

促腐条件下小麦玉米秸秆还田土壤 养分变化特征研究

牛 怡^{1,2},张仁陟^{1,2,3},蔡立群^{1,2,3},张 军^{1,2,3},岳 丹^{1,2},周 欢^{1,2}

(1.甘肃省干旱生境作物学重点实验室,甘肃 兰州 730070; 2.甘肃农业大学资源与环境学院,甘肃 兰州 730070;
3.甘肃省节水农业工程技术研究中心,甘肃 兰州 730070)

摘 要:采用盆钵培养法,模拟定西市李家堡镇典型的黄土高原旱作农业区旱作覆膜方式,通过秸秆添加腐解剂还田研究小麦秸秆、玉米秸秆腐解 120 d 土壤养分含量的动态变化特征。结果表明:在小麦秸秆、玉米秸秆 120 d 的腐解过程中,各处理土壤有机质、碱解氮、全氮的增加速率一致表现为先增后减,土壤磷素、钾素的增加速率变化趋势为增—减—增—减;添加腐解剂处理的土壤养分增加速率均大于秸秆直接还田(对照),培肥土壤效果明显;小麦、玉米秸秆添加腐解剂 F3 的处理土壤养分含量高于其他处理,即内含具特殊功能的芽孢杆菌、丝状真菌、放线菌和酵母菌的秸秆腐解剂 F3 增加土壤养分的效果最好;相同腐解剂下不同种类秸秆处理的土壤养分含量表现为:WF1>CF1,WF2≥CF2,WF3<CF3,即由好氧性的多个菌种复合培养而成的秸秆腐解剂 F1 对小麦秸秆促腐优势最大;F3 对玉米秸秆的促腐作用优于 F1 和 F2;富含分解纤维素、半纤维素、木质素和其他生物有机物质的微生物菌群的秸秆腐解剂 F2 对小麦、玉米秸秆的促腐效果基本相似。

关键词: 秸秆还田;小麦秸秆;玉米秸秆;腐解剂;土壤养分;动态特征

中图分类号: S153.6+1,S154.3 **文献标志码:** A

Dynamic characteristics of fertilized soil with wheat and corn straws under decomposition conditions

NIU Yi^{1,2}, ZHANG Ren-zhi^{1,2,3}, CAI Li-qun^{1,2,3}, ZHANG Jun^{1,2,3}, YUE Dan^{1,2}, ZHOU Huan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Gansu Province Arid Habitat Crop, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. College of Resource and Environment, Gansu Agriculture University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. Water-saving Agricultural Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Dingxi City Lee Town is a typical dry farming area in the Loess Plateau. In this area, agricultural production usually uses a planting method, named whole film double furrow sowing. In this research, to investigate the dynamic characteristics of soil nutrients and soil microbial biomass during the process of decomposing wheat and corn straw for 120 d, a pot cultivation method, simulating the actual planted production in this area, was employed by adding different kinds of straws. The results showed that after 120 days of decomposition, the increasing rates of soil organic matter and nitrogen with each treatment tended to increase in the early time, and then became decreased. The rates of soil phosphorus and potassium appeared an increase – decrease – increase – decrease trend. Fields with straw return by adding decomposition accelerators could improve the increasing rates of soil nutrients. The soil nutrients using different straws with the decomposition accelerator F3 (including Bacillus, filamentous fungi, actinomycetes and yeasts with special features) were higher than those with other treatments. The soil nutrients using different straw treatments with the same decomposition accelerator performance in an order of the following: WF1>CF1, WF2≥CF2, and WF3<CF3. It was concluded that among three different decomposition accelerators, F1 (obtained through multiple aerobic complex strains with a strong ability to decompose cellulose, hemicelluloses, lignin and other organic ingredients of organic wastes) was the best in

收稿日期:2014-03-21
基金项目:国家自然科学基金项目(31160269);“十二·五”《循环农业科技工程》(2012BAD14B03);甘肃省干旱生境作物学重点实验室—省部共建国家重点实验室培育基地开放基金课题(GSCS-2013-13);甘肃省高等学校研究生导师科研项目计划(1002-09)
作者简介:牛 怡(1988—),女,甘肃白银人,硕士研究生,研究方向为土壤生态学。E-mail:niuyi618@163.com。
通信作者:张仁陟(1961—),男,甘肃静宁县人,教授,博士生导师,研究方向为农业生态学。E-mail:zhangrz@gsau.edu.cn。

promoting the decomposition of wheat, and F2 (rich in microbial flora which contains straw decomposing ingredient such as cellulose, hemicelluloses, lignin and other bio – organic substances) played a same role in promoting wheat and corn straw decompositions.

Keywords: straw returning; wheat straw; corn straw; decomposed agent; soil nutrients; dynamic characteristics

农作物秸秆是农业生产的主要副产品,也是一种重要的具有可再生性的生物能源,富含氮、磷、钾以及中微量营养元素^[1-2]。中国的秸秆资源丰富,在农业生产中每年产生的秸秆资源量约在 7 亿 t^[3]。秸秆还田后通过土壤微生物的作用,能够增加土壤有机质,提高土壤养分含量,促进土壤酶活性,改善土壤物理结构等^[4-9]。因此,秸秆还田是直接有效的作物秸秆利用途径,同时也是促进农业可持续发展的重要措施和途径之一。

为增加秸秆还田效应,秸秆腐解剂成为秸秆还田研究的热点。秸秆腐解剂是一种高效的微生物制剂,含有大量的各种微生物群体。大量研究表明^[10-14],添加腐解剂可促进作物秸秆腐解,缩短腐解转化时间,并增加其养分释放量。但也有研究表明,添加腐解剂并不能促进秸秆腐解^[15]。为此本试验以黄土高原旱作农业区典型的覆膜耕作方式下自产的小麦、玉米秸秆为研究对象,模拟黄土高原旱作农业区的耕作模式,旨在通过研究不同腐解剂条件

下作物秸秆腐解过程中土壤养分变化特征,为该区域秸秆还田与合理施肥提供科学可靠的理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验所用土壤采自位于陇中黄土高原半干旱区丘陵沟壑区的定西市安定区李家堡镇甘肃农业大学试验点。土壤为典型的黄绵土,土质软绵,土层深厚,质地均一,贮水性能良好。土样采样深度为 0 ~ 30 cm。采集后的土壤捡去可见有机物。供试土壤基本理化性质为:平均 pH 值 8.1,0 ~ 200 cm 土壤容重 1.18 g·cm⁻³,田间持水量为 21.51%,有机质 16.04 g·kg⁻¹,碱解氮 51.10 mg·kg⁻¹,有效磷 21.19 mg·kg⁻¹,速效钾 100.9 mg·kg⁻¹,全氮 1.55 g·kg⁻¹,全磷 0.821 g·kg⁻¹,全钾 14.39 g·kg⁻¹。采集成熟后的玉米、小麦的茎叶混合物,将秸秆剪成 2 ~ 3 cm 小段,风干备用。

表 1 秸秆腐解剂介绍
Table 1 Introduction of straw decomposition

名称 Name	特性 Characteristics	使用说明 Introduction for use
有机废物发酵菌曲(F1) Organic waste fermentation bacteria	由好氧性的多个菌种复合培养而成,对有机废物中的纤维素、半纤维素、木质素等有机成分有很强的分解能力 Training by multiple aerobic complex strains, it has a strong ability to decompose the cellulose, hemicelluloses, lignin and other organic ingredients of organic waste	用量为秸秆总量的 2‰,注意使菌曲与秸秆均匀接触 2‰ of the total amount of straw, uniform contact of the accelerator and straw
微生物腐解剂(F2) Microbial agents	富含分解纤维素、半纤维素、木质素和其它生物有机物质的微生物菌群 Rich in microbial flora which contains straw decomposing ingredient such as cellulose, hemicelluloses, lignin and other bio-organic substances	每 1 000 kg 作物秸秆用腐解剂 2 kg、尿素 5 ~ 10 kg 或碳铵 15 ~ 20 kg 1 000 kg crop straw adding 2 kg straw decomposing accelerator and urea 5 ~ 10 kg or ammonium bicarbonate 15 ~ 20 kg
“满园春”生物发酵剂(F3) “Manyuanchun” bio-fermentation	内含具特殊功能的芽孢杆菌、丝状真菌、放线菌和酵母菌 Including Bacillus, filamentous fungi, actinomycetes and yeasts with special features	按 0.3% ~ 0.5% 的添加量(干基计算) The added amount of 0.3% ~ 0.5% (dry basis)

1.2 试验设计

采用室内盆钵培养法,在甘肃农业大学定西市李家堡镇试验点进行培养试验。培养试验在开放、通风的遮雨棚下进行,以保持培养环境与当地实际情况一致,起止时间为 2013 年 7 月 1 日至 2013 年 11 月 1 日。供试容器采用直径 30 cm、高 50 cm 的塑料盆。每盆装土 2 kg,加入 2 % 的秸秆,按照使用说明加入相应量的秸秆腐熟剂(见表 1),同时设置不加秸秆腐熟剂的处理作为对照。将供试秸秆与土

壤、秸秆腐解剂混合均匀放入盆中,花盆上方覆盖地膜。培养过程中,隔一定时间补充水分,保持盆中土壤水分是田间持水量的 60%。每隔 20 d 取样,共取 6 次。试验共设置 8 个处理,每个处理重复 3 次,具体情况见表 2。

1.3 测定项目及方法

土壤有机质用重铬酸钾 – 浓硫酸外加热法;全氮用凯氏定氮法;全磷用酸溶钼锑抗比色法。全钾用氢氧化钠熔融 – 火焰光度法;碱解氮用碱解扩散

法;有效磷用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;速效钾用醋酸铵提取-火焰光度法测定^[16]。

表 2 试验处理描述
Table 2 Treatment description

代码 Code	处理 Treatments
W	小麦秸秆 Wheat straw
WF1	小麦秸秆 + 有机废物发酵菌曲 (F1) Wheat straw adding Organic waste fermentation bacteria
WF2	小麦秸秆 + 微生物腐秆剂 (F2) Wheat straw adding Microbial agents
WF3	小麦秸秆 + “满园春”生物发酵剂 (F3) Wheat straw adding “Manyuanchun” bio-fermentation
C	玉米秸秆 Corn straw
CF1	玉米秸秆 + 有机废物发酵菌曲 (F1) Corn straw adding organic waste fermentation bacteria
CF2	玉米秸秆 + 微生物腐秆剂 (F2) Corn straw adding microbial agents
CF3	玉米秸秆 + “满园春”生物发酵剂 (F3) Corn straw adding “Manyuanchun” bio-fermentation

土壤微生物量碳、氮含量采用氯仿熏蒸浸提法^[17]测定。土壤微生物量碳 $BC(mg \cdot kg^{-1}) = EC/0.38$;土壤微生物量氮 $BN(mg \cdot kg^{-1}) = EN/0.45$ 。其中 0.38 和 0.45 分别为土壤微生物量碳和氮的系数;EC 和 EN 分别为熏蒸和未熏蒸土壤 K_2SO_4 浸提

液有机碳和全氮含量的差值。

2 结果与分析

2.1 土壤有机质含量动态变化

土壤有机质是衡量土壤肥力水平的一个重要指标。随着腐解时间的增加,小麦、玉米秸秆各处理土壤有机质增加速率呈下降趋势,经过 120 d 后,各处理土壤有机质增加速率从 $0.010 \sim 0.017 g \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$ 下降到 $0.001 \sim 0.004 g \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$ (见图 1)。由于气温适宜,秸秆还田初期(7 月 1 日至 7 月 20 日)土壤有机质增加速率最快,之后随着气温升高,土壤水分蒸发量增加,土壤有机质增加速率逐渐下降。其中,在第 2 次取样时(8 月 9 日)下降最快,之后一段时间内基本保持不变。至最后一次取样时(10 月 28 日)由于气温下降,土壤微生物活性降低,土壤有机质增加速率再次下降。秸秆腐解剂与秸秆、土壤接触后,在适宜的环境条件下,通过促进土壤微生物的矿化作用,增加土壤有机质。添加腐解剂的处理与对照处理在整个腐解过程中差异明显,前者土壤有机质增加速率明显大于后者,小麦秸秆处理大于玉米秸秆处理。三种秸秆腐解剂处理后,经过一段时间的培养,秸秆添加“满园春”生物发酵剂(F3)处理增加土壤有机质含量效果最好。

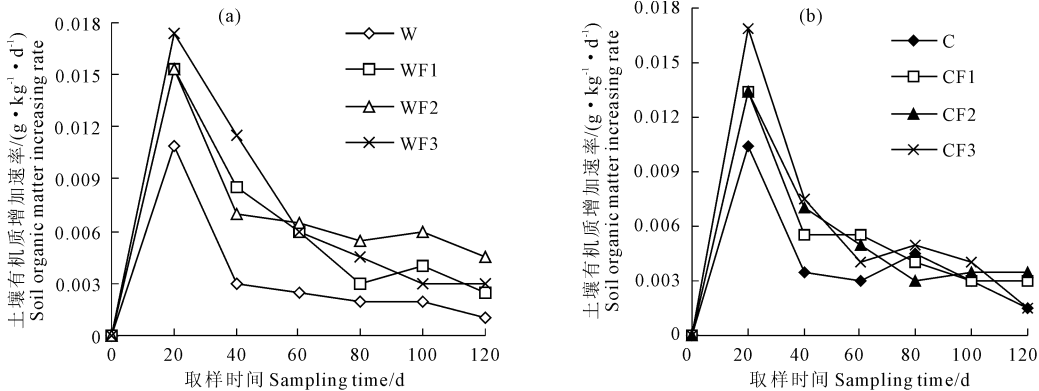


图 1 促腐条件下小麦(a)、玉米秸秆(b)腐解土壤有机质含量变化动态
Fig.1 Dynamic changes of soil organic matters at different sampling time with different treatments

2.2 土壤氮素含量动态变化

2.2.1 土壤碱解氮含量变化情况 氮素是作物的营养之首,而土壤是作物氮素营养的主要来源。土壤碱解氮也叫有效氮,在土壤中的含量不够稳定,易受土壤水热条件和生物活动的影响而发生变化,但它能反映近期土壤的氮素供应能力,对指导科学合理施肥意义重大。由图 2a 可知,随着腐解时间的增加,小麦秸秆各处理土壤碱解氮含量增加速率均表现为先增加后降低最后趋于稳定的趋势。在试验初

期(20 d),各处理土壤碱解氮含量增加速率最快,在 20~40 d 腐解阶段,伴随着气温的持续升高,土壤蒸发量增加,土壤水分含量下降,土壤碱解氮含量增加速率明显下降,仅为原来的 3.70%~10.31%,40 d 后土壤碱解氮含量增加速率变化趋于平缓。玉米秸秆各处理土壤碱解氮含量增加速率与小麦秸秆各处理有所不同,表现为腐解初期土壤碱解氮增加速率先上升后小幅度减小,当腐解时间在 120 d 时,由于气温下降,土壤碱解氮增加速率下降明显(见图

2b)。腐解剂进入土壤后,其中的微生物与土壤中原有微生物形成竞争状态,对此,土壤会有一个适应的过程,因此,处理 C 增加速率变化趋势不同于添加腐解剂的处理,在腐解初期土壤碱解氮含量增加速率上升后基本保持不变,直至 120 d,而后者则表现

为土壤碱解氮含量增加速率上升与下降并存,60 ~ 80 d 时增加速率甚至小于前者。综合整个 120 d 的腐解过程中小麦、玉米秸秆各处理土壤碱解氮含量增加速率变化情况,玉米秸秆处理大于小麦秸秆处理,添加秸秆腐解剂处理大于对照处理。

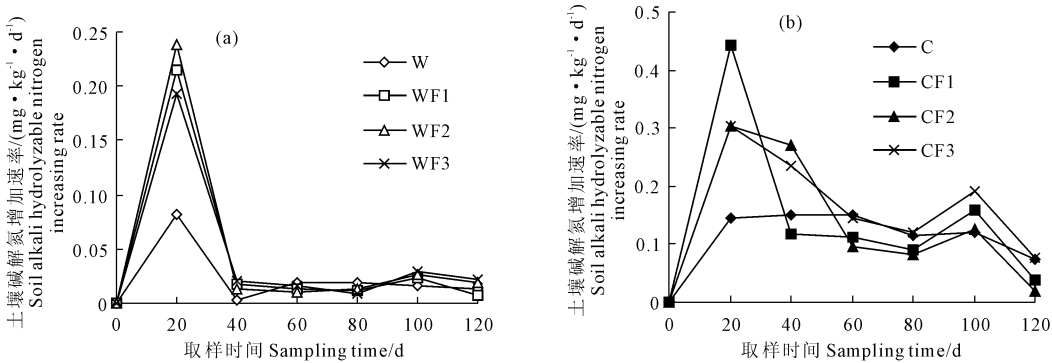


图 2 促腐条件下小麦(a)、玉米秸秆(b)腐解土壤碱解氮含量变化动态

Fig.2 Dynamic changes of soil alkali hydrolyzable nitrogen at different sampling time with different treatments

2.2.2 土壤全氮含量变化情况 土壤中的全氮含量代表着土壤氮素的总贮量和供氮潜力。因此,全氮含量与有机质一样是土壤肥力的主要指标之一。由图 3 可知,随着腐解时间的增加,各处理土壤全氮含量增加速率呈降低趋势。土壤氮素绝大部分来自于土壤有机质,因此,土壤全氮含量增加速率变化趋势与土壤有机质相似。与土壤碱解氮含量增加速率变化情况相比,土壤全氮含量最大增加速率(20 d)

较小,为 0.081 ~ 0.444 g · kg⁻¹ · d⁻¹。腐解 40 d 以后,对照处理表现为土壤全氮含量增加速率变化不明显。整个腐解过程中,玉米秸秆处理的土壤全氮含量增加速率前期大于小麦秸秆处理,后期小于小麦秸秆处理;添加腐解剂土壤全氮含量增加速率大于对照处理,说明添加腐解剂能够促进秸秆腐解,增加土壤全氮含量,不同腐解剂增加土壤全氮含量效果排序为 F3 > F2 > F1。

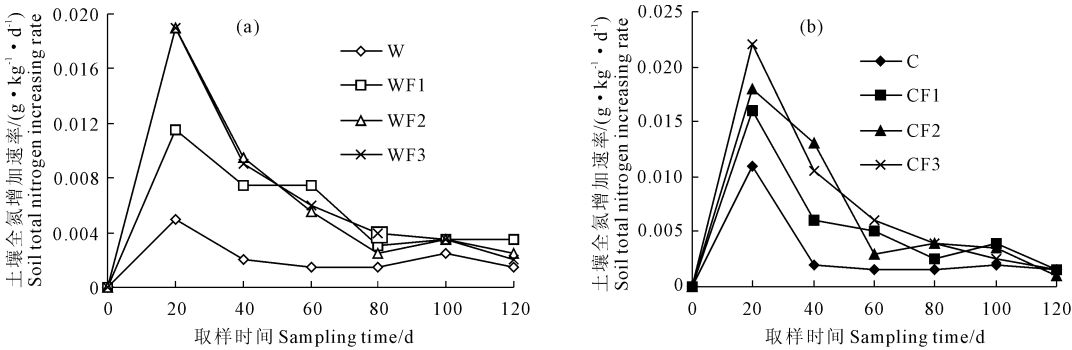


图 3 促腐条件下小麦(a)、玉米秸秆(b)腐解土壤全氮含量变化动态

Fig.3 Dynamic changes of soil total nitrogen at different sampling time with different treatments

2.3 土壤磷素含量动态变化

2.3.1 土壤有效磷含量变化情况 磷作为植物生长发育必需的大量营养元素之一,是植物生产力的重要限制因子。植物生长所需磷素主要来源于土壤,土壤中磷素的丰缺及供给状况直接影响着植物生产水平。磷素在土壤中的形态多样,相互之间不断转化,对磷肥的肥效和供肥能力产生影响。土壤有效磷又称速效磷,是土壤中可被植物吸收利用的

磷组分,其数量和强度是评价土壤磷素供应能力的一个重要指标。整个 120 d 的秸秆腐解过程中,各处理土壤有效磷含量增加速率不断变化(图 4),腐解前期土壤有效磷含量增加速率迅速上升,20 d 时出现一个小高峰,说明秸秆还田前期可固定部分土壤磷素。当秸秆中易腐解的物质腐解释放养分后,随着腐解时间的延长,较难腐解的物质开始腐解,因此,80 d(9 月 18 日)时再次出现一个小高峰(W 除

外)。与对照处理相比,添加腐解剂的处理增加幅度相对较高,说明秸秆添加腐解剂还田可提升秸秆还田培肥土壤的效果。由于小麦秸秆茎叶组织差异较小,相对易腐解,在整个腐解过程中土壤有效磷增加速率变化幅度相对较小,且小麦秸秆对照与其他处理不同,表现为呈缓慢的增加趋势,出现最大值后开

始下降。至试验结束,玉米秸秆对照处理增加速率最小,为 $0.087\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,其余处理均大于 $0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$;玉米秸秆处理提供的磷素大小排序为 $\text{CF1} > \text{CF2} > \text{CF3} > \text{C}$;小麦秸秆添加腐解剂处理中 WF3 效果最好,其次为 WF2 ,再次为 WF1 。

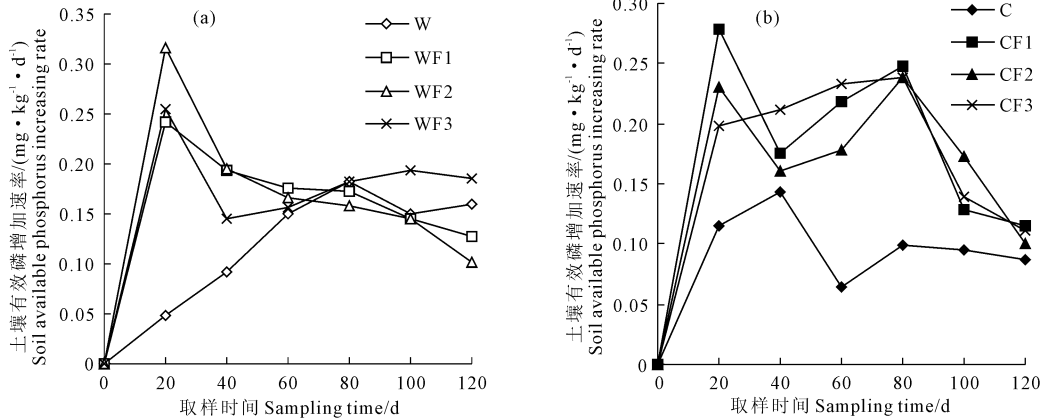


图 4 促腐条件下小麦(a)、玉米秸秆(b)腐解土壤有效磷含量动态变化

Fig.4 Dynamic changes of soil available phosphorus at different sampling time with different treatments

2.3.2 土壤全磷含量变化情况 土壤全磷量是土壤中各种形态磷素的总和,是有效说明土壤磷素肥力供应状况的一个指标。由图 5 可知,土壤全磷含量增加速率随试验时间的增加呈下降趋势,经过 120 d 的腐解,各处理的土壤全磷含量增加速率介于 $0.0007\sim0.0027\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。与玉米秸秆相比,小麦秸秆较易腐解,前期小麦秸秆腐解较快,土壤全磷

增加速率较快。至试验结束时,玉米秸秆则表现出较大的增加优势。由于玉米秸秆中,叶片较易腐解而茎秆由于纤维素含量高,组织较坚硬,较难腐解,在腐解中叶片最先腐解,之后茎秆开始腐解,因此出现了两个土壤全磷增加速率高峰。腐解剂对秸秆腐解促进作用明显,表现为 $\text{F3} > \text{F2} > \text{F1}$ 。

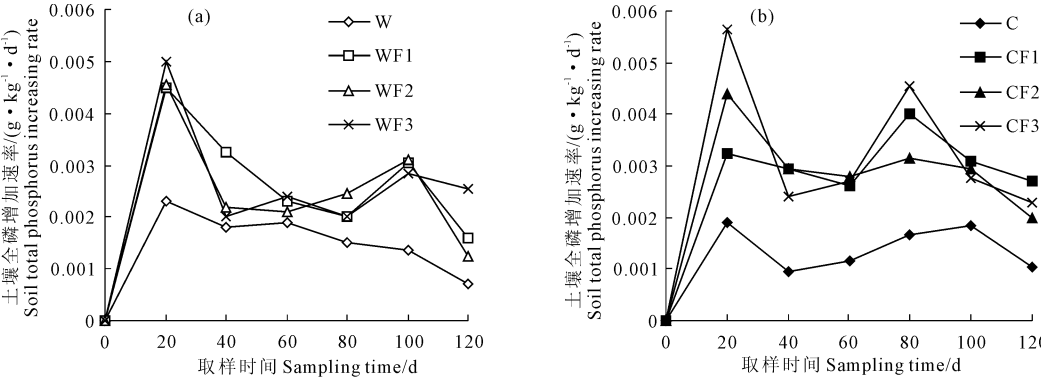


图 5 促腐条件下小麦(a)、玉米秸秆(b)腐解土壤全磷含量动态变化

Fig.5 Dynamic changes of soil total phosphorus at different sampling time with different treatments

2.4 土壤钾素含量动态变化

2.4.1 土壤速效钾含量变化情况 钾是作物的营养三要素之一,是作物体内 60 多种酶的活化剂,对作物光合作用、呼吸作用以及对糖的运输,淀粉、脂肪和蛋白质的合成均起重要的调节作用。研究土壤中的钾素含量,对农业生产中的合理施肥环节尤为

重要。而当季植物的钾营养水平主要决定于土壤速效钾的含量。随着试验时间的增加,各处理土壤速效钾增加速率呈现升-降-升-降的规律(见图 6)。由于不同秸秆本身所含养分存在差异,小麦、玉米秸秆处理分别在 20 d、100 d 和 20 d、80 d 时出现了小高峰。整个腐解过程玉米秸秆处理土壤速效钾

含量增加率均大于小麦秸秆处理,添加腐解剂处理土壤速效钾含量增加率明显高于对照处理,说明腐解剂能够有效促进秸秆腐解,促进其钾素养分释放,增加秸秆还田培肥土壤的效果。腐解剂 F2 和 F3 对小麦秸秆的效果相近,均大于 F1,对照处理最小。不同腐解剂促进玉米秸秆腐解的作用差异不明显,添加腐解剂处理与对照处理的差异也不明显。

2.4.2 土壤全钾含量变化情况 土壤全钾含量是土壤中各种形态钾含量之总和,表征了土壤钾素的供应潜力大小。由图 7 可知,在腐解时间为 40 d 时

(8 月 9 日),除处理 W 和 CF1 外,各处理土壤全钾出现最大增加速率,腐解 60 d 后,土壤全钾含量增加速率呈小幅度上升,其中添加腐解剂处理大于对照处理,玉米秸秆各处理上升幅度大于小麦秸秆各处理。与其他处理相比,小麦秸秆对照处理(W)最大速率出现时间延后至 100 d,而 CF1 处理则提前至 20 d,说明腐解剂有促进秸秆养分提前释放的效果。至试验结束,三种腐解剂增加土壤全钾含量的顺序为 F3 > F2 > F1。

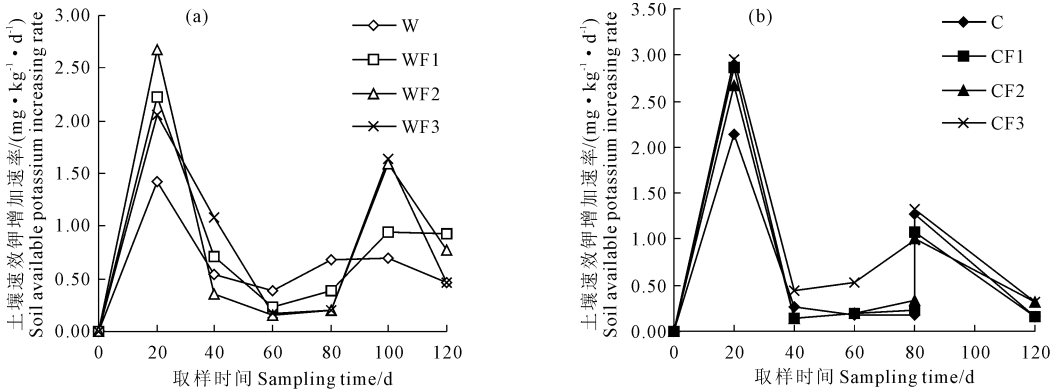


图 6 促腐条件下小麦(a)、玉米秸秆(b)腐解土壤速效钾含量动态变化

Fig.6 Dynamic changes of soil available potassium at different sampling time with different treatments

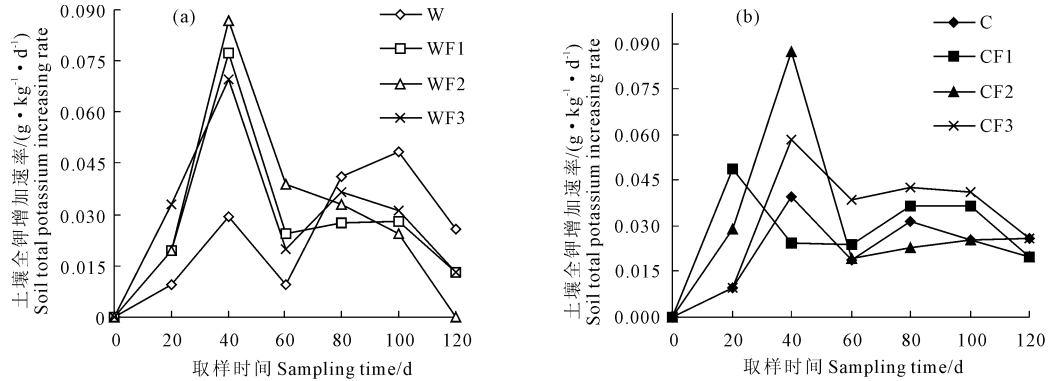


图 7 促腐条件下小麦、玉米秸秆腐解土壤全钾含量动态变化

Fig.7 Dynamic changes of soil total potassium at different sampling time with different treatments

3 结 论

在旱作覆膜条件下,秸秆添加腐解剂还田的土壤养分增加速率明显快于秸秆直接还田,培肥土壤效果明显。其中,“满园春”生物发酵剂(F3)对玉米秸秆的促腐作用要优于有机废物发酵菌曲(F1)和微生物腐秆剂(F2);有机废物发酵菌曲(F1)对小麦秸秆促腐优势在于土壤速效养分的增加量大于其它两种,而微生物腐秆剂(F2)对土壤全量养分含量的增加作用高于其他两种。

经过 120 d 腐解,各处理土壤养分增加速率总体呈现增-减-增-减的趋势。其中,试验初期(20~40 d)和临近试验末期(80~100 d)这两个阶段土壤养分增加速率出现小高峰,其余阶段则呈现明显的下降趋势。

与玉米秸秆相比,小麦秸秆在初期阶段腐解较快,土壤养分增加速率较大;后期玉米秸秆开始大量腐解,增加速率上升,并超过了小麦秸秆。总体而言,在不添加腐解剂的对照处理中,小麦秸秆还田培肥土壤的效果优于玉米秸秆。

综上所述,在旱作覆膜条件下,秸秆中加腐解剂还田可提高秸秆还田效果,能够有效培肥土壤。就试验所研究三种秸秆腐解剂来看,小麦、玉米秸秆中添加“满园春”生物发酵剂效果最好,可将模拟实验推广至大田做更深入的研究。

参 考 文 献:

[1] Trond M Henriksen, Tor A Breland. Carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities as affected by contact between crop residues and soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35:41-48.

[2] 韩鲁佳,闫巧娟,刘向阳,等.中国农作物秸秆资源及其利用现状[J].*农业工程学报*,2002,18(3):87-91.

[3] 张福锁.我国肥料产业与科学施肥战略研究报告[M].北京:中国农业大学出版社,2008:50-54.

[4] 刘荣乐,金继运,吴荣贵,等.我国北方土壤-作物系统内钾素循环特征及秸秆还田与施钾肥的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2000,6(2):123-132.

[5] 王小彬,蔡典雄,张镜清,等.旱地玉米秸秆还田对土壤肥力的影响[J].*中国农业科学*,2000,33(4):54-61.

[6] 劳秀荣,吴子一,高燕春.长期秸秆还田改土培肥效应的研究[J].*农业工程学报*,2002,18(2):49-52.

[7] 武志杰,张海军,许广山,等.玉米秸秆还田培肥土壤的效果[J].*应用生态学报*,2002,13(5):539-542.

[8] 刘世平,聂新涛,张洪程,等.稻麦两熟条件下不同土壤耕作方式与秸秆还田效用分析[J].*农业工程学报*,2006,22(7):48-51.

[9] 谭德水,金继运,黄绍文,等.不同种植制度下长期施钾与秸秆还田对作物产量和土壤钾素的影响[J].*中国农业科学*,2007,40(1):133-139.

[10] 迟凤琴,匡恩俊,宿庆瑞,等.不同还田方式下有机物料有机碳分解规律研究[J].*东北农业大学学报*,2010,41(2):60-65.

[11] 王允青,郭熙盛.不同还田方式作物秸秆腐解特征研究[J].*中国生态农业学报*,2008,16(3):607-610.

[12] 翟修彩,刘明,李忠佩,等.不同添加剂处理秸秆腐解物对红壤性质的影响[J].*土壤*,2013,45(5):868-874.

[13] 马超,周静,刘满强,等.秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳的影响[J].*土壤学报*,2013,50(5):915-921.

[14] 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.

[15] 吴琴燕,陈宏州,杨敬辉,等.不同腐解剂对麦秸秆腐解的初步研究[J].*上海农业学报*,2010,26(4):83-86.

[16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.

[17] 李振高,骆永明,滕应.土壤与环境微生物研究法[M].北京:科学出版社,2008,322-331.

(上接第 151 页)

[22] 周礼恺,张志明,陈恩凤.黑土的酶活性[J].*土壤学报*,1981,18(2):158-165.

[23] 王天元,宋雅君,滕鹏起.土壤脲酶及脲酶抑制剂[J].*化学工程师*,2004,107(8):22-24.

[24] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoals: A review [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002,35(4):219-230.

[25] 和文祥,朱铭莪,张一平.土壤酶与重金属关系的研究现状[J].*土壤与环境*,2000,9(2):139-142.

[26] Frankenberger J R, Johan son J B, Nelson C O. Urease activity in sewage sludge amended soils[J]. *Soil Biol Biochem*, 1983,15:543-549.

[27] 张雯,耿增超,陈心想,等.生物质炭对盐土改良效应研究[J].*干旱地区农业研究*,2013,31(2):73-77.

[28] Zhang W J, Li Z F, Zhang Q Z, et al. Impacts of biochar and nitrogen fertilizer on spinach yield and tissue nitrate content from a pot ex-

periment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011,30(10):1946-1952.

[29] Jeffery S, Verheijen F G A, van der Velde M, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011,144(1):175-187.

[30] Zhong X M, Zhu Y N, Liu J, et al. Influence of bamboo-charcoal coating on N leaching and effectiveness of fertilizers[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006,25(Supplement):154-157.

[31] Khan M A, Kim K W, Wang M Z, et al. Nutrient-impregnated charcoal: an environmentally friendly slow-release fertilizer[J]. *The Environmentalist*, 2008,28(3):231-235.

[32] Lu G Y, Zhang Y, Wang X F, et al. Effects of carbon base fertilizers on soil physical properties and maize yield[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2011,15(5):50-53.