秆剂的水稻实际产量在第一年显著高于其余 3 个处理并且水稻产量与秸秆腐解速率呈正相关（表 2 和表 3），故 SFD2 处理高产的原因是由于该处理秸秆腐解速率快。秸秆快速腐解不仅可以促进土壤结构的改善、增加土壤矿

质营养元素含量，还可以提高秸秆氮的释放，缓解麦秸残体因降解“争氮”而妨碍水稻早期生长^[25-26]。此外，2 号腐秆剂的功能菌主要包含枯草芽孢杆菌、嗜热脂肪地芽孢杆菌、天青链霉菌和白链霉菌，以上菌株除具腐解秸秆功能外，在植物促生、抗病等方面的效果也多有报道，这或许也是水稻产量提升的原因之一^[27]。

需要注意的是，试验第二年 SFD2 处理的水稻产量虽依然为最高但与 SF 处理的差异并不显著（表 2），这与李继福等^[28]江汉平原的研究结果类似。这一方面可能与外源腐秆菌在第二年没有成功加速秸秆腐解有关，另一方面则可能归因于第一年施用腐秆剂麦秸还田后使土壤 C/N 发生了改变，进而改变了土壤降解微生物群落的结构和功能^[21-22]。至于在第二年配施 1 号和 3 号腐秆剂与不施腐秆剂的对照相比，均没有促腐效果却出现显著减产现象，可能主要因功能微生物菌株对环境中的 pH、温度和通气状况等均有严格的要求，倘若环境条件与腐秆菌需求不匹配，那么其将难以存活和发挥作用^[7-8]。再者，腐秆剂的作用受产品质量、区域气候、土壤环境条件以及土著微生物的影响较大，若第二年 1 号和 3 号腐秆剂中的功能菌在当年的气候环境条件下对土著微生物群落产生负面影响，进而抑制土壤养分转化，最终便会造成当季水稻的减产^[10, 14, 28]。

4 结论

综上所述，沿淮地区小麦秸秆促腐还稻田时，配伍主要成分包含枯草芽孢杆菌和嗜热脂肪地芽孢杆菌等的腐秆剂的促腐和增产效果最佳，进一步分析得出其原因可能为该腐秆剂进入土壤后可驱动高效降解麦秸土壤微生物群落的形成，加速了秸秆腐解及其养分转化和供应。本研究结果对于沿淮地区稻麦轮作

系统秸秆还田下腐秆剂的匹配具有一定的参考意义,可为该地区秸秆直接还田高效利用提供科学依据。

参考文献:

- [1] 柴如山,王擎运,叶新新,等.我国主要粮食作物秸秆还田替代化学氮肥潜力[J].农业环境科学学报,2019,38(11):2583-2593.
- [2] 吴鹏年,王艳丽,侯贤清,等.秸秆还田配施氮肥对宁夏扬黄灌区滴灌玉米产量及土壤物理性状的影响[J].土壤,2020,52(3):470-475.
- [3] 李慧敏,田胜营,李丹丹,等.有机物料施用对潮土活性有机碳及微生物群落组成的影响[J].土壤学报,2021,58(3):777-787.
- [4] 田仲和,高善民,朱恩,等.麦秸还田不均匀对直播水稻生长的影响及对策[J].土壤肥料,2002(1):26-29.
- [5] 姜佰文,王春宏,李建林,等.秸秆常温快速腐熟生物菌剂的筛选[J].东北农业大学学报,2009,40(5):46-49.
- [6] 魏蔚,吴昊,宋时丽,等.复合菌剂对小麦秸秆降解速率、土壤酶和土壤微生物类群的影响[J].土壤,2019,51(5):955-963.
- [7] 马超,周静,郑学博,等.秸秆促腐还田对土壤养分和小麦产量的影响[J].土壤,2012,44(1):30-35.
- [8] van Veen J A, van Overbeek L S, van Elsas J D. Fate and activity of microorganisms introduced into soil[J]. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 1997, 61(2): 121-135.
- [9] 匡恩俊,迟凤琴,宿庆瑞,等.3种腐熟剂促进玉米秸秆快速腐解特征[J].农业资源与环境学报,2014,31(5):432-436.
- [10] 王喜枝,姚丽娟,孙笑梅,等.不同秸秆腐熟剂在河南省麦田的应用效果研究[J].河南农业科学,2013,42(10):59-62.
- [11] 马超,庄睿花,王时聪,等.微生物入侵影响因素研究进展[J].生态学杂志,2019,38(10):3195-3201.
- [12] 张莹莹,曹慧英.秸秆腐熟剂对玉米秸秆腐解及下茬小麦生长的影响[J].中国农技推广,2019,35(5):57-59.
- [13] 杨光海,张居菊,杨光兰.稻油两熟田应用秸秆腐熟剂的效果初探[J].耕作与栽培,2013(4):20-22.
- [14] 杨欣润,许邴,何治逢,等.整合分析中国农田腐秆剂施用对秸秆腐解和作物产量的影响[J].中国农业科学,2020,53(7):1359-1367.
- [15] 曾希柏,张佳宝,魏朝富,等.中国低产田状况及改良策略[J].土壤学报,2014,51(4):675-682.
- [16] 朱远芃,金梦灿,马超,等.外源氮肥和腐熟剂对小麦秸秆腐解的影响[J].生态环境学报,2019,28(3):612-619.
- [17] 贺美,王迎春,王立刚,等.深松施肥对黑土活性有机碳氮组分及酶活性的影响[J].土壤学报,2020,57(2):446-456.
- [18] 胡宇容,陈留根,郭智,等.秸秆腐解剂对麦秸腐解速率及水稻产量的影响[J].江苏农业科学,2017,45(4):41-44.
- [19] 王金洲,卢昌艾,张文菊,等.中国农田土壤中有有机物腐解特征的整合分析[J].土壤学报,2016,53(1):16-27.
- [20] Sun B, Wang X Y, Wang F, et al. Assessing the relative effects of geographic location and soil type on microbial communities associated with straw decomposition[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2013, 79(11): 3327-3335.
- [21] 张红,吕家珑,曹莹菲,等.不同植物秸秆腐解特性与土壤微生物功能多样性研究[J].土壤学报,2014,51(4):743-752.
- [22] Fan F L, Yin C, Tang Y J, et al. Probing potential microbial coupling of carbon and nitrogen cycling during decomposition of maize residue by ¹³C-DNA-SIP[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 70: 12-21.
- [23] 2011年全国十大自然灾害事件[J].中国减灾,2012(1):12-13.
- [24] Xiong W, Guo S, Jousset A, et al. Bio-fertilizer application induces soil suppressiveness against *Fusarium* wilt disease by reshaping the soil microbiome[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 114: 238-247.
- [25] 叶文培,谢小立,王凯荣,等.不同时期秸秆还田对水稻生长发育及产量的影响[J].中国水稻科学,2008,22(1):65-70.
- [26] 陈尚洪,朱钟麟,吴婕,等.紫色土丘陵区秸秆还田的腐解特征及对土壤肥力的影响[J].水土保持学报,2006,20(6):141-144.
- [27] 林福呈,李德葆.枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)S₉对植物病原真菌的溶菌作用[J].植物病理学报,2003,33(2):174-177.
- [28] 李继福,鲁剑巍,李小坤,等.麦秆还田配施不同腐秆剂对水稻产量、秸秆腐解和土壤养分的影响[J].中国农学通报,2013,29(35):270-276.