

陆水凤,王呈玉,王天野,等. 玉米秸秆配施菌剂还田对土壤养分及腐殖质组成的影响[J].江苏农业学报,2019,35(4):834-840.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2019.04.012

玉米秸秆配施菌剂还田对土壤养分及腐殖质组成的影响

陆水凤^{1,2}, 王呈玉^{1,2}, 王天野^{1,2}, 常洪艳^{1,2}, 高云航³, 刘淑霞^{1,2}

(1.吉林农业大学资源与环境学院,吉林 长春 130118; 2.吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室,吉林 长春 130118; 3.吉林农业大学动物科学技术学院,吉林 长春 130118)

摘要: 实验室模拟低温条件下,研究玉米秸秆配施不同菌剂(低温菌剂、常温菌剂)还田处理,对玉米秸秆失重率、土壤养分以及腐殖质组成的影响,为低温地区秸秆还田提供科学依据。本试验共设置4个处理,分别为CK:玉米秸秆;L:玉米秸秆+低温菌剂;M:玉米秸秆+常温菌剂;LM:玉米秸秆+低温菌剂+常温菌剂,每个处理3次重复,放置在培养箱中12℃黑暗条件下分别培养15 d、30 d、40 d、50 d和60 d。结果表明:与CK相比,配施菌剂有利于玉米秸秆的降解以及土壤速效养分的增加,改善土壤腐殖质品质,除失重率、pH和胡敏酸指标外,处理LM效果最好。随着培养时间的延长,土壤pH和有机碳呈先下降后逐渐上升的变化趋势,秸秆失重率和土壤速效磷含量逐渐增加,而土壤速效钾无明显变化。与其他处理相比,处理LM腐殖质品质有所提高。低温条件下,秸秆配施菌剂还田可以促进秸秆降解,改善土壤理化性质,尤其是低温菌剂+常温菌剂处理。本研究为寒冷地区秸秆还田提供理论依据。

关键词: 秸秆还田; 低温菌剂; 常温菌剂; 速效养分; 腐殖质; 富里酸; 胡敏酸

中图分类号: S144 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2019)04-0834-07

Effects of corn straw combined with microbial inoculum on soil nutrient and humus composition

LU Shui-feng^{1,2}, WANG Cheng-yu^{1,2}, WANG Tian-ye^{1,2}, CHANG Hong-yan^{1,2}, GAO Yun-hang³, LIU Shu-xia^{1,2}

(1.College of Resource and Environmental Science, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2.Key Laboratory of Soil Resource Sustainable Utilization for Jilin Province Commodity Grain Bases, Changchun 130118, China; 3.College of Animal Science and Technology, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: The effects of different microbial inoculum on the weightlessness rate, soil nutrients and humus composition of corn straw were studied under low temperature conditions in laboratory, which provided a scientific basis for straw returning to field in low temperature areas. Four treatments were set up in this experiment, corn straw (CK), corn straw and low temperature inoculant (L), corn straw and normal temperature inoculum (M), corn straw and low temperature inoculant and normal temperature inoculum (LM). Each treatment was

收稿日期:2018-11-29

基金项目:吉林省科技发展计划项目(20160307006NY);国家重点研发计划项目(2017YFD0300405-4);现代农业产业技术体系建设专项(nycyt-38);吉林省自然科学基金项目(20170101077JC)

作者简介:陆水凤(1989-),女,广西梧州人,硕士研究生,主要研究微生物肥料。(E-mail)18844145145@163.com。王呈玉为共同第一作者。

通讯作者:刘淑霞,(E-mail)liushuxia2005824@163.com

triplicate, and incubated in the incubator for 15 d, 30 d, 40 d, 50 d and 60 d at constant-temperature in dark. The results showed that compared with CK, straw combined with microbial agent was beneficial to the degradation of corn straw and the increase of soil available nutrients, and improved the quality of soil humus. Except for weightlessness rate, pH and humic acid index, the treatment of LM had the best effect. With the extension of incubation time, soil

pH and organic carbon content decreased first and then increased gradually, straw weightlessness rate and soil available phosphorus content increased gradually, while soil available potassium content did not change significantly. Compared with other treatments, the quality of humus in the treatment of LM was improved. Under low temperature conditions, straw combined with microbial agents can promote straw degradation, improve soil physical and chemical properties, especially LM treatment, which provides theoretical basis for straw returning to the field in cold areas.

Key words: straw returning; low temperature inoculant; normal temperature inoculum; available nutrients; humus; fulvic acid; humic acid

玉米秸秆是一种可再生能源,它的用途非常广泛,可作为饲料、肥料、能源、原料等被人类所利用^[1]。但是目前由于人们生活水平的提升,农民根本不重视秸秆的用途,秸秆的价值非但没能得到充分体现,反而导致了一系列的环境问题^[2]。所以秸秆的环境问题受到各国学者的重视,其中还田是解决秸秆环境问题最直接最有效的方法之一。秸秆主要是由各种含碳化合物组成的,将其归还农田后,经过微生物的降解作用一部分会被矿化并以 CO_2 的形式释放,另一部分将会转化成腐殖质,由此改善土壤的理化性质,微生物是土壤有机质分解和转化的主要动力,秸秆还田可以刺激微生物活性,提高土壤有机碳^[3-8]。但是秸秆的降解速度缓慢,这不仅造成秸秆资源的利用率低同时也会影响下一季作物的正常种植。因此,国内外很多研究学者,对秸秆腐熟剂的研究开发及应用进行了大量的研究^[9-12]。研究结果表明,添加菌剂后可以促进秸秆的分解和提高土壤的速效养分,同时改善土壤腐殖化程度^[13]。

对于北方地区来说,其温度相对较低,特别是从秋收到种植作物期间基本处于寒冷状态,低温期时间长,非常不利于秸秆废弃物的降解,所以寻求一种有效降解秸秆的微生物非常有必要。因此,本研究通过实验室制备的低温菌剂模拟秸秆还田条件,研究其对玉米秸秆降解的效果,从而为北方地区秸秆废弃物的合理利用提供可行的方法。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自吉林农业大学试验田,种植作物为玉米,土壤类型为黑土。春种前,用土钻钻取0~20 cm 耕层土壤,剔除土壤中存在的残根、凋落物以及小石子等杂物,然后将其自然晾干,粉碎过20目筛备用。供试土壤的基本理化性质如下:pH 为5.46,碱解氮、速效磷和速效钾分别为105.59

mg/kg、13.73 mg/kg和104.62 mg/kg,有机碳、腐殖质、富里酸、胡敏酸以及胡富比(HA/FA)分别为16.81 g/kg、6.36 g/kg、2.35 g/kg、4.02 g/kg和1.71,胡敏酸光密度 E_4/E_6 为4.06。供试玉米秸秆取自吉林农业大学试验田,秋收后收集玉米茎秆,然后晾干剪至1~2 cm,60℃烘箱中烘至恒质量备用。其有机碳、全氮、全磷以及全钾分别为478.77 g/kg、8.42 g/kg、0.67 g/kg和8.31 g/kg。低温菌剂:实验室自制,由A14、NX5和A49 3株低温菌株制备而成。常温菌剂:由Y2菌株制备。低温菌剂与常温菌剂均用灭菌载体将其吸附。

1.2 试验设计

利用恒温箱模拟低温秸秆还田,试验过程中保持土壤含水量为田间最大持水量的70%~80%,秸秆还田量按土质量的0.4%还田。试验共设置4个处理,每个处理3次重复,分别为CK(对照):只添加秸秆不加菌剂,L:秸秆+1.0%低温菌剂,M:秸秆+1.0%常温菌剂,LM:秸秆+0.5%低温菌剂+0.5%常温菌剂。称取2 000 g土壤于试验盆(21 cm×14 cm×8 cm)中,并调节土壤含水量为田间最大持水量的70%,分别称取1.60 g玉米秸秆装在5个100目的网袋(10 cm×8 cm)中,将其埋在试验盆的中间部位。然后将其置于恒温培养箱中,12℃且黑暗条件下培养60 d。分别在15 d、30 d、40 d、50 d和60 d时取一网袋秸秆和200 g左右土壤,自然晾干,研磨过筛备用。

1.3 试验方法

秸秆失重率测定:将网袋表面的土壤冲洗干净,然后60℃烘干至恒质量,秸秆失重率=(培养前秸秆质量-培养n d时秸秆质量)/培养前秸秆质量×100%。玉米秸秆及土壤基本理化性质测定的具体步骤按照《土壤农业化学分析方法》^[14]进行。有机碳测定采用重铬酸钾外加热法;全量氮磷钾测定采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,凯氏定氮法测定全氮,钒钼黄比色法测定全磷,火焰光度法测定全钾,碱解氮测定采用碱解扩散法;速

效磷测定采用碳酸氢钠法;速效钾测定采用乙酸铵提取法。土壤腐殖质各组分的提取参考腐殖质组成修改法^[15]。提取到的腐殖质、胡敏酸(HA)以及富里酸(FA)的含碳量采用重铬酸钾外加热法测定。胡敏酸的光学性质测定采用可见光比色法(TU-1900紫外分光光度计),测定胡敏酸溶液在465 nm和665 nm波长处的吸光度,并计算光密度 E_4/E_6 。

光密度 $E_4/E_6 = OD_{465}/OD_{665}$

OD_{465} 、 OD_{665} 分别表示胡敏酸溶液在465 nm和665 nm波长处测定得到的吸光值。

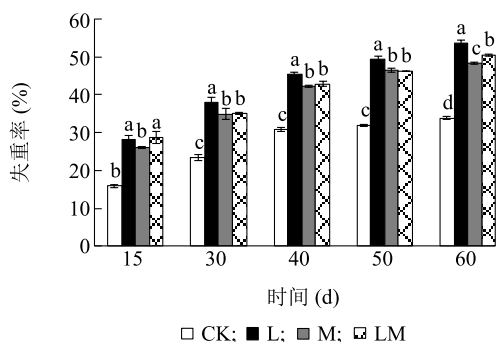
1.4 数据处理

采用 Excel 和 SPSS24.0 对数据进行统计及差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 玉米秸秆配施不同菌剂对秸秆失重率的影响

由图1可以看出,随着培养时间的延长,每个处理秸秆的失重率都呈增加的趋势。每个取样时间,CK失重率显著低于配施菌剂处理($P<0.05$)。L处理秸秆失重率明显高于其他处理,在培养60 d时, $L>LM>M>CK$,与CK相比L、M和LM的失重率分别高19.80%、14.43%和16.65%。说明添加菌剂能够促进玉米秸秆的降解,但是在低温条件下,低温菌剂的活性更强,所以其对玉米秸秆的降解效果更佳。



CK(对照):只添加秸秆不加菌剂,L:秸秆+1.0%低温菌剂,M:秸秆+1.0%常温菌剂,LM:秸秆+0.5%低温菌剂+0.5%常温菌剂。

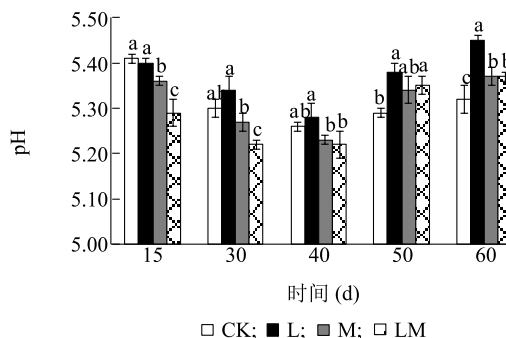
图1 玉米秸秆配施不同菌剂还田对秸秆失重率的影响

Fig.1 Effect of corn straw combined with different inoculants on weightlessness rate of straw

2.2 玉米秸秆配施不同菌剂还田对土壤 pH 的影响

由图2可知,整个培养周期中,随着培养时间的增加,每个处理土壤 pH 均呈现先降低后逐渐增加的趋势,40 d 时各处理 pH 均达到最低,之后逐渐增

加并趋于稳定,培养结束时各处理的 pH 均小于供试土壤,但秸秆配施菌剂处理的土壤 pH 与供试土壤差异不大。



CK、L、M、LM 处理分别见图1注。

图2 玉米秸秆配施不同菌剂还田对土壤 pH 的影响

Fig.2 Effect of corn straw combined with different inoculants on soil pH

2.3 玉米秸秆配施不同菌剂还田对土壤碱解氮的影响

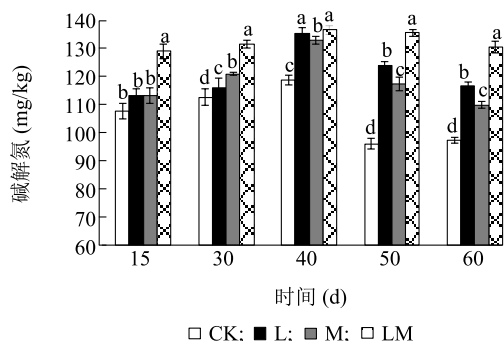
由图3可知,在培养的各个时间段,CK处理的碱解氮含量均小于添加菌剂处理,LM处理碱解氮含量基本(除培养40 d)是最高的,L和M处理碱解氮含量在CK与LM处理之间。每个处理的碱解氮含量均随着培养时间的延长先逐渐增加后减少的趋势,培养40 d时,碱解氮呈最大值,之后略有下降。秸秆中碳氮比(C/N)较高,在秸秆降解过程中,微生物需要消耗大量的氮源,因此在培养60 d时,碱解氮含量有所降低,但是除CK外均高于供试土壤碱解氮含量。培养60 d时,与秸秆还田前相比,除CK处理碱解氮下降了8.32 mg/kg,L、M与LM处理分别增加了11.09 mg/kg、4.28 mg/kg和24.76 mg/kg。

2.4 玉米秸秆配施不同菌剂还田对土壤速效磷的影响

由图4可知,随着培养时间的延长,土壤速效磷呈增加的趋势。培养15 d时,添加低温菌剂处理(L)的速效磷含量最高,为15.27 mg/kg,并且显著($P<0.05$)高于不添加菌剂(CK)和添加常温菌剂(M)处理,但是与添加低温、常温混合菌剂(LM)差异不显著($P>0.05$)。培养60 d时,L、M以及LM处理速效磷含量均显著($P<0.05$)高于CK处理,但是L、M以及LM处理之间差异并不显著($P>0.05$)。

2.5 玉米秸秆配施不同菌剂还田对土壤速效钾的影响

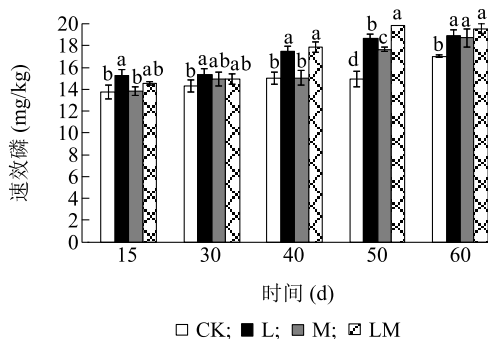
由图5可知,随着培养时间的延长各个处理速



CK、L、M、LM 处理分别见图 1 注。

图 3 玉米秸秆配施不同菌剂还田对土壤碱解氮含量的影响

Fig.3 Effect of corn straw combined with different inoculants on soil alkali hydrolyzable nitrogen content



CK、L、M、LM 处理分别见图 1 注。

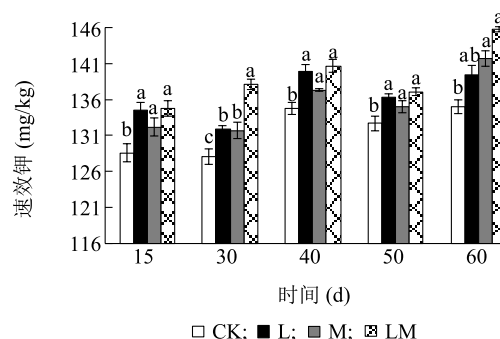
图 4 玉米秸秆配施不同菌剂还田对土壤速效磷含量的影响

Fig.4 Effect of corn straw combined with different inoculants on soil available phosphorus content

效钾含量基本都是呈先增加后降低再增加的趋势, 60 d 时达到最大值。在整个取样时期, CK 处理速效钾含量均小于其他处理, LM 处理的含量最高, L 和 M 处理介于两者之间。供试土壤速效钾含量为 104.62 mg/kg, 培养 15 d 时, CK、L、M 以及 LM 处理的速效钾含量比供试土壤分别增加了 23.95 mg/kg、29.87 mg/kg、27.55 mg/kg 和 30.13 mg/kg; 培养 60 d 增加的量更大, CK、L、M 以及 LM 处理的速效钾含量比供试土壤分别增加 30.38 mg/kg、34.76 mg/kg、37.08 mg/kg 和 41.20 mg/kg。与对照相比, 可以看出, 添加菌剂能够明显增加秸秆中速效钾的释放, 从而增加土壤速效钾含量, 而低温与常温混合菌剂处理要优于单施低温菌剂或常温菌剂处理。

2.6 玉米秸秆配施不同菌剂还田对土壤有机碳及腐殖质组成的影响

土壤有机物质包括各种动植物残体以及微生物

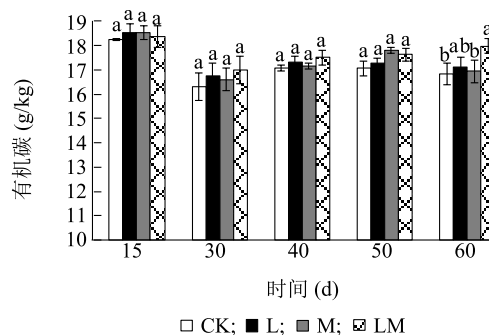


CK、L、M、LM 处理分别见图 1 注。

图 5 玉米秸秆配施不同菌剂还田对土壤速效钾含量的影响

Fig.5 Effect of corn straw combined with different inoculants on soil available potassium content

及其生命活动的各种有机产物。土壤有机物质不仅能够为作物提供各种营养元素, 同时对土壤结构的形成, 土壤理化性质的改善具有决定性意义。不同取样时期, 秸秆还田配施不同菌剂对土壤有机碳的影响见图 6。供试土壤的有机碳为 16.81 g/kg, 由图 6 可以看出, 培养 15 d 时, 各处理的有机碳含量均迅速增加, 增加范围为 1.42~1.73 g/kg, 其中秸秆还田配施菌剂处理要高于对照处理, 但是差异不显著 ($P>0.05$)。之后的培养周期, 各处理基本呈先逐渐下降后增加的趋势, 但是不同处理之间差异不显著。培养 60 d 时, LM>L>M>CK, LM 处理显著 ($P<0.05$) 高于 CK 和 M 处理; 与供试土壤相比, CK、L、M 及 LM 处理有机碳含量分别增加了 0.12%、1.90%、0.77% 和 6.90%, 说明秸秆还田能够提高土壤有机碳, 但是秸秆配施微生物菌剂处理使有机碳增加更明显, 特别是处理 LM。



CK、L、M、LM 处理分别见图 1 注。

图 6 玉米秸秆配施不同菌剂还田对土壤有机碳含量的影响

Fig.6 Effect of corn straw combined with different inoculants on soil organic carbon content

由表 1 可以看出, 不同处理不同培养时间, 土壤

腐殖质、富里酸、胡敏酸、 HA/FA 以及胡敏酸 E_4/E_6 均呈现一定的变化规律。与不配施菌剂对照相比,配施不同菌剂能够不同程度地提高土壤腐殖质、胡敏酸和 HA/FA 等,改善土壤腐殖质的质量。土壤腐

殖质含量与有机碳含量随培养时间延长的变化规律相似,即随着培养时间的延长,各处理土壤腐殖质含量基本是先降低后增加的趋势。

表 1 玉米秸秆配施不同菌剂还田对土壤腐殖质组成的影响

Table 1 Effect of corn straw combined with different inoculants on soil humus composition

时间 (d)	处理	腐殖质 (g/kg)	富里酸 (g/kg)	胡敏酸 (g/kg)	HA/FA	胡敏酸 E_4/E_6
15	CK	6.32±0.06b	2.14±0.01c	4.18±0.06c	1.95±0.06a	3.91±0.09a
	L	6.89±0.16a	2.23±0.05b	4.66±0.06a	2.09±0.10a	3.96±0.16a
	M	6.81±0.06a	2.31±0.06a	4.50±0.16b	1.98±0.16a	4.02±0.15a
	LM	6.89±0.19a	2.24±0.03b	4.66±0.01a	2.08±0.07a	3.94±0.16a
30	CK	6.27±0.14b	2.05±0.05a	4.22±0.02b	2.06±0.05c	4.03±0.13a
	L	6.65±0.00a	2.12±0.08a	4.73±0.02a	2.14±0.03b	3.90±0.15a
	M	6.42±0.06b	2.11±0.10a	4.31±0.01b	2.04±0.03c	4.02±0.16a
	LM	6.69±0.03a	2.09±0.04a	4.60±0.11a	2.20±0.02a	3.96±0.16a
40	CK	6.24±0.07b	2.12±0.04b	4.12±0.02c	1.94±0.10a	4.07±0.12a
	L	6.61±0.11a	2.29±0.05a	4.32±0.05b	1.89±0.04b	4.02±0.09a
	M	6.62±0.05a	2.28±0.07a	4.34±0.12b	1.95±0.02a	4.02±0.13a
	LM	6.70±0.07a	2.23±0.05b	4.47±0.01a	2.00±0.04a	3.97±0.12a
50	CK	6.38±0.08a	2.22±0.07a	4.16±0.03b	1.87±0.07b	3.99±0.08a
	L	6.70±0.17a	2.10±0.06a	4.60±0.06a	2.19±0.05a	3.92±0.16a
	M	6.71±0.09a	2.34±0.05a	4.37±0.03b	1.89±0.03b	4.07±0.14a
	LM	6.67±0.03a	2.15±0.04a	4.52±0.08a	2.10±0.11a	4.03±0.18a
60	CK	6.35±0.16c	2.10±0.06b	4.25±0.13b	2.03±0.05b	4.02±0.13a
	L	6.68±0.15ab	2.10±0.08b	4.58±0.12a	2.20±0.06ab	4.01±0.12a
	M	6.47±0.20b	2.12±0.07b	4.35±0.19b	2.05±0.08b	4.05±0.18a
	LM	6.71±0.07a	2.33±0.02a	4.38±0.06ab	2.27±0.02a	3.97±0.19a

CK、L、M、LM 处理分别见图 1 注。同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

土壤胡敏酸是腐殖质的重要组成部分,土壤腐殖质形成过程中,残留在土壤中的有机物质先形成胡敏酸,然后在微生物的氧化作用下分解成富里酸,最后矿化为 $CO_2^{[16]}$ 。由表 1 可以看出,各处理富里酸含量的变化:CK 处理是先增加后逐渐减少的趋势,而 L、M 和 LM 处理随培养时间的延长并没有明显的变化规律,但其含量基本大于 CK 处理。各处理土壤胡敏酸含量随培养时间的延长均没有明显的变化规律,但是每个阶段 L、M 和 LM 处理胡敏酸含量均大于 CK 处理。

HA/FA 越大,说明腐殖质品质越好。各处理随培养时间的延长虽然没有很明显的变化规律,但是配施菌剂处理的 HA/FA 高于 CK 处理,尤其是处理

LM。与供试土壤相比,秸秆还田均可以增加 HA/FA ,提高腐殖质的品质。

E_4/E_6 是表征土壤腐殖质光学性质的重要参数,能够反映腐殖质的复杂程度,胡敏酸或富里酸 E_4/E_6 越大,说明其光密度越小,分子量越小,分子结构越简单^[17]。各时间段各处理之间土壤胡敏酸 E_4/E_6 的差异不显著。

3 讨论

秸秆还田能有效增加土壤有机碳含量,改善土壤肥力状况^[18-19]。因为玉米秸秆中含有丰富的有机碳和氮、磷、钾等矿质营养元素。但是秸秆主要由纤维素、半纤维素以及木质素等含碳化合物组

成^[20],它们之间靠共价键紧紧连结,从而导致秸秆难以降解,尤其在低温地区。有研究表明,施用腐熟剂后秸秆降解率提高^[21],李春杰等的研究表明,经过 180 d 的分解,玉米秸秆分解率达到了 70% 以上^[22],而且可以增加土壤养分含量,腐熟剂施用 90 d 后,土壤全磷、速效磷和速效钾的含量均有不同程度增加^[23]。本研究中秸秆配施菌剂还田后使土壤碱解氮、速效磷及速效钾含量呈逐渐上升的趋势,这与上述的研究结果一致。这也说明了秸秆释放养分需要一定的腐熟时间,微生物菌剂可以改变土壤微生物的组成,影响土壤酶的活性,改变土壤养分的组成及有效性。研究表明,秸秆还田能够为微生物提供丰富的碳源,同时促进土壤微生物的生长和繁殖^[24],多年秸秆还田可以降低土壤对磷素的吸附,增加土壤表层速效磷的释放^[25-26]。而秸秆中钾的含量较高,其中作物吸收的钾素 80% 存在于作物秸秆中^[27]。

李鹤^[28]、刘文国等^[29]的研究结果表明,秸秆还田对土壤 pH 值有一定的影响,随秸秆还田时间的延长,土壤 pH 先降低后逐渐上升,配施菌剂对土壤 pH 影响不大。本研究结果与他们的研究结果一致。产生上述现象的原因,可能是因为秸秆配施菌剂后,微生物活性较强,产生丰富的有机酸从而引起 pH 的降低,而后随着时间的延长,微生物分解蛋白质等有机物质,产生 NH_3 ,导致土壤 pH 有所升高。

秸秆配施菌剂处理有利于土壤有机碳的提高以及腐殖质的改善,这可能是因为微生物菌剂促进了玉米秸秆的降解与转化,使其被微生物分解并转化为新的且结构较为简单的土壤腐殖质。秸秆与土壤充分接触并且氧气充足的条件下,能够刺激微生物分泌酶从而提高土壤酶活性,较多的 HA 结构被分解,同时随着秸秆腐解,土壤中新生成了大量结构较为简单、脂肪族强的 HA 分子,从而促进了土壤中腐殖质的不断更新^[30]。 HA/FA 越大,说明土壤腐殖化程度越高,腐殖质品质越好^[31]。研究表明,秸秆分解期间土壤腐殖质各组分含量增加,土壤腐殖质得到更新,活性增强^[32]。

本研究结果表明,秸秆配施菌剂对土壤理化性质影响很大。秸秆配施菌剂可以提高玉米秸秆失重率,随着时间的延长,秸秆失重率逐渐增加;增加土壤碱解氮、速效磷、速效钾、有机碳、腐殖质、胡敏酸的含量以及 HA/FA 比值;降低土壤 pH、富里酸和胡敏

酸 E_4/E_6 比值;改善土壤腐殖质的质量;不同的处理中秸秆配施低温+常温菌剂(LM)处理效果最佳。

参考文献:

- [1] 王金武,唐汉,王金峰.东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J].农业机械学报,2017,48(5):1-21.
- [2] LI B, YANG L, WANG C Q, et al. Adsorption of Cd(II) from aqueous solutions by rape straw biochar derived from different modification processes[J]. Chemosphere, 2017, 175:332-340.
- [3] 宋朝玉,宫明波,高倩,等.长期玉米秸秆还田模式下氮肥用量对玉米生长发育及土壤养分的影响[J].山东农业科学,2017,49(10):55-59.
- [4] 刘书田,窦森,郑伟,等.基于配方施肥数据集的有机碳含量与温度和降水量相关性研究[J].农业环境科学学报,2016,35(7):1413-1420.
- [5] 陆文龙,赵标,五毛毛,等.秸秆改良茶园土壤对氮磷吸附特性的研究[J].江苏农业科学,2017,45(12):238-240.
- [6] 张翰林,郑宪清,何七勇,等.不同秸秆还田年限对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳的影响[J].水土保持学报,2016,30(4):216-220.
- [7] 郭瑞华,靳红梅,常志州,等.秸秆还田模式对土壤有机碳及腐植酸含量的影响[J].农业环境科学学报,2017,36(4):727-733.
- [8] 黄芬,韦红群,曹建华.土壤微生物对玉米秸秆还田的响应特征——亚热带石灰土与红壤的典型对比[J].南方农业学报,2018,49(1):22-29.
- [9] GOU C, WANG Y, ZHANG X, et al. Inoculation with a psychrotrophic-thermophilic complex microbial agent accelerates onset and promotes maturity of dairy manure-rice straw composting under cold climate conditions[J]. Bioresource Technology, 2017, 243:339.
- [10] 韩梦颖,王雨桐,高丽,等.降解秸秆微生物及秸秆腐熟剂的研究进展[J].南方农业学报,2017,48(6):1024-1030.
- [11] 张喜庆,勾长龙,姜玉杰,等.高效纤维素分解菌的分离鉴定及堆肥效果研究[J].农业环境科学学报,2016,35(2):380-386.
- [12] 李传宝,王宏燕,赵伟,等.秸秆还田配施微生物菌剂与有机肥施用对黑土微生物量碳的影响[J].江苏农业科学,2017,45(5):265-268.
- [13] 青格尔,于晓芳,高聚林,等.腐解菌剂对玉米秸秆降解效果的研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(12):107-116.
- [14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [15] 窦森,于水强,肖彦春,等. CO_2 浓度对玉米秸秆分解期间土壤腐殖质形成的影响[J].土壤学报,2007,44(3):458-466.
- [16] 李学垣.土壤化学[M].北京:高等教育出版社,2001.
- [17] 王晶,何忠俊,王立东,等.高黎贡山土壤腐殖质特性与团聚体数量特征研究[J].土壤学报,2010,47(4):723-733.

- [18] HENRIKSEN T M, BRELAND T A. Carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities as affected by contact between crop residues and soil[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2002, 35(1):41-48.
- [19] TURMEL M S, SPERATTI A, BAUDRON F, et al. Crop residue management and soil health: a systems analysis[J]. *Agricultural Systems*, 2015, 134:6-16.
- [20] ALVIRA P, TOMASPEJO E, BALLESTEROS M, et al. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(13):4851-4861.
- [21] 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.
- [22] 李春杰, 孙涛, 张兴义, 等. 秸秆腐熟剂对寒地玉米秸秆降解率和土壤理化性状影响[J]. *华北农学报*, 2015, 30(S1):507-510.
- [23] 于建光, 常志州, 黄红英, 等. 秸秆腐熟剂对土壤微生物及养分的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(3):563-570.
- [24] ZHANG B, HE H, DING X, et al. Soil microbial community dynamics over a maize (*Zea mays*, L.) growing season under conventional- and no-tillage practices in a rain fed agroecosystem[J]. *Soil & Tillage Research*, 2012, 124(4):153-160.
- [25] GUPTA R K, SINGH Y, LADHA J K, et al. Yield and phosphorus transformations in a rice wheat system with crop residue and phosphorus management[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(5):1500-1507.
- [26] PHIRI S, AMÉZQUITA E, RAO I M, et al. Disc harrowing intensity and its impact on soil properties and plant growth of agropastoral systems in the Llanos of Colombia [J]. *Soil & Tillage Research*, 2001, 62(3):131-143.
- [27] YU C, QIN J, XU J, et al. Straw combustion in circulating fluidized bed at low-temperature: Transformation and distribution of potassium[J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2010, 88(5):874-880.
- [28] 李鹤. 低温秸秆降解菌的酶活、降解效果及对土壤养分、酶活的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2015.
- [29] 刘文国, 赵强, 杨艳美. 秸秆还田处理对土壤理化性状及玉米产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(27):111-117.
- [30] 董珊珊, 窦森. 玉米秸秆不同还田方式对黑土有机碳组成和结构特征的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(2):322-328.
- [31] 翟修彩, 刘明, 李忠佩, 等. 不同添加剂处理对水稻秸秆腐解效果的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(12):2412-2419.
- [32] 张晋京, 窦森. 玉米秸秆分解期间胡敏酸、富里酸动态变化的研究[J]. *土壤通报*, 2005, 36(1):134-136.

(责任编辑:陈海霞)