

设施鲜秸秆还田条件下土壤特性对碳分解的影响

张敬敏¹, 桑茂鹏², 冯 棣¹, 彭佃亮¹, 张建新¹

(1. 潍坊科技学院, 山东寿光 262700; 2. 曲水县净植茂藤农业科技有限公司, 西藏曲水 850600)

摘要 [目的]探索设施栽培条件下鲜秸秆还田技术,明确土壤特性对还田鲜秸秆分解的影响。[方法]在 PCS 液体培养基中分别加入 4 种不同设施土壤(LC1、LC2、DT1 和 DT2)和等量番茄鲜秸秆,研究设施土壤特性因子对有机碳分解率的影响。[结果]4 种设施土壤,LC1 土壤全盐和真菌最高,pH 最低,碳分解率 91.39%;LC2 土壤有机质最高、全盐最低,碳分解率为 87.91%;DT1 和 DT2 土壤细菌较高,真菌数量较低,碳分解率分别为 91.26%和 92.45%,碳分解率 LC1、DT1 和 DT2 间无显著差异,显著高于 LC2。相关分析表明,土壤有机质与碳分解率呈极显著负相关,pH、全盐、细菌和真菌均与碳分解率相关性不显著。偏相关分析表明,碳分解率与 pH、全盐和真菌的偏相关系数达显著水平。通径分析表明,土壤有机质主要通过土壤全盐和真菌对碳分解率起作用,全盐对碳分解率起正向决定作用,真菌对碳分解率起负向决定作用。[结论]土壤全盐和真菌是影响碳分解率的重要因素。

关键词 鲜秸秆;秸秆还田;土壤特性;碳分解

中图分类号 S 157.4 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2022)13-0069-03

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.13.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effect of Soil Facilities on the Carbon Decomposition under Fresh Straw Returning Conditions in Greenhouse

ZHANG Jing-min¹, SANG Mao-peng², FENG Di¹ et al (1. Weifang University of Science and Technology, Shouguang, Shandong 262700; 2. Jingzhi-Maoteng Agricultural Technology Limited Company in Qushui County, Qushui, Tibet 850600)

Abstract [Objective]To explore fresh straw returning technology in greenhouse and define the effect of soil facilities on straw decomposition. [Method]Adding four different greenhouse soil (LC1, LC2, DT1 and DT2) and equal amount of tomato fresh straw in PCS fluid medium, the relationship between soil facilities and the carbon decomposing rate (CDR) was studied. [Result]Among the four greenhouse soil, LC1 had the highest total salt and fungi quantity, lowest pH, and its CDR was 91.39%; LC2 had the highest organic matter and lowest total salt, its CDR was 87.91%; DT1 and DT2 had the higher bacterial quantity and lower fungi quantity, its CDR were 91.26% and 92.45% respectively. There was no significant difference in the carbon decomposition rate among LC1, DT1 and DT2, and was significantly higher than that of LC2. The correlation analysis showed that only the soil organic matter was significantly negatively correlated with CDR. pH, total salt and bacterial and fungi quantity were no correlation with CDR. Partial correlation analysis showed the biased correlation coefficient between CDR and pH, total salt and fungi quantity reached significant level. Path analysis showed that the soil organic matter had effect on CDR through the soil total salt and fungi quantity, the soil total had a positive decisive role on CDR, the fungi quantity had negatively decisive role on CDR. [Conclusion]The soil total salt and fungi quantity are the key factors on CDR.

Key words Fresh straw; Straw returning; Soil facilities; Carbon decomposition

秸秆还田是秸秆资源化利用的重要方式,也是提高土壤有机质和改善土壤理化特性的重要措施^[1]。秸秆还田的关键问题是秸秆能否快速降解,秸秆降解是在微生物作用下完成的。由于秸秆物质组成和结构的复杂性,越来越多的研究表明,简单地将多种微生物进行人工组合,对天然木质纤维素的降解效果并不理想^[2-3]。秸秆完全降解需要各类微生物共同作用^[3]。因此,筛选和构建复合菌系对研究秸秆分解成为研究热点。

复合菌系可通过直接筛选和人工组合菌群的方式获得。直接筛选法筛选出的复合菌具有菌株组成多样、复合菌系间无拮抗、降解效果稳定等优点而受到越来越多的关注。刘东阳等^[4]以富含纤维素的腐烂稻草、牛粪、中药渣、猪粪为试材进行筛选;王伟等^[5]从长期堆放农业秸秆的土壤中富集法分离纤维素分解菌;苏鑫等^[6]以腐烂芦苇秸秆根部土壤为试材,获得木质素降解复合菌系;孙苗苗等^[7]以腐烂的玉米秸秆为试材筛选到一组玉米秸秆降解复合菌系。复合菌系在

提高秸秆降解方面的优势也得到了证实。王小娟等^[2]筛选的复合菌系可使小麦秸秆最高分解率达 75.6%,麦秆中的纤维素、半纤维素和木质素最高减少了 94.2%。Wang 等^[8]筛选获得的木质纤维素快速降解复合菌系,3 d 可完全降解滤纸。王光琴等^[9]筛选的复合菌系使秸秆 25 d 降解率达 53.35%。崔宗均等^[10]以 4 种高温堆肥为原料构建的纤维素分解菌复合系,使滤纸在 72 h 时完全崩解。以上研究为秸秆降解复合菌系的筛选提供了新思路。

土壤是微生物的大本营,存在着复杂的菌群,有许多可分泌纤维素酶的真菌和细菌^[4],也是微生物存活的优良基质。土壤由于耕作制度、种植条件和水肥管理等方面的不同,其理化特性和微生物千差万别,尤其是设施种植条件下,土壤集约化利用、管理频繁,不同设施土壤差异很大。土壤的差异对还田秸秆分解也产生较大影响,而土壤特性对秸秆分解的影响研究很少涉及。为此,该试验选用易分解的鲜秸秆为试材,将不同设施土壤与鲜秸秆混合培养,研究土壤理化特性和微生物特性对碳分解的影响,为设施蔬菜秸秆还田提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料 利用滤纸分解试验,筛选出若干滤纸降解能力强的土样。从滤纸分解能力强的土样中,随机选取 4

基金项目 山东省重点研发计划“蔬菜秸秆原位全量还田关键技术研究与应用”(2019GSF109113);西藏自治区自然科学基金重点项目“设施土壤生态利用技术模式研究与应用”(XZ202001ZR0067G)。

作者简介 张敬敏(1975—),女,山东济宁人,副教授,博士,从事农业废弃物资源化利用研究。

收稿日期 2022-03-18

种,于2020年7月夏季休闲期取土壤鲜样,为供试土样。4种设施土壤分别来自寿光洛城北纸坊村(LC1)、洛城东孙家庄村(LC2)、稻田镇青田湖村1(DT1)、田镇青田湖村2(DT2)。土壤样品取回后,部分鲜样放入-80℃冰箱中保存,用于微生物测定和培养试验,其余样品风干用于土壤特性分析。

选取无病害完整番茄植株,洗净沥干后切碎至长度小于1 cm备用。

PCS培养基配方:蛋白胨5 g,酵母提取物1 g,NaCl 5 g,KH₂PO₄ 0.25 g,MgSO₄·7H₂O 0.01 g,CaCO₃ 3 g,溶解在1 L水中。

1.2 试验方法 50 mL PCS液体培养基置于150 mL三角瓶中,灭菌,冷却,加入5 g切碎的番茄鲜秸秆,再分别加入LC1、LC2、DT1、DT2土样各3 g(以干重记),振荡5 min混匀。空白CK只加番茄秸秆,不加土样。各处理置于30℃恒温箱中培养。每处理6次重复。14 d后,番茄秸秆已基本降解时,过滤。残渣烘干称重,测定其有机碳的含量。

表1 4种设施土壤特性
Table 1 Soil characteristics of four greenhouse

处理 Treatment	有机质 Organic matter g/kg	pH	全盐 Total salt g/kg	细菌 Bacteria ×10 ⁶ 个	真菌 Fungi ×10 ⁴ 个
LC1	23.13±1.15 c	7.10±0.02 b	6.64±0.04 a	1.32±0.03 d	7.83±0.18 a
LC2	32.25±0.44 a	7.27±0.09 a	0.93±0.02 d	2.67±0.02 c	3.34±0.07 b
DT1	22.90±0.56 c	7.23±0.03 a	1.25±0.03 c	5.96±0.09 a	1.35±0.01 c
DT2	25.11±0.36 b	7.24±0.03 a	1.39±0.01 b	4.33±0.05 b	1.31±0.02 c

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$)

2.2 碳分解率 由表2可见,CK处理未添加土壤样品,残渣质量、分解前总碳和碳分解率均最低,残渣有机碳最高,各指标与添加土壤样品处理均差异显著。4种设施土壤处理,残渣质量DT2最低;残渣有机碳和残渣总碳均以LC2处理最

1.3 测定项目与方法 土壤有机质和残渣有机碳采用重铬酸钾氧化-容量法测定,有关碳的计算方法如下:

残渣总碳=残渣质量×残渣有机碳 (1)

分解前总碳=土壤碳+秸秆碳 (2)

碳分解率=100-残渣总碳×100/分解前总碳 (3)

土壤pH采用电位法(水土比为2.5:1)测定;土壤全盐采用重量法测定。细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基培养,真菌采用改良马丁培养基培养,稀释平板计数法计数。

1.4 数据分析 采用DPS进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 土壤特性 由表1可见,土壤有机质以LC2为最高,分别是LC1、DT1、DT2的1.39、1.41和1.28倍。土壤pH,LC2、DT1、DT2显著高于LC1。土壤全盐,LC1最高,分别是LC2、DT1、DT2的7.14、5.31和4.78倍。土壤真菌,LC1分别是LC2、DT1、DT2的2.34、5.80和5.98倍。4种设施土壤,LC1土样全盐、真菌数量最高,pH和细菌数量最低,各指标均与其他土壤有显著差异,呈现酸化和重度盐渍化退化现象。

高,显著高于LC1、DT1和DT2处理。分解前总碳与土壤有机质规律一致,从大到小依次为LC2>DT2>LC1>DT1>CK。碳分解率,LC1、LC2、DT1、DT2处理分别是CK的1.22、1.17、1.22和1.23倍。说明添加土壤可显著促进有机碳的分解。

表2 不同处理残渣质量、碳量和碳分解率

Table 2 Residue quality, carbon content and carbon decomposition rate of different treatments

处理 Treatment	残渣质量 Residue quality g	残渣有机碳 Residual organic carbon//g/kg	残渣总碳 Residual total carbon//mg	分解前总碳 Total carbon before decomposition//mg	碳分解率 Carbon decomposition rate//%
CK	0.54±0.03 c	26.62±0.70 a	14.37±0.89 b	57.59±0.24 d	75.05±1.55 c
LC1	3.35±0.02 ab	4.57±0.03 c	15.29±0.08 b	177.50±3.63 c	91.39±0.13 a
LC2	3.41±0.03 a	7.97±0.58 b	27.15±1.94 a	224.78±4.73 a	87.91±1.07 b
DT1	3.41±0.06 a	4.52±0.06 c	15.40±0.12 b	176.31±3.03 c	91.26±0.21 a
DT2	3.31±0.04 b	4.28±0.31 c	14.18±1.17 b	187.76±2.10 b	92.45±0.54 a

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$)

2.3 土壤特性与碳分解率关系分析

2.3.1 相关分析。以土壤有机质(X_1)、pH(X_2)、全盐(X_3)、细菌(X_4)、真菌(X_5)为自变量,碳分解率(Y)为因变量,进行相关分析,结果如表3所示。由表3可见,碳分解率与土壤有机质呈极显著负相关,与土壤pH、全盐、细菌和真菌相关性不显著。土壤pH与全盐和真菌呈极显著负相关。土壤全盐与细菌呈极显著负相关,与真菌呈极显著正相关。

2.3.2 偏相关分析。多元相关分析中,由于其他变量的影响或作用,使相关系数不能真实地反映出自变量 X 和因变量 Y 之间的相关性。偏相关系数是假定其他变量都取值为均数,某自变量与因变量的关系。通过逐步回归分析,得出土壤有机质(X_1)、pH(X_2)、全盐(X_3)、真菌(X_5)对碳分解率的偏相关系数。由表4可见,pH(X_2)、全盐(X_3)、真菌(X_5)与碳分解率的偏相关系数均达显著差异。

表 3 土壤指标和碳分解率的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between soil index and carbon decomposition rate

变量 Variable	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
X_2	0.545	1			
X_3	-0.465	-0.830**	1		
X_4	-0.271	0.488	-0.711**	1	
X_5	-0.120	-0.723**	0.928**	-0.885**	1
Y	-0.813**	-0.192	0.272	0.294	-0.085

注: ** 表示极显著相关 ($P<0.01$)
Note: ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$)

表 4 土壤特性和碳分解率间的偏相关性分析

Table 4 Partial correlation analysis between soil properties and carbon decomposition rate

相关关系 Correlation	偏相关 Partial correlation	t 检验值 t -test value	P 值 P value
$r(y, X_1)$	0.626	2.125	0.066 4
$r(y, X_2)$	0.789	3.392	0.009 5
$r(y, X_3)$	0.946	7.739	0.000 1
$r(y, X_5)$	-0.940	7.289	0.000 1

由逐步回归分析,建立碳分解率与土壤特性指标的最优线性回归方程: $Y=19.62+0.21X_1+9.17X_2+3.08X_3-2.38X_5$,相关系数(r)为 0.987 3,决定系数(R^2)为 0.974 8,说明引入有机质(X_1)、pH(X_2)、全盐(X_3)、真菌(X_5) 4 个变量,对碳分解率(Y)的解释作用可达 97.47%。

表 5 土壤特性与碳分解率的通径分析

Table 5 Path analysis of soil properties and carbon decomposition rate

变量 Variable	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient				与 Y 相关系数 Correlation coefficient with Y
		X_1	X_2	X_3	X_5	
X_1	0.450		0.210	-1.907	0.427	-0.813
X_2	0.399	0.245		-3.405	2.569	-0.192
X_3	4.105	-0.209	-0.331		-3.294	0.271
X_5	-3.551	-0.054	-0.289	3.808		-0.086

3 讨论与结论

秸秆分解是微生物作用下的生化过程,主要通过调节物料 C/N 比、加入微生物菌剂和改善环境因素以促进秸秆降解^[11],很少关注土壤本身特性对秸秆降解的作用。而实际上,土壤本身特性对秸秆的分解具有决定性作用。该试验中,供试的 4 种设施土壤,是筛选出的具有滤纸分解能力的土壤。4 种设施土壤 LC1、LC2、DT1、DT2 处理碳分解率分别为 91.39%、87.91%、91.26% 和 92.45%,显著高于不加土壤的 CK 处理,一方面,证明了 4 种土壤均可促进秸秆分解,另一方面,碳分解率的提高与激发效应也有关系。

相关性分析表明,碳分解率与土壤有机质呈极显著正相关,与土壤 pH、全盐、细菌和真菌相关性不显著。偏相关分析表明,碳分解率与 pH、全盐和真菌的偏相关系数达显著水平。进一步通径分析表明,直接通径系数和间接通径系数的绝对值均以土壤全盐最大,其次是土壤真菌,全盐和真菌是影响碳分解的重要因素。

土壤细菌与碳分解率不相关,偏回归系数未达显著水平,未进入回归方程,说明细菌对碳分解率没有影响。土壤 pH、全盐和真菌与碳分解率相关系数未达显著水平,但其与碳分解率的偏相关系数达到显著水平,有统计意义,应引入方程。

2.3.3 通径分析。为进一步明确土壤特性与碳分解率关系,对土壤特性指标和碳分解率进行通径分析。通径分析可解释自变量对于因变量的作用方向和作用强度,可将因变量与自变量的相互影响(相关分析)分解为直接影响(直接通径系数)和间接影响(间接通径系数)。直接通径系数和间接通径系数之和是自变量与因变量的相关系数。通径系数是变量标准化后的偏回归系数,某自变量通径系数为负数时,其对因变量起负作用。

由表 5 可见,直接通径系数从大到小依次为土壤全盐>有机质>pH>真菌,土壤全盐的直接通径系数为 4.105,其对碳分解率具有较强的促进作用。同理,土壤真菌数量对碳分解率起负作用。间接通径系数,土壤有机质通过全盐($X_1 \rightarrow X_3 \rightarrow Y$)对碳分解率起负作用(间接通径系数-1.907),通过 pH($X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow Y$)和真菌($X_1 \rightarrow X_5 \rightarrow Y$)起正作用。同理,土壤 pH 通过有机质和真菌对碳分解率起正作用,通过全盐起负作用。土壤全盐通过有机质、pH 和真菌对碳分解率起负作用。土壤真菌通过全盐对碳分解率起正作用。直接通径系数和间接通径系数的绝对值均以土壤全盐最大,其次是土壤真菌,二者是影响碳分解率的重要因素。

研究表明,真菌的降解效果远高于细菌,这与该研究结果一致,土壤细菌与碳分解率的相关系数和偏相关系数均不显著。真菌数量^[12]、菌株比例^[13-14]、培养条件^[15-16]等均可影响秸秆降解效果。该试验中,LC1 处理碳分解率与 DT1 和 DT2 处理无显著差异,一方面,或许是由于酸化和盐渍化土壤中的真菌多为有害真菌,非有益真菌,因而对碳分解率起负向作用;另一方面,由于盐渍化土壤矿物离子含量高,为土壤微生物增殖提供充足的养分,碳分解率较高,这也间接说明秸秆还田对盐渍化土壤具有改良作用。LC2 处理,有机质和真菌均较高,全盐含量较低,加入秸秆后,或许由于其他养分不足或土壤有机质具有较强的稳定性,碳分解率显著低于 LC1、DT1 和 DT2 处理。DT1 和 DT2 土壤各指标适中,碳分解率较高。因此,土壤本身特性对秸秆降解有显著影响,全盐和真菌数量是重要的影响因子,但影响的方向和作用强度需根据具体条件来判定。

择性还需要很多数据支持。

公象的交配行为如爬跨行为同样需要学习。昆明动物的公象“邓丹”与母象“昆琨”一起饲养多年,但“邓丹”一直没有繁殖成功,期间有爬跨行为,生殖器也会勃起,但进入不了母象阴道,始终没有繁殖成功,“邓丹”会自慰出精液。“邓丹”在幼年时期服过劳役,在昆明动物园成年后,1999—2004年驯化参与照相经营项目,与其他象群没有过多的机会接触,导致繁殖年龄交配行为受阻。公象的繁殖行为是否与劳役行为有关还需要更多数据支持和研究。

9.3 安全教训 昆明动物园在近 20 年中发生过 2 次亚洲象严重伤人事件,2004 年 8 月 8 日饲养员在清理大象内舍时被公象袭击身亡,2013 年 2 月 19 日饲养员在小象房内室时突发意外,被母象踩死。2 次血的事故使我们总结很多经验教训:日常卫生清理严格执行隔离操作,如需治疗、训练等时采取保护性接触,禁止直接接触操作;不断改善笼舍机构,使其使用时更加科学合理;加强象的日常行为观察,掌握每头象的生理习性;象舍内外全方位无死角监控,提高突发事件处理能力和预见能力;加强培训提高操作人员安全意识和心理素质等。近年来时常有象伤人事件的报道,原因多为违反操作流程,直接接触操作所致。

9.4 制约圈养亚洲象可持续发展的原因分析 国内圈养亚洲象的存栏量有限,各公园都把亚洲象当作宝贝,国外进口困难种种,致使亚洲象种源交换困难。笔者认为加强各公园的信息交流,充分发挥各公园资源优势,采取联合繁殖可有效解决种源匮乏的困境。其次是圈养亚洲象的场馆面积总体偏小、笼舍陈旧、资金短缺等现实问题同样制约圈养亚洲象的可持续发展。建议相关政府部门借鉴大熊猫的保护经验,把异地保护圈养亚洲象纳入政府财政专项资金,以此解决场馆面积小、笼舍设施陈旧等问题,还可以考虑建立亚洲象繁殖基地,发展壮大圈养亚洲象种群。

9.5 经验

(1)常年能提供青绿饲料如象草、甘蔗、芦苇对圈养亚洲象至关重要,特别是甘蔗能为亚洲象提供充足的能量。

(2)圈养亚洲象群居群养非常重要,一般形成 1 ♂ 2 ♀ 或

者 1 ♂ 3 ♀ 的繁殖种群最佳。

(3)象群之间的繁殖交配行为和哺育行为需要不间断的学习和传承。

(4)母象产后喂中医益母草颗粒对母象子宫恢复效果较好,喂红糖粉对母象体质恢复效果较好。

(5)幼象出生后,母象会在第一时间用腿和鼻子帮助幼象去掉胎衣,让幼象顺畅呼吸。并用腿和鼻子帮助幼象站立,尽量减少人为干预。

(6)幼象出生 0~24 h 是最关键时期,幼象在出生后 0.5~3.0 h 能站立,3~10 h 能吃上初乳,幼象尽早站立和吃上初乳至关重要。

(7)幼象 0~30 日龄对母象和幼象都是关键的哺育期,加强对母象的营养供给,保温保暖很关键。

(8)幼象出生 7 d 后要观察脐带是否脱落,防止脐带发炎。象舍要保温透气,温度控制在 20~25 ℃。

(9)隔离操作和保护性接触是确保圈养亚洲象安全操作的有效措施。

(10)圈养亚洲象的怀孕期为 21~23 月,繁殖间隔 3~5 年,幼象 1.5~2.0 岁断奶为最佳。

参考文献

- [1] 赵宇,金崑. 亚洲象分布、数量、栖息地状况及种群管理[J]. 世界林业研究,2018,31(2):25-30.
- [2] 朱高凡,郑璇,吕婷,等. 西双版纳-普洱亚洲象种群动态分析[J]. 林业建设,2019(6):85-90.
- [3] 吕婷,郑璇,朱高凡,等. 西双版纳勐腊亚洲象种群数量动态分析[J]. 林业建设,2019(6):91-96.
- [4] 王智红,张恒振,赵文蓝,等. 西双版纳勐海-普洱澜沧亚洲象种群动态分析[J]. 林业建设,2019(6):79-84.
- [5] 蒋桂莲,朱高凡,汤永晶,等. 云南江城-思茅-景洪交界亚洲象种群数量及结构分析[J]. 林业建设,2019(6):74-78.
- [6] 汤永晶,王志胜,蒋桂莲,等. 云南南滚河流域亚洲象种群动态分析[J]. 林业建设,2019(6):97-102.
- [7] 林柳,张龙田,罗爱东,等. 尚勇保护区亚洲象种群数量动态、种群结构及季节分布格局[J]. 兽类学报,2011,31(3):226-234.
- [8] 刘文荣,刘美艳. 行为管理在圈养亚洲象饲养管理中的作用探讨[J]. 安徽农业科学,2022,50(1):96-98,101.
- [9] 郭瑞,胡俊,朱瀚青,等. 圈养亚洲象的足部护理[J]. 畜牧兽医科技信息,2019(1):145-146.
- [10] 孙伟东,梁作敏,尹军力. 环境丰容对圈养亚洲象行为的影响[J]. 畜牧与兽医,2013,45(7):34-35.
- [11] 朱金霞,孔德杰,尹志荣. 农作物秸秆主要化学组成及还田后对土壤质量提升影响的研究进展[J]. 北方园艺,2020(5):146-153.
- [12] 王小娟,李培培,袁旭峰,等. 4 组常温分解小麦秸秆复合菌系的比较研究[J]. 中国农业大学学报,2011,16(1):24-29.
- [13] 梅新兰,郑海平,李水仙,等. 降解水稻秸秆细菌-真菌复合菌系的构建与评价[J]. 农业环境科学学报,2021,40(10):2217-2225.
- [14] 刘东阳,王蒙蒙,马磊,等. 高效纤维素分解菌的分离筛选及其分解纤维素研究[J]. 南京农业大学学报,2014,37(6):49-58.
- [15] 王伟,郑大浩,杨超博,等. 高效纤维素分解菌的分离及秸秆降解生物效应[J]. 中国农业科技导报,2019,21(8):36-46.
- [16] 苏鑫,王敬红,张方政,等. 复合菌系降解玉米秸秆过程中群落演替与秸秆降解的关系[J]. 微生物学报,2020,60(12):2675-2689.
- [17] 孙苗苗,李娟,刘国庆,等. 木质纤维素降解复合菌系筛选与鉴定[J]. 湖北农业科学,2021,60(16):44-49.
- [18] WANG W D, YAN L, CUI Z J, et al. Characterization of a microbial consortium capable of degrading lignocellulose[J]. Bioresource technology, 2011, 102(19):9321-9324.
- [19] 王光琴,黄莺,温明霞,等. 5 株纤维菌属菌株的分离、鉴定及产酶活性研究[J]. 中国农学通报,2021,37(15):112-119.
- [20] 崔宗均,李美丹,朴哲,等. 一组高效稳定纤维素分解菌复合系 MC1 的筛选及功能[J]. 环境科学,2002,23(3):36-39.
- [21] 陈文新. 土壤和环境微生物学[M]. 北京:北京农业大学出版社,1990:91-94.
- [22] 江高飞,杨天杰,郑海平,等. 降解玉米秸秆真菌复合菌系的构建及其降解效果评价[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(2):284-292.
- [23] 李静,张瀚能,赵翀,等. 高效纤维素降解菌分离筛选、复合菌系构建及秸秆降解效果分析[J]. 应用与环境生物学报,2016,22(4):689-696.
- [24] 陈世珩,吕兆丰,王道武,等. 耐低温降解玉米秸秆复合菌剂的构建及其降解效果评价[J]. 安徽农业科学,2022,50(4):64-68.
- [25] 侯敏,包慧芳,王宁,等. 棉秆纤维素降解菌系构建及固体发酵条件优化[J]. 新疆农业科学,2018,55(5):936-948.
- [26] 余淼. 产蛋白酶霉菌的分离鉴定、蛋白酶基因 cDNA 克隆及产酶条件优化[D]. 成都:西南民族大学,2013:43.

(上接第 71 页)

参考文献