

网络出版时间:2016-10-20 16:36 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2016.12.015
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20161020.1636.030.html

腐解菌剂对玉米秸秆降解效果的研究

青格尔,于晓芳,高聚林,王志刚,闹干朝鲁,
王 振,胡树平,高 琳,胡海红

(内蒙古农业大学 农学院,内蒙古 呼和浩特 010019)

【摘 要】 【目的】研究施用秸秆腐解菌剂对玉米秸秆的促分解效果、养分释放规律及土壤理化特性、养分含量、腐殖质组成和土壤酶活性的影响,为低温地区秸秆快速、高效腐熟以及有机废弃物合理利用提供理论依据和技术参考。**【方法】**以玉米秸秆作为供试材料,选用低温复合菌剂 GF-20、中农绿康秸秆型有机物料腐熟剂(以下简称绿康菌剂)、世明生物发酵菌种(以下简称世明菌剂)作为试验菌剂,设置 5 个处理,分别为:对照 1(CK),土壤+玉米秸秆+不施用菌剂;对照 2(B),土壤+无玉米秸秆+不施用菌剂;GF,土壤+玉米秸秆+菌剂 GF-20;LK,土壤+玉米秸秆+绿康菌剂;SM,土壤+玉米秸秆+世明菌剂,采用室内培养试验,在 10℃ 黑暗条件下培养 60 d,测定不同处理玉米秸秆降解率、养分释放率以及土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量和腐殖质成分与土壤酶活性,最后对添加秸秆腐解菌剂后土壤酶活性与速效养分含量的相关性进行了分析。**【结果】**在 10℃ 黑暗培养条件下,与 CK 相比,施用 3 种秸秆腐解菌剂后均在一定程度上促进了玉米秸秆的分解,加快了秸秆养分的释放,提高了土壤速效养分含量与土壤酶活性,其中以添加低温复合菌剂 GF-20 的效果最好。秸秆腐解 60 d 后,处理 GF 的秸秆降解率达 36.75%,较处理 LK、SM 和 CK 高出 9.78%、9.92% 和 16.38%。处理 GF 明显提高了土壤酶活性,促进土壤物质转化,碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为 94.10、14.95 和 38.36 mg/kg,明显高于其他处理;处理 GF 腐殖质碳含量为 21.99 g/kg,较其他处理增加 1.76~3.68 g/kg;处理 GF 的 HI(胡敏酸与胡敏素含量比值)为 1.43,较其他处理高 0.14~0.45。相关性分析结果显示,添加秸秆腐解菌剂后,土壤酶活性与速效养分含量呈显著或者极显著相关。**【结论】**在 10℃ 黑暗培养条件下,低温复合菌剂 GF-20 能更有效促进秸秆分解进程,加快玉米秸秆腐解速率及养分释放,提高土壤速效养分含量及酶活性。

【关键词】 低温高效玉米秸秆腐解菌剂;养分释放;土壤养分;腐殖质组成;土壤酶活性

【中图分类号】 S141.4;X712

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2016)12-0107-10

Study on degradation of corn stalk by decomposing microbial inoculants

BORJIGIN Qinggeer, YU Xiaofang, GAO Julin, WANG Zhigang,

BORJIGIN Naoganchaolu, WANG Zhen, HU Shuping, GAO Lin, HU Haihong

(Agricultural College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China)

Abstract: 【Objective】 The present study evaluated the impact of different microbial inoculants on degrading process of corn stalk, characteristics of nutrients release, physical and chemical properties, nutrients, humic substances and soil enzyme activities to provide basis for the utilization of corn stalk decomposing in low temperature region and reasonable use of organic resources. **【Method】** In this study, corn stalk was used as organic substrates, GF-20 complex microbial inoculants at low temperature, and Zhongnonglv-kang organic matter-decomposing inoculant and Shiming biological fermentation inoculant were cultured in incubator under dark condition at 10℃ for 60 d. Five treatments were used including soil+corn stalk+

【收稿日期】 2015-09-20

【基金项目】 国家科技支撑计划项目(2011BAD16B13, 2012BAD04B04, 2013BAD07B04);国家玉米产业技术体系项目(CARS-02-63)

【作者简介】 青格尔(1988—),女,内蒙古通辽人,在读博士,主要从事玉米生理生态研究。E-mail:qinggeer001@163.com

【通信作者】 高聚林(1964—),男,内蒙古鄂尔多斯人,教授,博士,博士生导师,主要从事玉米生理生态研究。

E-mail:nmgaojulin@163.com

free inoculant (CK), soil+free corn stalk+free inoculant (B), soil+corn stalk+GF-20 inoculant (GF), soil+corn stalk+Lv kang inoculant (LK), and soil+corn stalk+Shiming inoculant (SM). Then, the corn stalk decomposing rate, nutrient release rate, changes in contents of organic matter, alkalystic N, available P, available K and humic acid, and soil enzyme activities were determined. Furthermore, the correlation between soil enzyme activity and available nutrient content after applying straw degradation inoculants was analyzed. **【Result】** The degradation of corn stalk and nutrient release rates were increased under dark condition at 10 °C, and soil available nutrient content and soil enzyme activities were enhanced with the best results by GF-20. After 60 days, straw degradation rate of GF was 36.75%, which was 9.78%, 9.92% and 16.38% higher than that of LK, SM and CK, respectively. Treatments GF significantly improved the soil enzyme activities and the transformation of soil materials. The soil alkalystic N, available P and available K contents were 94.10, 14.95 and 38.36 mg/kg, which were significantly higher than those in other treatments. The total carbon content of GF was 21.99 g/kg, 1.76—3.68 g/kg higher than other treatments and the HI was 1.43, 0.14—0.45 higher than other treatments. Correlation analysis results show that applying straw decomposition inoculants, soil enzyme activity and available nutrients content were significantly or extremely significantly correlated. **【Conclusion】** Microbial inoculants GF-20 could significantly promote straw decomposition, and improve soil nutrients and soil enzyme activities under dark condition at 10 °C.

Key words: corn stalk decomposing microbial inoculants at low temperature; nutrient release; soil nutrients; humic substance; soil enzyme activity

中国每年生产约 7 亿 t 农作物秸秆, 其中玉米秸秆产量达到 22 156 万 t, 约占我国农作物秸秆总产量的 30%^[1-2]。然而玉米秸秆只有极小部分被用于生物能源、工业原料、饲料化利用、食用菌基料, 大部分被废弃或田间焚烧, 这不仅造成了资源浪费, 而且引起环境污染^[3]。随着农业机械化的发展, 秸秆直接还田成为了既省时省力又能提高土壤有机质的有效途径^[4-5]。我国约有 3 899 万 t 玉米秸秆被直接还田, 占玉米秸秆资源总量的 17.6%^[6], 但在我国北方春玉米区秋收后面临冬季气温低等实际问题, 玉米秸秆粉碎深翻还田后腐解速率慢、分解周期长、降解效果差, 直接还田影响土壤墒情和耕作以及后季作物生长, 严重影响种植区玉米秸秆还田的实施。东北地区玉米秸秆直接还田比例仅为 11.2%, 内蒙古地区秸秆还田比例不足 10%^[1-2]。如何使大量的北方春玉米秸秆还田后快速高效腐解, 形成高质量的腐解产物, 提高玉米秸秆资源利用效率进而提升土壤肥力是实现玉米生产可持续发展的关键。国内外学者关于玉米秸秆腐解菌剂的研发及其应用已做了大量的研究^[7-11]。前人研究表明, 玉米秸秆还田后接种促分解菌剂, 能在接种早期有效加快秸秆分解^[12-13]; 接种微生物复合菌剂, 可以有效促进秸秆的腐殖化速度, 更能使有效元素大量积累^[14]。秸秆还田配施微生物菌剂可提高土壤脲酶活性, 有效氮含量相对增多^[15]。李玉春等^[16]研究表明, 玉米秸秆经

微生物菌剂发酵后, 协调了土壤酸碱度和土壤氮、磷、钾养分的供应, 提高了土壤酶活性。但是也有研究与上述结论相反, 吴琴燕等^[17]发现, 外加腐解菌剂不能促进小麦秸秆腐熟, 秸秆腐熟主要依赖其自身含有的微生物。现有的秸秆降解或腐解菌剂制品在田间实际应用效果也非常不稳定。刘海静等^[18]发现, 在不同的耕作栽培措施下, 秸秆腐解菌剂的作用效果有显著差异。随着秸秆腐解微生物的发现以及发酵工艺的发展, 微生物菌剂的种类也日益增加, 据报道, 我国生产微生物菌剂的厂家已超 2 000 家^[19]。目前, 文献中报道的中高温(22~50 °C)秸秆分解菌的筛选较多, 而北方地区低温期较长, 中高温微生物在低温(低于 15 °C)时生长受到抑制, 不能代谢外源物质, 因而常温和高温微生物菌剂不能充分发挥其功效, 而应用于北方高寒地区春玉米秋收后的低温(4~10 °C)高效腐解复合菌系及应用效果如何却未见报道, 并且此前的研究大都以中高温条件下实现秸秆的快速分解为目标, 而针对低温玉米秸秆促分解菌剂对土壤养分及酶活影响的研究还较少。因此, 本研究以玉米秸秆为材料, 选择 3 种不同秸秆腐解菌剂作为供试菌剂, 设计室内培养试验, 分析添加秸秆腐解菌剂后, 玉米秸秆降解率随促腐时间的变化, 同时比较分析 3 种秸秆腐解菌剂处理下土壤养分和土壤酶活性的变化, 以揭示低温条件下接种秸秆复合菌剂的可行性与优越性, 同时探索低温复合菌剂与普通菌

剂在腐解秸秆过程中的差异,为北方高寒地区玉米秸秆资源合理利用提供新的秸秆腐解菌剂。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试秸秆取自内蒙古农业大学科技园区(内蒙古包头市土默特右旗萨拉齐北只图村)试验田收获的玉米秸秆,玉米秸秆的养分含量为:C/N 为 48.98,纤维素 51.24%,半纤维素 32.72%,木质素为 9.15%,全氮 6.67 g/kg,全磷 2.78 g/kg,全钾 11.48 g/kg。将玉米秸秆洗净烘干后剪成 3~5 cm 长备用。试验土壤取自该玉米田 5~30 cm 土层,土壤理化性质为:pH 值 7.40,有机质含量为 33.83 g/kg,碱解氮 64.87 mg/kg,速效磷 11.07 mg/kg,速效钾 33.27 mg/kg,阴干后过孔径 1 mm 筛。

供试菌剂:GF-20 为本实验室筛选所得的低温复合菌剂,主要成分为混合纤维弧菌、固氮螺旋菌、梭菌、芽孢杆菌、酵母菌等,有效活菌数调制为 $\geq 10^8$ mL⁻¹。中农绿康秸秆型有机物料腐熟剂(以下简称绿康菌剂)和世明生物发酵菌种(以下简称世明菌剂)为市场上销售的秸秆腐解菌剂,其中,绿康菌剂为商业菌剂主要成分为芽孢杆菌、绿色木霉、酵母菌等,有效活菌数 $\geq 0.5 \times 10^8$ g⁻¹;世明菌剂购自山东省秸秆生物工程技术研究中心,有效活菌数 $\geq 10^8$ g⁻¹。

1.2 试验设计与方法

本研究于 2014 年 4 月进行,试验设土壤+玉米秸秆+不施用菌剂(对照 1,CK)、土壤+无玉米秸秆+不施用菌剂(对照 2,B)、土壤+玉米秸秆+菌剂 GF-20 (GF)、土壤+玉米秸秆+绿康菌剂(LK)、土壤+玉米秸秆+世明菌剂(SM)共 5 个处理,每处理 5 次重复,共 100 个培养瓶。GF-20 按 10¹⁰ CFU/m² 施用,绿康和世明菌剂参照使用说明按 30 kg/hm² 施用。

称取 5 g 玉米秸秆和 500 g 土壤于 2 L 的灭菌培养瓶中,瓶底铺 5 cm 左右厚度的土壤,放置秸秆,接秸秆腐解菌剂,再铺 5 cm 厚度的土壤。用无菌蒸馏水调节含水量至 65%,于 10 ℃ 黑暗条件下培养。试验开始后,各处理每 15 d 取样 1 次,直至第 60 天结束,共取样 4 次,每次每个处理取 5 瓶(共取 25 个培养瓶)。采用三点垂直法采集土样,经充分混匀阴干过筛,测定土壤养分及酶活性。

1.3 测试项目与方法

1.3.1 玉米秸秆降解率 将腐解前(原始)及腐解后残留的玉米秸秆经洗净,80 ℃ 烘干,利用失重法测定秸秆降解率,秸秆降解率=(原始玉米秸秆质量—

残留玉米秸秆质量)/原始玉米秸秆质量 $\times 100\%$ 。

1.3.2 玉米秸秆养分释放率^[20] 分别取玉米秸秆原始样和腐解后残留玉米秸秆,用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,测定全碳、全氮、全磷、全钾养分含量,采用重铬酸钾容量法-外加热法测全碳含量,凯氏定氮法测全氮含量,钼锑抗比色法测全磷含量,火焰光度法测全钾含量。之后计算秸秆养分释放率,养分释放率=(原始玉米秸秆养分含量—残留玉米秸秆养分含量)/原始玉米秸秆养分含量 $\times 100\%$ 。

1.3.3 土壤养分含量^[20] 有机碳含量采用重铬酸钾-硫酸氧化法测定,腐殖质碳含量采用重铬酸钾氧化容量法测定,胡敏酸和胡敏素含量采用焦磷酸钠-重铬酸钾法测定,碱解氮含量采用碱解扩散法测定,有效磷含量采用钼蓝比色法测定,速效钾含量采用火焰光度法测定。

1.3.4 土壤酶活性^[21] 将土样在 37 ℃ 条件下培养 24 h,采用二硝基水杨酸(DNS)法测定纤维素酶、蔗糖酶活性;将土样在 37 ℃ 条件下培养 3 h,分别采用苯酚钠-次氯酸钠滴定法和比色法测定脲酶、碱性磷酸酶活性。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2003 处理,不同处理之间各指标的差异性及 Pearson 相关性采用 SPSS 18.0 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆腐解菌剂对玉米秸秆的降解效果

在 10 ℃ 黑暗培养条件下,接种菌剂处理 GF、LK 和 SM 与 CK 在 15,30,45,60 d 的玉米秸秆降解率见图 1。因处理 B 中未添加玉米秸秆,所以未测定。

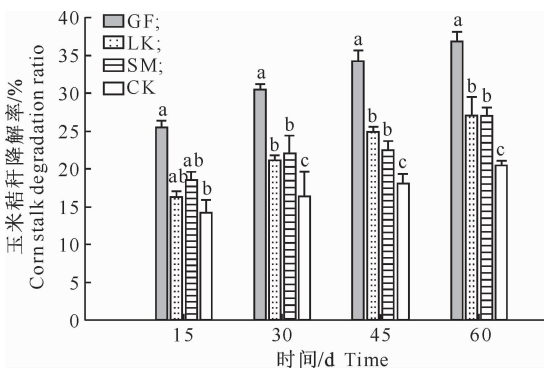


图 1 3 种秸秆腐解菌剂处理下玉米秸秆降解率的变化(10 ℃ 黑暗培养)
Fig.1 Corn stalk degradation rates of three different microbial inoculants at different sampling days (under dark condition at 10 ℃)

从图 1 可知,与 CK 相比,3 种菌剂处理的秸秆降解率较高,表现出一定的促分解效果。土培过程中 3 种菌剂对秸秆的促分解效果较明显,第 15 天,接种菌剂处理 GF、LK 和 SM 的秸秆降解率分别是 25.31%,16.15%和 18.49%,而 CK 的秸秆降解率为 14.22%,菌剂处理的促分解效果分别比 CK 高 11.09%,1.93%和 4.27%,其中处理 GF 明显高于 LK 和 SM,但差异未达显著水平;处理 SM 和 LK 与 CK 差异未达到显著水平。第 30 天,菌剂接种处理 GF、LK 和 SM 秸秆降解率较 CK 高 13.97%,4.65%和 5.55%,GF 较 SM 和 LK 高 9.33%和 8.42%。第 45 天,接种菌剂处理 GF、LK 和 SM 秸

秆降解率显著高于 CK,分别高出 13.73%,6.60%和 8.46%,GF 较 SM 和 LK 高 9.29%和 11.57%;第 60 天,接种菌剂处理 GF、LK 和 SM 的秸秆降解率分别是 36.75%,26.97%和 26.83%,而 CK 的秸秆降解率为 20.37%,处理 GF 的促分解效果与其他处理差异达到显著水平,而处理 SM 与 LK 间无显著差异,但显著高于 CK。由此可知,添加低温复合菌剂 GF-20 可有效加快秸秆分解进程,且分解效果优于添加绿康菌剂和世明菌剂处理。

2.2 秸秆腐解菌剂对玉米秸秆养分释放率的影响
不同腐解菌剂对玉米秸秆养分释放率的影响见图 2。

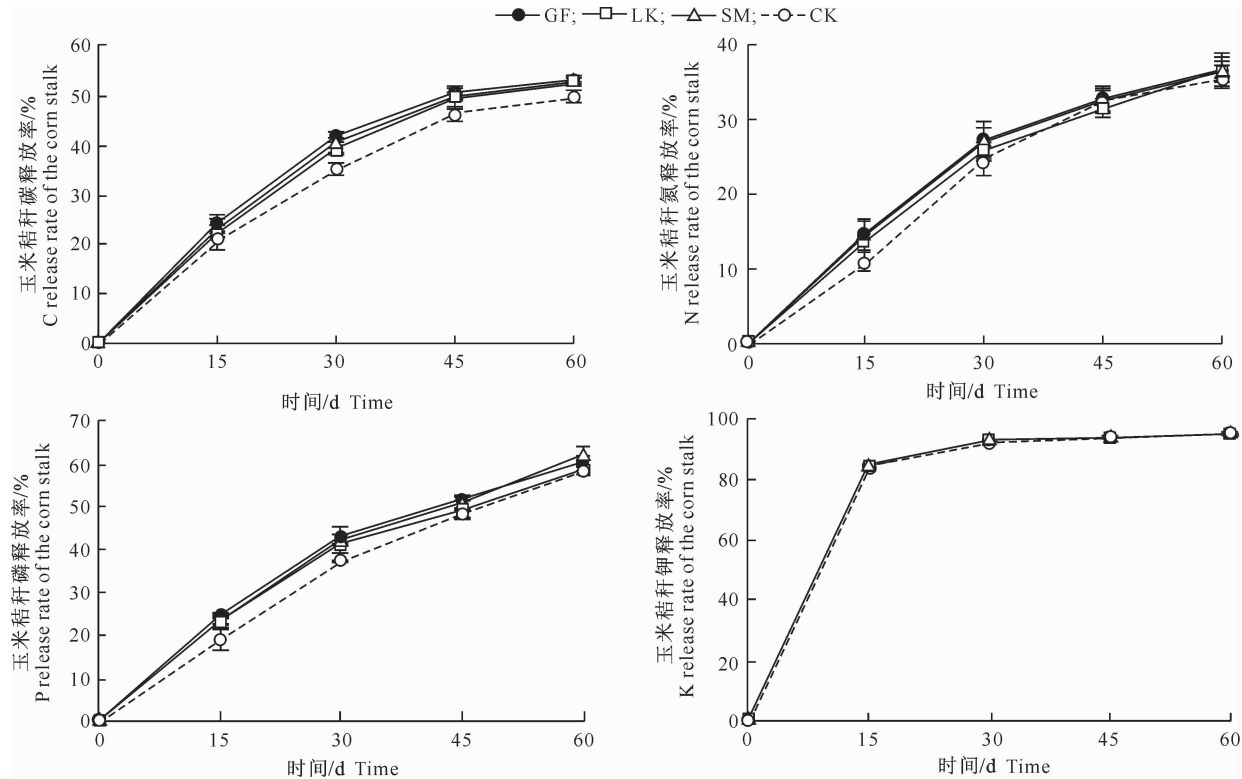


图 2 3 种秸秆腐解菌剂处理对玉米秸秆养分释放率的影响(10 °C 黑暗培养)

Fig. 2 Effect of three different microbial inoculants on nutrient release rates of corn stalk (under dark condition at 10 °C)

图 2 显示,培养 60 d 时,玉米秸秆中 49.89%~53.07%的碳、35.95%~36.65%的氮、58.57%~62.54%的磷和 94.35%~94.82%的钾被释放。与 CK 相比,各菌剂处理的秸秆养分释放率总体较高,表明菌剂处理加快了秸秆分解速率。玉米秸秆养分释放率与秸秆降解率的变化规律相似,即养分释放率随着培养时间的增加而增大。0~15 d 为养分快速释放期,3 种施用菌剂处理的碳、氮、磷和钾释放率总体高于 CK,表现为 GF>SM>LK,但 3 种菌剂处理间差异未达到显著水平($P>0.05$)。15~30 d 为养分持续快速释放期,各菌剂处理间碳、钾释放率无显著差异;各处理的氮释放率无显著差异;处理 GF 的磷释放率显著高于 CK,LK 和 SM 处理的磷释放率也高于 CK,但与 CK 间差异未达到显著水平($P>0.05$),处理 GF 的磷释放率较 LK 和 SM 处理分别高 1.67%和 0.91%,但三者之间差异未达到显著水平。30 d 后养分释放率增加减缓,各处理间的氮和磷释放率无差异;各菌剂处理碳释放率显著高于 CK;各处理间钾释放率差异未达到显著水平,但 GF 处理显著高于 CK。60 d 时,施用菌剂处理的玉米秸秆碳释放率均无显著差异,但显著高于 CK;各处理间得氮、磷、钾释放率无显著差异。

2.3 秸秆腐解菌剂对土壤养分含量的影响

由表 1 可知,在 10 ℃ 黑暗培养条件下,随着秸秆腐解时间的延长,土壤速效养分含量呈增加趋势。0~30 d 为秸秆快速腐解期,土壤速效养分含量增加的幅度最大。腐解 30 d,处理 GF 的碱解氮含量为 86.88 mg/kg,与处理 SM 差异未达到显著水平($P>0.05$),但显著高于处理 LK 和 CK,处理 GF 较 LK、SM 和 CK 分别高出 7.52,5.61 和 11.12 mg/kg;处理 GF 有效磷含量最高为 14.65 mg/kg,与处理 SM、LK 和 CK 差异未达到显著水平($P>0.05$),处理 GF 较 LK、SM 和 CK 分别高出 1.53,0.90,1.52 mg/kg;处理 GF 速效钾含量最高为 37.02 mg/kg,与处理 SM、LK、CK 差异未达到显著水平($P>0.05$)。45 d 后,秸秆腐解速度减缓,土壤

速效养分含量增幅也相应地降低,与 CK 相比,各菌剂处理碱解氮、有效磷和速效钾含量分别增加 5.84~13.59,—0.01~1.50 和 0.73~1.75 mg/kg,处理 GF 碱解氮、有效磷、速效钾较 LK 和 SM 增加 7.75 和 4.79,1.51 和 0.79,0.78 和 1.02 mg/kg。60 d 时,各菌剂处理碱解氮含量均显著高于 CK($P<0.05$),其中处理 GF、SM 碱解氮含量较高;处理 GF 有效磷含量为 14.95 mg/kg,高于处理 LK、SM 和 CK,但差异未达到显著水平($P>0.05$);处理 GF 和 LK 的速效钾含量高于 SM 和 CK,但差异未达到显著水平($P>0.05$)。由此可知,玉米秸秆配施腐解菌剂对土壤速效养分含量的变化有明显影响,其中处理 GF 效果最显著。

表 1 3 种秸秆腐解菌剂处理下土壤速效养分含量的变化(10 ℃ 黑暗培养 60 d)

Table 1 Changes in soil nutrients with three different microbial inoculants (under dark condition at 10 ℃ for 60 d)					mg/kg
时间/d Time	处理 Treatment	碱解氮 Alkalystic N	有效磷 Available P	速效钾 Available K	
15	GF	73.43±1.06 a	14.14±0.47 a	35.28±0.47 a	
	LK	68.86±3.13 bc	12.85±0.84 ab	34.09±0.87 a	
	SM	69.25±2.67 b	11.97±1.03 ab	34.88±1.31 a	
	CK	66.54±1.64 c	11.82±0.79 ab	34.99±1.10 a	
	B	66.51±2.75 c	11.29±0.73 b	33.48±1.47 a	
30	GF	86.88±1.31 a	14.65±0.60 a	37.02±1.42 a	
	LK	79.36±3.20 b	13.12±0.52 ab	36.95±0.88 a	
	SM	81.27±0.61 ab	13.75±0.76 a	35.99±1.44 ab	
	CK	75.76±3.04 b	13.13±0.35 ab	35.48±1.39 ab	
	B	66.80±1.08 c	11.50±1.00 b	33.59±1.37 b	
45	GF	92.27±0.31 a	14.83±1.66 a	38.01±1.50 a	
	LK	84.52±0.92 b	13.32±0.38 a	37.23±1.22 a	
	SM	87.48±1.37 b	14.04±1.90 a	36.99±0.40 a	
	CK	78.68±0.62 c	13.33±1.30 a	36.26±0.64 ab	
	B	67.95±1.39 d	11.31±0.83 a	34.25±1.03 b	
60	GF	94.10±0.91 a	14.95±1.45 a	38.36±0.93 a	
	LK	87.97±2.28 b	13.36±0.49 ab	37.39±0.59 a	
	SM	91.45±1.31 ab	14.00±1.59 ab	36.95±0.72 ab	
	CK	80.79±0.19 c	13.06±0.78 ab	35.80±1.51 ab	
	B	66.21±1.42 d	10.80±0.31 b	34.12±1.73 b	

注:数据为“平均值±标准差”(n=5)。同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下表同。
Note:Data are “mean±standard” deviation (n=5). Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$). The same below.

2.4 秸秆腐解菌剂对土壤有机质及腐殖质组成的影响

在腐殖质组成中富里酸结构较简单,通过微生物作用,可以发生矿化,进而使土壤中富里酸含量减少,同时一部分富里酸还可以通过分子间的键形成更为复杂的胡敏酸。由表 2 可知,在 10 ℃ 黑暗培养条件下,与 CK 相比,各菌剂处理均提高了土壤有机质和腐殖质碳含量,处理 GF 土壤有机质和腐殖质

碳含量较 LK 和 SM 高 1.01,1.03 g/kg 和 1.76,2.05 g/kg,说明处理 GF 促进了玉米秸秆的腐解及腐殖质的形成。处理 GF 胡敏酸含量较 CK 降低 0.39 g/kg。添加菌剂处理的 HI 值均高于 CK,其中处理 GF 的 HI 值最高为 1.43,其较处理 LK 和 SM 分别增加了 0.14 和 0.15,表明 GF 处理下秸秆腐解产物的腐殖化程度最高。

表 2 3 种秸秆腐解菌剂对土壤有机质及腐殖质组成的影响(10 ℃黑暗培养 60 d)

Table 2 Total carbon and decomposition humic characteristics of corn stalk with three different microbial inoculants (under dark condition at 10 ℃ for 60 d)

处理 Treatment	有机质/ (g · kg ⁻¹) Total carbon	腐殖质碳 (HS)/ (g · kg ⁻¹) Humic substances	胡敏酸(HA)/ (g · kg ⁻¹) Humic acids	胡敏素(FA)/ (g · kg ⁻¹) Humin	HI (HA/FA)
GF	35.39±2.14 a	21.99±0.99 a	3.31±0.26 a	13.98±1.47 a	1.43±0.04 a
LK	34.38±1.98 a	20.23±1.49 a	3.26±0.36 a	12.91±1.43 a	1.29±0.18 a
SM	34.36±0.97 a	19.94±1.32 a	3.63±0.93 a	11.81±3.10 ab	1.28±0.13 a
CK	34.08±0.82 a	19.91±0.36 a	3.70±0.49 a	11.96±1.32 b	1.15±0.02 a
B	33.02±0.22 a	18.31±2.14 c	4.02±1.14 a	10.60±1.44 b	0.98±0.13 a

2.5 秸秆腐解菌剂对土壤酶活性的影响

图 3 显示,在 10 ℃黑暗培养条件下,不同菌剂处理可明显提高土壤酶活性。除了处理 B,其他处理土壤酶活性随着腐解时间的延长而增加。土培 60 d 时,处理 GF 脲酶活性为 59.33 mg/(g · h),显著高于其他处理,分别较处理 LK 和 SM 和 CK 提高了 30.57%,38.06%和 78.47%,处理 LK 与 SM 间无显著差异,且显著高于 CK;处理 GF、LK 和 SM 碱性磷酸酶活性分别为 64.35,57.66 和 58.07 μg/(g · h),三者之间无显著差异,但均显著高于 CK;处理 GF 蔗糖酶活性为 226.38 g/(g · h),显著

高于其他处理,分别较处理 LK 和 SM 和 CK 提高 17.44%,11.70%,31.88%;处理 GF、LK 和 SM 处理的纤维素酶活性分别为 20.35,16.37 和 17.44 g/(g · h),但三者之间的差异未达到显著水平($P>0.05$),其中处理 GF 纤维素酶活性显著高于 CK,处理 LK 和 SM 的纤维素酶活性与 CK 差异未达到显著水平($P>0.05$)。可知与 CK 相比,秸秆配施菌剂对土壤酶活性有促进作用,其中处理 GF 效果最佳。但秸秆腐解菌剂对 4 种酶活性影响的幅度有所不同,其影响幅度大小顺序为纤维素酶>脲酶>蔗糖酶>碱性磷酸酶。

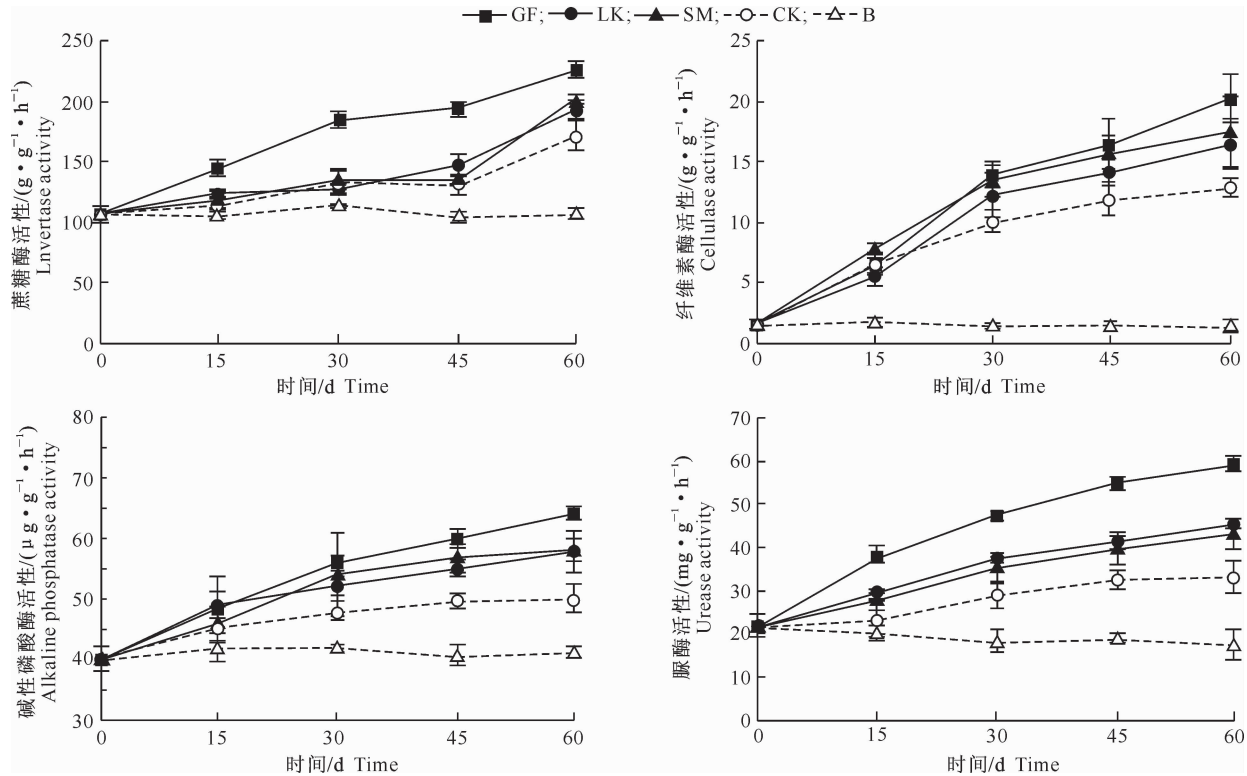


图 3 3 种秸秆腐解菌剂处理后土壤酶活性的变化

Fig. 3 Dynamics of soil enzyme activities after application of three different microbial inoculants

2.6 添加秸秆腐解菌剂后土壤速效养分含量与酶活性的相关性

对添加 3 种秸秆腐解菌剂的不同培养时期土壤

速效养分含量平均值与酶活性平均值的 Pearson 相关性进行分析,结果见表 3。由表 3 可知,土壤酶活性与速效养分含量间均呈显著或极显著正相关,说

明土壤酶与土壤速效养分循环具有相互促进作用，作用,加快土壤物质转化和循环过程。
添加秸秆腐解菌剂可促进秸秆腐解,促进土壤代谢

表 3 添加秸秆腐解菌剂后土壤速效养分含量与酶活性的 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficients between soil nutrients and soil enzyme activities after application of microbial inoculants

项目 Item	碱解氮 Alkalystic N	有效磷 Available P	速效钾 Available K	脲酶 Urease	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	蔗糖酶 Lnvertase	纤维素酶 Cellulase
碱解氮 Alkalystic N	1						
有效磷 Available P	0.932 * *	1					
速效钾 Available K	0.909 * *	0.910 * *	1				
脲酶 Urease	0.901 * *	0.931 *	0.923 * *	1			
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	0.894 * *	0.884 * *	0.956 * *	0.916 * *	1		
蔗糖酶 Lnvertase	0.930 * *	0.921 * *	0.927 * *	0.896 * *	0.901 * *	1	
纤维素酶 Cellulase	0.875 * *	0.872 * *	0.941 * *	0.877 * *	0.933 * *	0.896 * *	1

注: * 表示在 $P<0.05$ 水平(双侧)上显著相关, * * 表示在 $P<0.01$ 水平(双侧)上极显著相关。
Note: * means significant difference at $P<0.05$, * * means significant difference at $P<0.01$.

3 讨 论

3.1 秸秆腐解菌剂对玉米秸秆降解率及养分释放效果的影响

微生物促腐解菌剂是现代农业迅速发展起来的一种新型促腐解菌剂,其成分主要是具有分解功能的菌种,如枯草芽孢杆菌、酿酒酵母菌、黑曲霉菌等,施用后可以加快秸秆腐解、促进养分的释放。本研究结果显示,在 10℃ 黑暗培养条件下,秸秆腐解菌剂处理 GF、LK 和 SM 对玉米秸秆均表现一定的促分解效果,其中以低温高效菌剂处理 GF 的促分解效果最好,各时期玉米秸秆降解率均明显高于其他处理,处理 LK 和 SM 玉米秸秆降解率在早期(15 d)与 CK 无显著差异,培养 30 d 开始显著高于 CK。说明,GF-20 中的功能菌可在 10℃ 条件下定殖于土培秸秆上并发挥分解作用,而绿康菌剂和世明菌剂中的功能菌在接种前期未能适应 10℃ 土培环境,自 30 d 后才开始进行促秸秆分解作用。GF-20 菌剂是本实验室研制的专门针对北方高寒地区玉米秸秆直接还田使用的复合菌群,其中梭菌和芽孢杆菌可产纤维素和半纤维素酶,促进木质纤维素的分解^[22-24];混合纤维弧菌具有分解纤维素的功能^[25],可以在较低温度下启动发酵,从而使 GF-20 加速秸秆降解进程,加快秸秆矿质化和腐殖化,具有良好的应用前景。

本研究中,玉米秸秆养分释放规律与玉米秸秆降解率的变化特征相似,即随着时间延长,养分释放率呈增加趋势。玉米秸秆养分释放率表现为 $K>P>C>N$ 。培养 60 d 时,玉米秸秆降解率为

20.37%~36.75%,其中 49.89%~53.07%的碳、35.95%~36.65%的氮、58.57%~62.54%的磷和 94.35%~94.82%的钾被释放出来。表明经过 60 d 的腐解,秸秆中纤维素等物质在秸秆还田初期基本腐解完毕,剩余部分主要为难分解的有机物质^[26],原因是在玉米秸秆腐解初期,加入促腐解菌剂处理使得微生物数量激增,加速了秸秆分解,促进养分的释放。

3.2 秸秆腐解菌剂对土壤养分含量的影响

秸秆的腐解是以微生物作用为主导的过程,在此过程中秸秆可以利用菌剂中富含的功能微生物,增加土壤微生物群落的活性和功能多样性^[27]。研究表明,玉米秸秆在微生物作用下分解直接释放氮素从而使固氮微生物的固氮作用增强,提高土壤中的氮素含量,同时增加土壤中微生物含量,促进了土壤微生物的生命活动,加快还田秸秆腐解进程^[28],最终实现对土壤养分含量的有效提升。本研究中,在 10℃ 黑暗培养条件下,添加菌剂处理较 CK 明显增加了土壤碱解氮、有效磷、速效钾和有机质含量,其中碱解氮含量增加 8.89%~16.47%,有效磷含量增加 2.30%~14.47%,速效钾含量增加 3.21%~7.15%,有机质含量增加 0.82%~3.84%。培养 0~60 d,处理 GF 土壤速效养分含量明显高于其他处理,处理 LK 与 SM 间无显著差异。因为 GF-20 是属于低温玉米秸秆降解复合菌系,可在低温条件下加快秸秆降解,增加土壤养分。而根据绿康菌剂所组成微生物可知,其属于中高温微生物菌剂^[29]。世明菌剂是生物反应堆秸秆发酵菌剂^[30],在低温(低于 15℃)时生长受到抑制,不能代

谢外源物质,因而不能充分发挥其功效。但 GF-20 中既有混合纤维弧菌、梭菌、芽孢杆菌等可分解木质纤维素的菌种,还有固氮螺旋菌、土地杆菌、酵母菌等功能菌,可分泌多种酶类,在混合菌群的相互作用下高效降解玉米秸秆^[31-33]。

3.3 秸秆腐解菌剂对土壤酶活性的影响

土壤酶的定义是土壤中的一种聚积酶^[34],它的主要来源有植物、动物和微生物及其分泌物,最主要来源于微生物^[35]。秸秆配施腐解菌剂能促进土壤酶活性的增强,使土壤微生物群落物种个体数增加,分布更为均匀^[36]。本试验中,处理 GF 的土壤脲酶、碱性磷酸酶、纤维素酶、蔗糖酶的活性明显高于其他处理,因为在 10 ℃ 黑暗条件下,处理 GF 中的各种菌在培养初期更能适应低温并定殖于秸秆上,利用并同化物质构建微生物体,使自身生长繁殖加快,从而加速秸秆的降解从而使土壤有机质和速效养分含量增加,并促进土壤中碳水化合物和含氮化合物的转化,增强了蔗糖酶、脲酶活性,加快玉米秸秆的矿化进程和强度。土壤蔗糖酶、脲酶和磷酸酶在土壤 C、N、P 循环中起着重要作用,添加微生物菌剂处理使得秸秆腐解加快,土壤物质转化和循环速度也增加,增加产酶微生物的数量,进而增强了酶活性^[37-38]。

本研究结果显示,添加秸秆腐解菌后,土壤酶活性与速效养分含量呈显著或极显著正相关。因此,玉米秸秆配施菌剂处理的土壤养分含量及酶活性明显高于 CK,不仅是由于添加菌剂条件下秸秆能够释放出更多的营养元素,而更深层次的原因在于添加菌剂后增加了土壤微生物群落的功能多样性,土壤环境更加有利于刺激微生物和酶活性的提高,使土壤物质转化和循环速度加快,从而显著提高了土壤肥力。

本研究比较了低温秸秆腐菌剂与其他腐解菌剂对玉米秸秆降解率和土壤养分及酶活性影响的差异,但未涉及腐解菌剂处理前后微生物数量、群落结构和活性的变化,还有待今后研究。在实际生产应用中,由于土壤环境是个巨大的缓冲体系,微生物间的竞争作用及其他环境因子的影响,阻碍了微生物的生长及其作用的发挥,本研究的室内模拟试验可能未能完全反映大田实际应用效果,因此今后有必要进行 GF-20 菌剂的田间试验,以便为将其更好地应用于玉米秸秆还田技术中提供参考。

4 结 论

在 10 ℃ 黑暗培养条件下,施用秸秆腐解菌剂对

玉米秸秆的降解效果优于 CK,其中以添加了低温复合菌剂 GF-20 的效果最佳,腐解 60 d 时,玉米秸秆降解率可达 36.75%。此外,施用 GF-20 后,能明显促进玉米秸秆养分的释放,提高土壤速效养分含量及土壤酶活性,改善土壤腐殖质组成。综上所述,菌剂 GF-20 具有低温高效降解玉米秸秆的作用,在北方高寒地区秸秆还田生产中具有良好的应用前景。

[参考文献]

- [1] 吕开宇,仇焕广,白军飞.中国玉米秸秆直接还田的现状与发展[J].中国人口、资源与环境,2013,23(3):171-176.
Lü K Y, Chou H G, Bai J F. Development of direct return of corn stalk to soil: current status, driving forces and constraints [J]. China Population, Resource and Environment, 2013, 23 (3): 171-176.
- [2] 毕于运,高春雨,王亚静.中国秸秆资源数量估算[J].农业工程学报,2009,25(12):211-217.
Bi Y Y, Gao C Y, Wang Y J. Estimation of straw resources in China [J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(12): 211-217.
- [3] 王如芳,张吉旺,董树亭,等.我国玉米主产区秸秆资源利用现状及其效果[J].应用生态学报,2011,22(6):1504-1510.
Wang R F, Zhang J W, Dong S T, et al. Present situation of maize straw resource utilization and its effect in main maize production regions of China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(6): 1504-1510.
- [4] 陈冬林,易镇邪,周文新.不同土壤耕作方式下秸秆还田量对晚稻土壤养分与微生物的影响[J].环境科学学报,2010,30(8):1722-1728.
Chen D L, Yi Z X, Zhou W X. Effects of straw return on soil nutrients and microorganisms in late rice under different soil tillage systems [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30 (8): 1722-1728.
- [5] 丁永亮.不同秸秆还田方式对土壤生物学特征的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2013.
Ding Y L. Effects of different modes of straw returned on soil biological properties [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2013.
- [6] 吴鸿欣,曹洪国,韩增德.中国玉米秸秆综合利用技术介绍与探讨[J].农业工程,2011,1(3):9-12.
Wu H X, Cao H G, Han Z D. Introduction and discussion of cornstalk utilization technology in China [J]. Agricultural Engineering, 2011, 1(3): 9-12.
- [7] 王 瑶,王宏燕,赵 伟.微生物菌剂对玉米秸秆堆肥的作用效果研究[J].黑龙江农业科学,2013(8):28-31.
Wang Y, Wang H Y, Zhao W. The effect inoculating microbes on composting of maize stover [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2013(8): 28-31.
- [8] 吴红艳,王智学,陈 飞.秸秆降解菌剂对秸秆还田土壤中细菌

- 种群数量的影响 [J]. 微生物学杂志, 2012, 32(2): 79-82.
- Wu H Y, Wang Z X, Chen F. Effect of stalk-degradable microbial preparation on the number of microbial population in the soil using stalks as fertilizer for the fields [J]. Journal of Microbiology, 2012, 32(2): 79-82.
- [9] 于建光, 常志州, 黄红英. 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.
- Yu J G, Chang Z Z, Huang H Y. Effect of microbial inoculants for straw decomposing on soil microorganisms and the nutrients [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(3): 563-570.
- [10] 钱海燕, 杨滨娟, 黄国勤. 秸秆还田配施化肥及微生物菌剂对水田土壤酶活性和微生物数量的影响 [J]. 生态环境学报, 2012, 21(3): 440-445.
- Qian H Y, Yang B J, Huang G Q. Effects of returning rice straw to fields with fertilizers and microorganism liquids on soil enzyme activities and microorganisms in paddy fields [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(3): 440-445.
- [11] 萨如拉, 高聚林, 于晓芳, 等. 玉米秸秆低温降解复合菌系的筛选 [J]. 中国农业科学, 2013, 46(19): 4082-4090.
- Sa R L, Gao J L, Yu X F, et al. Screening of low temperature maize stalk decomposition microorganism [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(19): 4082-4090.
- [12] 李培培, 张冬冬, 王小娟, 等. 促分解菌剂对还田玉米秸秆的分解效果及土壤微生物的影响 [J]. 生态学报, 2012, 32(9): 2847-2854.
- Li P P, Zhang D D, Wang X J, et al. Effects of microbial inoculants on soil microbial diversity and degrading process of corn straw returned to field [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(9): 2847-2854.
- [13] 杜金钟, 孙美然, 赵志兰. 常温条件一种速腐剂对玉米秸秆的腐解效果 [J]. 吉林农业科学, 2013, 38(5): 86-88.
- Du J Z, Sun M R, Zhao Z L. Effect of a fast decomposition agent on decomposition of maize straw at normal atmospheric temperature [J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2013, 38(5): 86-88.
- [14] 张建峰, 侯红燕, 付志金. 速腐菌剂在东北地区秸秆堆肥中的功能验证及微生物菌群动态研究 [J]. 中国农学通报, 2013, 29(26): 112-117.
- Zhang J F, Hou H Y, Fu Z J. The study on functional verification of the speed corruption completing agents in straw compost and the microbial flora dynamic in the northeast China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(26): 112-117.
- [15] 解媛媛, 谷洁, 高华. 微生物菌剂酶制剂化肥不同配比对秸秆还田后土壤酶活性的影响 [J]. 水土保持研究, 2010, 17(2): 233-238.
- Xie Y Y, Gu J, Gao H. Dynamic changes of soil enzyme activities in microorganism inoculants, enzymes and chemical fertilizers in different proportions after straw returning soil [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(2): 233-238.
- [16] 李玉春, 刘瑞伟, 皇传华. 微生物菌剂对小麦秸秆还田效果试验 [J]. 山东农业科学, 2006(6): 52-53.
- Li Y C, Liu R W, Huang C H. Testing the effect of microbial agents for wheat straw returned [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2006(6): 52-53.
- [17] 吴琴燕, 陈宏州, 杨敬辉. 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.
- Wu Q Y, Chen H Z, Yang J H. Preliminary study on effects of different decomposers on wheat straw [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2010, 26(4): 83-86.
- [18] 刘海静, 任萍. 2 种还田模式下小麦秸秆腐解菌剂应用效果研究 [J]. 中国农学通报, 2013, 29(3): 166-172.
- Liu H J, Ren P. Effects of biodegradation agents on straw degradation in two kinds of straw returning [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(3): 166-172.
- [19] 高云航, 勾长龙, 王雨琼, 等. 低温复合菌剂对牛粪堆肥发酵影响的研究 [J]. 环境科学学报, 2014, 34(12): 3166-3170.
- Gao Y H, Gou C L, Wang Y Q, et al. Effects of the cold-adapted complex microbial agents on cattle manure composting [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(12): 3166-3170.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- Bao S D. Soil agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [21] 林先贵. 土壤微生物研究原理与方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- Lin G X. Research on the principle and method of soil microorganism [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [22] Koukiekolo R, Cho H Y, Kosugi A, et al. Degradation of corn fiber by *Clostridium cellulovorans* cellulases and hemicellulases and contribution of scaffolding protein CbpA [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, 71(7): 3504-3511.
- [23] Rogers G M, Baecker A A W. *Clostridium xylanolyticum* sp. nov., an anaerobic xylanolytic bacterium from decayed *Pinus patula* wood chips [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 1991, 41: 140-143.
- [24] Johnvesly B, Virupakshi S, Patil G N, et al. Cellulase-free thermostable alkaline xylanase from thermophilic and alkalophilic *Bacillus* sp. JB-99 [J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2002, 12: 1553-1556.
- [25] Lynd L R, Weimer P J, Zyl W H, et al. Microbial cellulose utilization: fundamentals and biotechnology [J]. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 2002, 66(3): 506-577.
- [26] Dai Z G, Lu J W, Li X K, et al. Nutrient release characteristics of different crop straws manure [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(6): 272-276.
- [27] Raj D, Antil R S. Evaluation of maturity and stability parameters of composts prepared from agro-industrial wastes [J]. Bioresource Technology, 2011(102): 2868-2873.
- [28] 李国学. 不同通气方式和秸秆切碎程度对堆制效果和养分转化的影响 [J]. 农业环境保护, 1999, 18(3): 106-110.

- Li G X. Effect of different chopped straw in ways and degree of aeration on composting and nutrient transformation [J]. Agro-Environmental Protection, 1999, 18(3): 106-110.
- [29] Gajera H P, Vakharia D N. Production of lytic enzymes by *Trichoderma* isolates during *in vitro* antagonism with *Aspergillus niger*, the causal agent of collar rot of peanut [J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2012, 43(1): 43-52.
- [30] 宋尚成, 朱凤霞, 刘润进, 等. 秸秆生物反应堆对西瓜连作土壤微生物数量和土壤酶活性的影响 [J]. 微生物学通报, 2010, 37(5): 696-700.
- Song S C, Zhu F X, Liu R J, et al. Effects of straw bio-reactor on microorganism population and soil enzyme activity in the watermelon replant soil [J]. Microbiology China, 2010, 37(5): 696-700.
- [31] Hutchison J M, Poust S K, Kumar M, et al. Perchlorate reduction using free and encapsulated *Azospira oryzae* enzymes [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(17): 9934-9941.
- [32] Barbara R H, Thomas H. Reassessment of the taxonomic structure of the diazotrophic genus *Azoarcus sensu lato* and description of three new genera and new species, *Azovibrio restrictus* gen. nov., sp. nov., *Azospira oryzae* gen. nov., sp. nov. and *Azonexus fungiphilus* gen. nov., sp. nov [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2000, 50: 649-659.
- [33] Levican A, Collado L, Figueras MJ. *Arcobacter cloacae* sp. nov. and *Arcobacter suis* sp. nov., two new species isolated from food and sewage [J]. Systematic and Applied Microbiology, 2013, 36(1): 22-27.
- [34] 陈 政, 阳贵得, 孙庆业. 植物群落对铜尾矿废弃地土壤微生物量和酶活性的影响 [J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2189-2193.
- Chen Z, Yang G D, Sun Q Y. Effects of plant communities on soil microbial biomass and enzyme activities in cropper mine tailings dumps [J]. Ecology and Environmental Science, 2009, 18(6): 2189-2193.
- [35] 李 娟. 长期施肥制度土壤微生物学特性及其季节变化 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- Li J. Studies on soil microbial properties and their seasonal variations of different long-term fertilization regimes [D]. Beijing: Doctorial Thesis of China Academy of Agricultural Sciences, 2008.
- [36] 李 丹. 不同土地利用方式对土壤性质及细菌群落结构的影响 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- Li D. Effect community on soil properties and soil bacterial structure by different land use in Maoer Mountain region [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011.
- [37] Yao X H, Min H, Lu Z H, et al. Influence of acetamiprid on soil enzymatic activities and respiration [J]. European Journal of Soil Biology, 2006, 42(2): 120-126.
- [38] 倪国荣, 涂国全, 魏赛金. 稻草还田配施催腐菌剂对晚稻根际土壤微生物与酶活性及产量的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2012, 1(1): 149-154.
- Ni G R, Tu G Q, Wei S J. Effects of straw-returning using agent on microbe and enzyme activity in rhizosphere soils and yield of late rice [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 1(1): 149-154.