

王佳佳, 奚永兰, 常志州. 秸秆快腐菌 (*Streptomyces rochei*) 对还田麦秸化感物质的响应[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(5): 1081-1087.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2016.05.020

秸秆快腐菌 (*Streptomyces rochei*) 对还田麦秸化感物质的响应

王佳佳^{1,2}, 奚永兰¹, 常志州¹, 于建光¹, 徐跃定¹, 张建英¹

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 2. 南京师范大学生命科学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 为了明确秸秆快腐菌对还田秸秆化感物质的响应, 提高秸秆快腐菌剂田间应用效果, 以娄氏链霉菌 (*Streptomyces rochei*) 为快腐菌, 以 4 种酚酸混合物为化感物质, 室内模拟研究了还田麦秸腐解过程中总酚酸消长情况, 进一步考察了不同浓度酚酸对 *Streptomyces rochei* 生长及纤维素酶活性的影响。结果表明: 模拟麦秸还田腐解 7 d 时, 对照组 (不经娄氏链霉菌处理) 和处理组 (经娄氏链霉菌处理) 总酚酸积累达到最大值, 分别为 9.3 $\mu\text{g/ml}$ 、7.0 $\mu\text{g/ml}$, 处理组的总酚酸积累量显著低于对照组 ($P < 0.05$), 此时快腐菌数量和发芽指数 (Germination index, GI) 为最小值; 当酚酸浓度为 100 mg/L 时, *Streptomyces rochei* 的生长量和菌落直径达到最大值, 低浓度酚酸能促进快腐菌生长繁殖; 总酚酸浓度大于 200 mg/L 时, 随浓度升高, 酚酸对快腐菌抑制作用越明显; 同样, 快腐菌纤维素酶活性受酚酸影响, 处理前期有一定的促进作用, 后期作用不明显, 此规律与对其生物数量的影响 (低浓度促进生长高浓度抑制生长) 不同; 娄氏链霉菌对酚酸有一定的代谢能力, 其降解能力高低受酚酸浓度与酚酸种类影响。快腐菌在对还田秸秆降解的同时, 会受到其化感物质影响, 因此, 在筛选与使用秸秆快腐菌时, 应充分考虑还田秸秆可能产生的化感效应。

关键词: 秸秆还田; 快腐菌; 化感效应

中图分类号: X172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2016)05-1081-07

Responding of a bacterium (*Streptomyces rochei*) quickly decomposing straw to allelochemicals in wheat straw returned to field

WANG Jia-jia^{1,2}, XI Yong-lan¹, CHANG Zhi-zhou¹, YU Jian-guang¹, XU Yue-ding¹, ZHANG Jian-ying¹

(1. Institute of Agricultural Resource and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. College of Life Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: An indoor simulation experiment was carried out using *Streptomyces rochei* as a variety of quickly-decomposing bacterium for wheat straw returned to field and the mixture of four kinds of phenolic acids as allelochemicals to determine the response of the bacterium to allelochemicals during straw decomposition. Wheat straw without *S. rochei* application was taken as control. The changes of total phenolic acids contents were investigated and the influences of phenolic acids

concentrations on the growth and cellulose activity of *S. rochei* were evaluated. After seven days of decomposition, the total phenolic acid content in both *S. rochei*-treated wheat straw and control straw peaked, with the higher content ($P < 0.05$) in control straw (9.3 $\mu\text{g/ml}$) and lower in *S. rochei*-treated straw (7.0 $\mu\text{g/ml}$), and the bacterial count and germination index of wheat straw bottomed. The mass growth and colony diameter of *S. rochei* reached the highest value at low application concentration

收稿日期: 2016-01-14

基金项目: 江苏省农业自主创新基金项目 [CX(12)1102]; 江苏省科技支撑计划项目 (BE2013420)

作者简介: 王佳佳 (1988-), 女, 河南漯河人, 硕士, 主要从事农业废弃物资源化利用研究。 (E-mail) wangjiajia2007@126.com

通讯作者: 常志州, (E-mail) czhizhou@hotmail.com

(100 mg/L) of phenolic acid. The inhibition of *S. rochei* by phenolic acid showed a concentration-dependent manner when phenolic acid concentration was more than 200 mg/L. The cellulase activity of *S. rochei* was improved by phenolic acid at early stage of treatment. The decomposing capacity of *S. rochei* was phenolic acid concentration- and variety-dependent. In conclusion, *S. rochei* was sensitive to the allelochemicals during straw decomposing, so the allelopathy should be taken into consideration in selecting and applying wheat straw decomposing bacterium.

Key words: straw returning; quickly-decomposing bacterium; allelopathic effect

秸秆还田是秸秆资源化利用最有效技术途径之一^[1]。在稻麦或麦玉轮作区,随着作物产量提高,秸秆产生量越来越高,因此秸秆还田量的增加对后茬作物生长影响相应增加^[2-8]。秸秆快腐菌是促进秸秆快速腐化的微生物^[9],众多学者尝试通过接种秸秆快腐微生物菌剂以加快还田秸秆降解,从而缓解秸秆还田可能造成的负面影响。

但秸秆快腐菌剂在实际推广应用中间田效果并不稳定^[10-14],其原因可能为:一方面筛选的菌株木质纤维降解能力低,菌株竞争力弱,在土壤环境中难以定殖,另一方面受接种方式、接种时间以及田间(温、湿、通气等)条件影响,难以发挥应有作用等。作者前期研究中发现,还田麦秸会释放出酚酸等化感物质,其中总酚酸含量与水稻发芽指数间呈显著负相关^[15],麦秸腐熟产生的化感物质,是否影响秸秆还田快腐微生物菌株功能与作用,未见报道。

化感物质是植物或微生物向环境中释放的某些化学物质,它会影响植物或微生物自身及其他有机体的生长发育。植物体中化感物质因其存在部位的不同导致其释放途径也不同,主要有植物地上部的淋洗和挥发、根的分泌及植物残体的腐解等 4 种途径^[16]。目前已知的化感物质主要有水溶性有机物、直链醇、脂肪族醛和酮,包括简单不饱和脂、长链脂肪酸和多烯、醌类、苯甲酸及其衍生物、氨基酸和多肽、内酯、单宁、嘌呤和核苷等 14 类,随着研究的不断深入,其种类还将逐渐更新^[17]。在化感物质中,酚酸类物质最先在作物连作障碍研究中受到重视,且自然界生成的大多数酚酸类物质均有化感效应,如大豆根系分泌物和植株水浸液中的香草酸、香草醛和对羟基苯甲酸等酚酸与大豆连作障碍有直接关系^[18],银胶菊(*Parthenium hysterophorus*)残体因含有酚类而对萝卜和鹰嘴豆幼苗生长产生抑制^[19],水稻(*Oryza saliva* L.) 秸秆浸提液抑制芥菜幼苗生长是水溶性酚起主要作用^[20],番茄根系酚酸积累显著影响其土壤微生物群落结构^[21]等。酚酸类物质是

目前研究最多、活性较强的一类物质,已成为公认的化感物质^[22-24]。

本试验以娄氏链霉菌(*Streptomyces rochei*)为秸秆快腐菌,选取麦秸化感物质研究报道中较常见的对羟基苯甲酸、阿魏酸、丁香酸、水杨酸 4 种酚酸按质量比 1:1:1:1 混合作为化感物质,研究麦秸腐熟过程中总酚酸消长情况及 *Streptomyces rochei* 对不同酚酸浓度的响应,为秸秆还田腐熟剂菌株筛选及其应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 试验材料 麦秸:取自江苏省农业科学院小麦试验基地,选取成熟干燥未腐烂的小麦秸粉碎并过筛,备用。麦秸理化性质:总固形物 87.77%,有机碳 52.45%,全氮 8.32%,纤维素 46.12%,半纤维素 29.78%,木质素 9.77%。土壤:取自江苏省农业科学院试验基地水稻田,采样后,去除植物残体备用。土壤基本理化指标:速效磷 33.71 mg/kg,速效钾 138.00 mg/kg,铵态氮 11.99 mg/kg,硝态氮 8.62 mg/kg。菌种:娄氏链霉菌(*Streptomyces rochei*),由本研究室(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所农业废弃物资源化研究室)从森林土培养物中经筛选、分离纯化后得到的 1 株高效腐解纤维素的放线菌^[25],已为农业部登记为秸秆快腐菌。为便于区分并计数所接种娄氏链霉菌(*S. rochei*),事先将 *S. rochei* 在链霉素选择压力下培养数周,获得耐受 100 mg/L 浓度链霉素的 *S. rochei* 菌株,将其作为本试验所用菌株。滤纸:由 Whatman 公司提供。

1.1.2 快腐菌剂制备 将耐受链霉素的 *S. rochei* 在高氏一号液体培养基上培养 3 d,以 100 g 纯麦秸作为固体培养基成分,调节麦秸含水率为 60%,接入 10 ml 的经摇床恒温培养 3 d 的液体培养液,拌匀,置于 30 ℃ 培养箱中培养 7 d。然后将培养料取出风干 2 d,粉碎机粉碎,过 1 mm 筛,拌匀。取部分拌匀

后的接种粉剂按 1:20(质量:体积)的比例,加蒸馏水在摇床上以 200 r/min 振荡 1 h,浸提粉剂,用 4 层纱布过滤,过滤液作为水剂备用^[26]。

1.1.3 酚酸溶液制备 为模拟麦秸化感物质,选择化感物质中最常见的有机酸对羟基苯甲酸、阿魏酸、丁香酸、水杨酸按质量比 1:1:1:1 混合,先用 7%乙醇溶解,然后依次配成浓度分别为 0 mg/L、20 mg/L、50 mg/L、100 mg/L、200 mg/L、500 mg/L、1 000 mg/L 的酚酸物质混合液^[21]。

1.1.4 项目测定及方法

1.1.4.1 总酚酸含量 采用磷钼酸-磷钨酸盐比色法^[27]。

1.1.4.2 放线菌数量 采用梯度稀释平板计数法。振荡后的混合土溶液稀释度为 1×10^{-1} ,无菌条件下,取 1 ml 上层液加入 9 ml 无菌水中,振荡均匀,制成稀释度为 1×10^{-2} 菌液,依此类推,制成 1×10^{-3} 、 1×10^{-4} 、 1×10^{-5} 个稀释度的菌液,并以此 3 个稀释度的菌液涂于高氏培养基平板,计算 *S. rochei* 菌体数。

1.1.4.3 发芽指数^[28] 吸取上清液 10 ml,加到铺有滤纸的内径为 9 cm 的培养皿中,每个培养皿中放置 20 粒颗粒饱满的京盐 12 水稻种子,3 次重复,28 ℃ 培养 3 d 后测发芽率和根长,用蒸馏水作空白对照。计算发芽指数(GI), $GI = (\text{处理发芽率} \times \text{处理根长}) / (\text{空白发芽率} \times \text{空白根长}) \times 100\%$ 。

1.1.4.4 纤维素酶活性 3,5-二硝基水杨酸(DNS)显色法测定纤维素酶活性^[29]。取 3 支大试管,1 支作为空白对照,其余 2 支作为平行样品管。样品管中加 1.0 ml 原样酶液,然后 3 支试管中分别加入 4.0 ml 已预热至 60 ℃ 的 CMC 缓冲液,在 60 ℃ 的水浴锅中反应 20 min 取出,每管立即加入 3.0 ml DNS 显色液,摇匀后在对照管中再加入 1.0 ml 原样酶液。将 3 支试管放入沸水浴中,显色 5 min 后立即取出,流水冷却,用分光光度计于 490 nm 处测其 OD 值。1 L 原样酶液 1 min 产生 1 mg 葡萄糖定义为 1 个酶活性单位(U)。纤维素酶活性 = $(m_1 - m_0) \times D/20$,式中, m_1 为为标准曲线上对应的样品葡萄糖含量, m_0 为标准曲线上对应的空白葡萄糖含量,D 为样品的稀释倍数。

1.1.4.5 酚酸含量 采用高效液相色谱法^[21]测定。

1.2 试验设计

1.2.1 麦秸还田模拟试验 对照组:将 2 g 麦秸与 3 ml 水混匀;处理组:将 2 g 麦秸与 3 ml 液体快腐菌

混匀,接种量为 1 g 秸秆 1×10^7 CFU 左右。同时,对照与处理均用尿素水溶液调节 C/N 为 25:1,然后把对照与处理麦秸分别放入尼龙网制成的小袋中,再放入事前装有 200 g 风干土的塑料量杯中。每个处理重复 3 次。各处理在室外光照下放置 24 h,然后向塑料量杯中添加蒸馏水,使得液面高于土面约 1 cm。在恒温箱中黑暗培养,保持温度为 25 ℃,湿度 90%,每隔 3 d 按称质量法补充水分,保持开始的淹水高度 1 cm。取样时间为第 0 d、3 d、5 d、7 d、10 d、15 d、30 d。

1.2.2 娄彻氏链霉菌对酚酸的响应试验

1.2.2.1 酚酸对娄彻氏链霉菌生长的影响 制备高氏一号液体培养基,添加混合酚酸,使浓度分别为 0 mg/L、20 mg/L、50 mg/L、100 mg/L、500 mg/L 和 1 000 mg/L,接入 5 块直径 0.7 cm 的生长在高氏平板上的新鲜菌丝块,30 ℃、180 r/min 摇床培养,培养 3 d,过滤菌丝球,于 50 ℃ 烘干至恒质量,称质量。设置 3 个重复。制备与上述相同浓度酚酸的高氏一号平板,将预先液体培养好的娄彻氏链霉菌稀释 1 000 倍,取 100 μl 菌液涂布于高氏平板,30 ℃ 培养 3~5 d 后测定菌落直径大小,重复 3 次。

1.2.2.2 酚酸对娄彻氏链霉菌纤维酶活性的影响 将 100 ml 高氏液体培养基(用商品纤维素或滤纸代替碳源)装入 250 ml 三角瓶中,添加酚酸,使其浓度分别为 0 mg/L、20 mg/L、50 mg/L、100 mg/L、200 mg/L、500 mg/L、1 000 mg/L,接入 5 块直径 0.7 cm 的生长在高氏平板上的新鲜菌丝块,30 ℃、180 r/min 摇床培养,连续培养 7 d。每天取样测定 pH 值、纤维素酶活性和各种酚酸的含量。

1.2.3 数据整理与统计 试验数据均采用 Microsoft Excel 和 SPSS 18.0 软件进行计算、统计和处理分析。变量的差异采用单因素方差分析(Analysis of variance,ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 麦秸腐解过程总酚酸消长情况

由图 1 中总酚酸浓度动态变化可以看出,麦秸腐解初期,对照组和处理组的总酚酸含量都有所增加,且在腐解第 5 d 后急剧增加,至第 7 d 达到了最大值,分别为 9.3 μg/ml、7.0 μg/ml,较周淑霞等的试验中酚酸含量最高值出现时间提早了 7 d^[30],可能是本研究所用麦秸和土壤不同所致。随后总酚酸

含量迅速下降,腐解 10 d 后对照组和处理组的总酚酸变化趋于平稳。整体来看,麦秸腐解前期(0~5 d),处理组的总酚酸含量高于对照组,随后,对照组总酚酸含量急剧升高,最高值显著高于处理组($P <$

0.05),这可能是由于处理组接种了娄彻氏链霉菌腐熟剂,加快了前期麦秸腐解,使酚酸浓度快速提高,而后期酚酸被接种微生物所分解利用,减少了总酚酸累积。

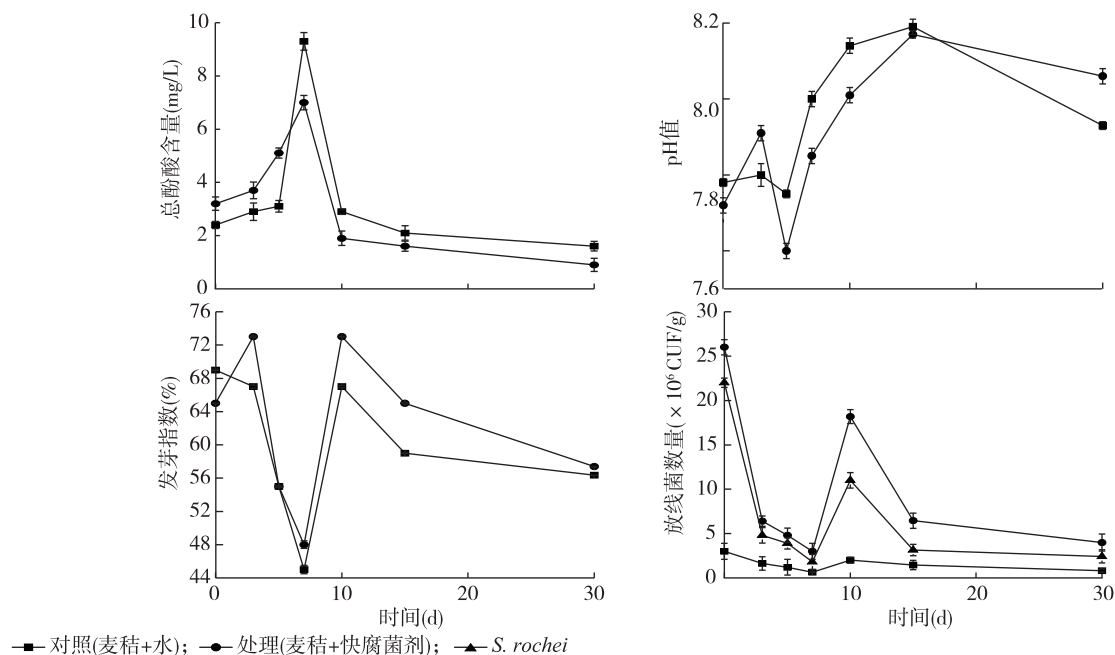


图 1 麦秸腐解过程中酚酸、pH 值、发芽指数及放线菌数量变化

Fig.1 The changes of total phenolic acid, pH, germination index (GI) and actinomyces quantity in the process of wheat straw decomposing

pH 值是麦秸腐解过程中的一个重要参考指标,酚酸类物质可以改变土壤 pH 值,会直接影响微生物中各种酶的活性^[31]。由图 1 可以看出,对照组和处理组 pH 值变化趋势基本相同,且与总酚酸浓度变化形成鲜明的对照,即总酚酸浓度越高,pH 值越低,反之亦然。

Zucconi 等认为,发芽指数法是检验有机质腐熟度的一种非常直接和有效的方法^[32]。从图 1 中可以看出麦秸腐解过程中发芽指数 (GI) 的变化:随着总酚酸浓度提高,发芽指数下降;总酚酸浓度降低,发芽指数增加。这表明麦秸腐解中产生的酚酸对种子发芽具有一定抑制作用,这与顾元等^[33]结果相一致。Kole 等^[34]认为酚酸抑制种子萌发所需的关键酶类,进而抑制了种子萌发与生长。此外,酚酸类物质还会直接影响微生物的种群数量和微生物的酶活性,进而影响有机质和矿质元素的转化,最终影响微生物对营养元素的吸收利用^[35]。由图 1 可见麦秸腐解前期,放线菌和娄彻氏链霉菌处于环境适应期,

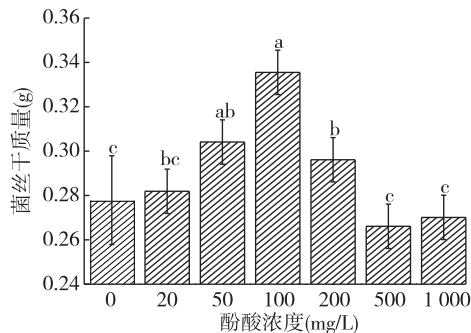
其数量都急剧减少,第 7 d 酚酸类物质的积累达到最大值,此时放线菌和娄彻氏链霉菌的数量均降至最小值,表明酚酸积累对微生物生长繁殖有一定抑制作用。随后,可能由于微生物逐渐适应了新环境,或分解利用部分酚酸类物质,同时也由于麦秸中易利用有机碳含量的减少,酚酸产生速度降低,放线菌的数量进而开始增加,并在第 10 d 达到了最大值。此后,由于营养物质消耗殆尽,放线菌数量又开始减少,腐解后期趋于平稳。

2.2 娄彻氏链霉菌对酚酸的响应

2.2.1 酚酸对娄彻氏链霉菌生物量的影响

酚酸是麦秸腐解产生的主要化感物质,研究不同浓度酚酸对娄彻氏链霉菌影响,可以表征 *S. rochei* 菌株对麦秸化感物质的耐受能力。由图 2、图 3 可以看出,在液体培养中,当酚酸浓度为 100 mg/L 时菌丝干质量最大(0.335 5 g),酚酸浓度为 1 000 mg/L 时菌丝干质量最小(仅为 0.266 1 g);在平板培养基上,培养 4 d,菌落在不同浓度(0 mg/L、20 mg/L、50

mg/L、100 mg/L、500 mg/L 和 1 000 mg/L) 酚酸培养基上平均直径分别为 1.98 mm、1.93 mm、2.25 mm、2.53 mm、1.78 mm、1.90 mm 和 1.73 mm。酚酸对菌株生长的影响趋势与液体培养结果相一致,即当酚酸浓度为 100 mg/L 时,菌落直径最大;酚酸浓度为 1 000 mg/L 时,菌落直径最小。可见娄彻氏链霉菌对酚酸有一定耐受性,适当浓度的酚酸对娄彻氏链霉菌生长有一定促进作用,当酚酸浓度为 100 mg/L 时,促进作用最为明显,这可能是因为低浓度的酚酸在一定程度上改变了细胞膜的通透性,使细胞容易从环境中摄取营养,有利于其生长。当酚酸浓度超过细胞膜能承受的阈值时就会引起细胞膜的破坏,不利于其生长繁殖^[36-37]。



不同字母表示差异达到 0.05 显著水平。

图2 不同酚酸浓度对娄彻氏链霉菌生物量的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of phenolic acids on *S. rochei* biomass

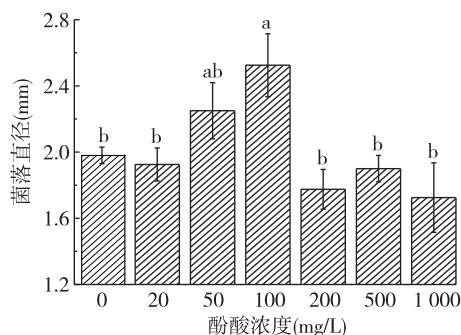


图3 不同酚酸浓度对娄彻氏链霉菌菌落直径的影响

Fig.3 Effects of different concentrations of phenolic acids on colony diameter of *S. rochei*

2.2.2 酚酸对娄彻氏链霉菌纤维素酶活性的影响

纤维素酶活性高低反映了快腐菌对秸秆的降解能力。分析不同酚酸浓度下娄彻氏链霉菌纤维素酶活

性变化(图4)发现,培养初期(第2 d),除对照外,所有处理组纤维素酶活性都下降,可能是由于娄彻氏链霉菌对酚酸较敏感,酚酸对娄彻氏链霉菌生长有抑制作用。菌株短暂适应后,纤维素酶活性明显上升,这可能与碳源添加和尿素调节 C/N 比有关,随着土壤中有效碳、氮的增加纤维素酶活性会升高^[38-39];至第3 d 增加到最大值(0.535 8 U/mL),3 d 后纤维素酶活性平稳下降。除对照外,不同酚酸浓度处理纤维素酶活性变化趋势基本相同。

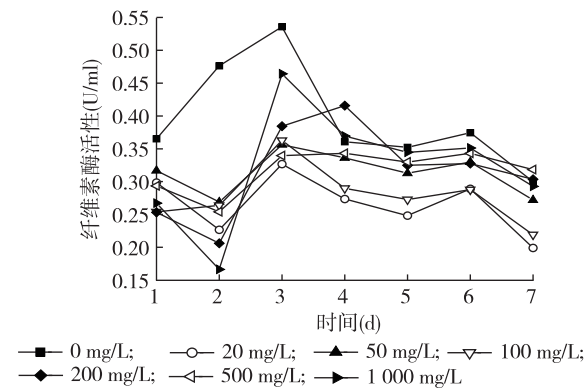


图4 不同酚酸浓度下娄彻氏链霉菌菌株纤维素酶活力的动态变化

Fig.4 The dynamic changes of cellulase activity of *S. rochei* under different phenolacetic acid concentrations

2.2.3 娄彻氏链霉菌对酚酸的降解 在模拟麦秸还田试验中,总酚酸浓度先增加后下降(图1)。为弄清娄彻氏链霉菌对较高浓度酚酸的耐受能力及其对酚酸的降解能力,取总酚酸浓度分别为 100 mg/L、200 mg/L 2 个处理,发现在此浓度下娄彻氏链霉菌可生长,进一步分析各酚酸含量变化,并计算其降解率(图5)。

从图5可以看出,娄彻氏链霉菌对不同酚酸的降解速率差异很大,其中对羟基苯甲酸降解最快,而对水杨酸的降解能力较弱。在总酚酸浓度分别为 100 mg/L、200 mg/L 条件下,对羟基苯甲酸的降解率变化趋势相似,3 d 后其降解率均达 100%;同样,不同浓度的丁香酸、阿魏酸的降解速率变化趋势相似。而水杨酸的降解速率在 100 mg/L 浓度下,娄彻氏链霉菌表现出一定的降解能力,但在总酚酸浓度为 200 mg/L 条件下,水杨酸降解受阻,在培养后期,水杨酸浓度还出现增加趋势,其原因还需深入研究。

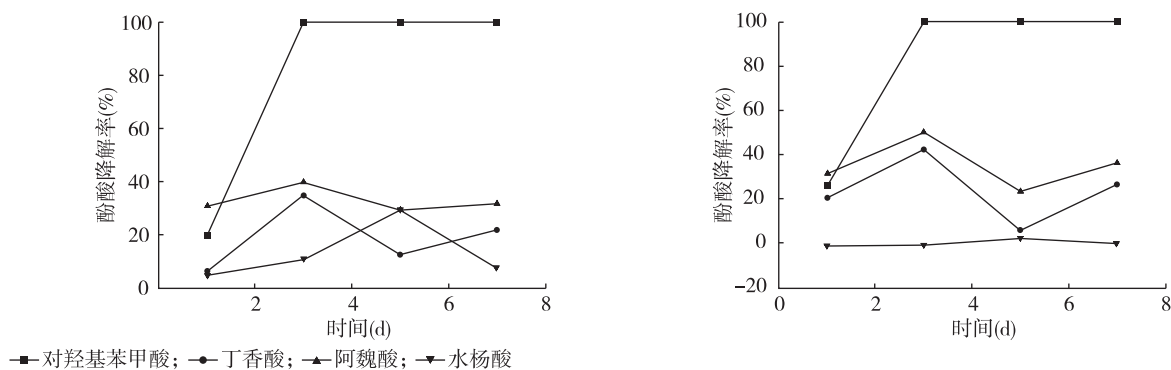


图5 100 mg/L (左) 和 200 mg/L (右) 2 种浓度处理下 4 种酚酸降解率的动态变化

Fig.5 The dynamic changes of four phenolic acid degradation rate with 100 mg/L (left) and 200 mg/L (right) of phenolic acids

3 讨论

植物残体在土壤分解中会产生酚酸等化感物质^[40-41],本研究麦秸还田模拟试验中也有同样结果。麦秸腐解过程中总酚酸随还田时间延长而逐渐增加,到第 7 d 总酚酸累积量达最大值,此时 *S. rochei* 数量及发芽指数均最小;随着腐解进程继续进行,总酚酸浓度逐步下降,到第 10 d, *S. rochei* 数量与发芽指数达到最大值。这说明接种秸秆快腐菌可缓解总酚酸积累,减少酚酸类物质对作物生长的影响,腐熟剂有缓解麦秸腐解物对种子萌发的抑制作用,同时快腐菌 *S. rochei* 的生长繁殖也受到总酚酸积累影响。进一步试验结果表明,化感物质(总酚酸)对接种植物菌株的影响与其浓度有密切关系。当酚酸浓度为 100 mg/L 时,菌株生长量和菌落直径达到了最大值,说明低浓度酚酸有促进其生长繁殖的能力,这与顾元等^[33]的研究结果一致;随着总酚酸浓度逐步增加,总酚酸开始抑制 *S. rochei* 生长繁殖,还影响 *S. rochei* 胞外纤维素酶活性,这种微生物酶活性的改变主要是由于化感物质改变了微生物胞内酶与胞外酶比例或酶的构象或细胞膜透性所致^[42-43]。研究中还发现, *S. rochei* 对酚酸具有一定降解能力,这种降解能力大小受酚酸浓度与种类的影响。说明快腐菌在对还田秸秆降解的同时,会受到其化感物质的影响,因此在筛选与使用秸秆快腐菌时,应充分考虑还田秸秆可能产生的化感效应。Inderjit^[44]研究发现土壤微生物能将一些化感活性物质降解为非化感活性物质,在解毒同时也能将本身没有活性的物质转变为化感活性物质,或使有活性或无活性的化感物质分解成活性更大的物质^[45]。

本试验中仅测定了各酚酸浓度,并未研究酚酸的化感作用大小及酚酸代谢产物。因此,在实际秸秆还田条件下,秸秆快腐菌对麦秸化感物质的降解途径及影响因素还有待进一步研究。本研究中,在秸秆快腐菌的作用下,麦秸还田过程中酚酸含量出现消长, *S. rochei* 对酚酸有一定的耐受性,适宜酚酸浓度下 *S. rochei* 能利用酚酸并促进菌体的生长,利于还田秸秆腐熟。但是 *S. rochei* 对酚酸的具体转化过程和代谢途径还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 薛艳凤,陈新华,张璐,等. 江苏秸秆还田及综合配套技术日趋完善[J]. 农机科技推广, 2015(8): 37-38.
- [2] 金亚征,忻龙祚,王建民,等. 华北平原小麦、玉米一年两作区长期秸秆全量还田对夏玉米产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(3): 527-533.
- [3] GATHALA M K, TIMSINA J, ISLAM M S, et al. Conservation agriculture based tillage and crop establishment options can maintain farmers' yields and increase profits in South Asia's rice-maize systems; Evidence from Bangladesh [J]. Field Crops Research, 2015, 172: 85-98.
- [4] 刘冲,王茂文,刘兴华,等. 苏北沿海滩涂秸秆还田对大麦生长及土壤质量的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(7): 414-415, 425.
- [5] GATHALA M K, TIMSINA J, ISLAM M S, et al. Productivity, profitability, and energetics: A multi-criteria assessment of farmers' tillage and crop establishment options for maize in intensively cultivated environments of South Asia [J]. Field Crops Research, 2016, 186: 32-46.
- [6] 常志州,陈新华,杨四军,等. 稻麦秸秆直接还田技术发展现状及展望[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(4): 909-914.
- [7] MISHRA A K, AGGARWAL P, BHATTACHARYA R, et al. Least limiting water range for two conservation agriculture cropping systems in India [J]. Soil and Tillage Research, 2015, 150: 43-56.

- [8] 施凯峰,孙光佑,李超,等. 秸秆速腐还田条件下氮肥用量对小麦幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 94-96.
- [9] BERTRAND S, BOHNI N, SCHNEE S, et al. Metabolite induction via microorganism co-culture: A potential way to enhance chemical diversity for drug discovery[J]. Biotechnology Advances, 2014, 32(6): 1180-1204.
- [10] 江怀燕,潘建清,陈一定,等. 腐熟剂作用下油菜秸秆还田对土壤性状与单季稻产量的影响[J]. 浙江农业科学, 2014(5): 636-638.
- [11] 匡恩俊,迟凤琴,宿庆瑞,等. 3种腐熟剂促进玉米秸秆快速降解特征[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(5): 432-436.
- [12] 马新平,胡健,刘敏,等. 失重率法测定秸秆腐熟剂对小麦秸秆腐熟度试验研究[J]. 上海农业科技, 2014(4): 36, 75.
- [13] 易镇邪,符呈祥,褚百凤,等. 快腐剂处理还田早稻秸秆对晚季土壤化学与生物学特性的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(27): 94-98.
- [14] 于建光,常志州,李瑞鹏,等. 农艺措施对麦秸腐解初期生化特征的影响[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(6): 1252-1257.
- [15] 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.
- [16] 李小容,李蕾. 植物化感物质与土壤微生物的研究进展[J]. 广东农业科学, 2013(12): 178-181.
- [17] 杜英君,靳月华. 连作大豆植株化感作用的模拟研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(2): 209-212.
- [18] SINGH H P, BATISH D R, PANDHER J K, et al. Assessment of allelopathic properties of *Parthenium hysterophorus* residues[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, 95(2/3): 537-541.
- [19] INDERJIT, RAWAT D S, FOY C L. Multifaceted approach to determine rice straw phytotoxicity[J]. Canadian Journal of Botany, 2004, 82(2): 168-176.
- [20] 吴凤芝,王伟. 大棚番茄土壤微生物区系研究[J]. 北方园艺, 1999(3): 1-2.
- [21] YAMANE A, NISHIMURA H, MIZUTANI J. Allelopathy of yellow fieldcress (*Rorippa sylvestris*): Identification and characterization of phytotoxic constituents[J]. Journal of Chemical Ecology, 1992, 18(5): 683-691.
- [22] YU J Q, MATSUI Y. Phytotoxic substances in root exudates of cucumber[J]. Journal of Chemical Ecology, 1994, 20(1): 21-31.
- [23] 谢星光,陈晏,卜元卿,等. 酚酸类物质的化感作用研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6417-6428.
- [24] 钱玉婷. 秸秆常温腐解菌的筛选及其生长特性研究[D]. 南京:南京农业大学, 2009.
- [25] 周淑霞. 一种含链霉菌的腐熟菌剂在麦秸还田中的初步应用研究[D]. 南京:南京师范大学, 2013.
- [26] 马云华,王秀峰,魏珉,等. 黄瓜连作土壤酚酸类物质积累对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 11(16): 145-149.
- [27] 刘朝霞,邹坤,周媛,等. 酶法预处理苧麻叶提取总酚酸的工艺优化[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(10): 2105-2107.
- [28] 汤江武,朱利中. 不同堆肥条件对种子发芽指数影响的研究[J]. 浙江农业科学, 2008(5): 583-586.
- [29] 康纪婷,吴翔,甘炳成,等. 纤维素酶活力测定方法[J]. 河北农业科学, 2010, 14(4): 151-153.
- [30] 周淑霞,于建光,赵莉,等. 不同有机物料腐熟剂对麦秸的腐解效果[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(11): 347-350.
- [31] 李文学,李力,李俊,等. 小麦秸秆高效腐解菌复合系 WSS-1 的选育及其菌群分析[J]. 生态学报, 2010, 30(3): 759-764.
- [32] ZUCCONI F, FORTE M, MONAC A, et al. Evaluating toxicity of immature compost[J]. Biocycle, 1981, 22: 54-57.
- [33] 顾元,常志州,于建光,等. 外源酚酸对水稻种子和幼苗的化感效应[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(2): 240-246.
- [34] KOLE R K, KARMARKER P R, POI R, et al. Allelopathic inhibition of teak leaf extract: a potential pre-emergent herbicide[J]. Journal of Crop and Weed, 2011, 7(1): 101-109.
- [35] 林开敏,叶发茂,林艳,等. 酚类物质对土壤和植物的作用机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5): 1130-1137.
- [36] 张庭钰,吴安平,何梅,等. 酚酸类物质对水华藻类的化感作用及其机理[J]. 中国环境科学, 2007, 27(4): 472-476.
- [37] 胡元森,吴坤,李翠香,等. 酚酸物质对黄瓜幼苗及枯萎病菌菌丝生长的影响[J]. 生态学报, 2007, 26(11): 1738-1742.
- [38] 倡国涵,赵书军,王瑞,等. 连年翻压绿肥对植烟土壤物理及生物性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 905-912.
- [39] 樊晓刚,金轲,李兆君,等. 不同施肥和耕作制度下土壤微生物多样性研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 744-751.
- [40] HAN L M, WANG S Q, JU H Y, et al. Identification and allelopathy on the decomposition products from soybean stubs[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(5): 771-778.
- [41] MA R X, LIU X F, YUAN G L. Study on allelochemicals in the process of decomposition of wheat straw by microorganisms and their bioactivity[J]. Acta Ecol Sin, 1996, 6: 632-639.
- [42] URIBE C S, GUERRERO P C, KING B, et al. Allelochemicals targeting the phospholipid bilayer and the proteins of biological membranes[J]. Allelopathy Journal, 2008, 21: 1-24.
- [43] 袁光林,马瑞霞,刘秀芬,等. 化感物质对土壤脲酶活性的影响[J]. 环境科学, 1998, 19(2): 55-57.
- [44] INDERJIT. Soil microorganisms: An important determinant of allelopathic activity[J]. Plant and Soil, 2005, 4(274): 227-236.
- [45] FISCHER N H, WILLIAMSON G B, WEIDENHAMER J D, et al. In search of allelopathy in the Florida scrub: The role of terpenoids[J]. Journal of Chemical Ecology, 1994, 20(6): 1355-1380.

(责任编辑:张震林)