

固态发酵玉米秸秆生产饲料蛋白发酵培养基研究

李日强, 王爱英, 葛志安

(山西大学环境与资源学院, 山西 太原 030006)

摘要:为了提高玉米秸秆的综合利用效率,降低对环境的污染,保护生态环境,利用正交实验法研究了固态发酵氨化玉米秸秆生产饲料蛋白发酵培养基的不同配比对发酵产物蛋白含量的影响。结果表明,微量元素添加量对发酵产物真蛋白含量的影响差异显著($P<0.01$),氨化玉米秸秆:麸皮与微量元素添加量间的交互作用对发酵产物真蛋白含量的影响差异显著($P<0.05$)。最佳发酵培养基配比为氨化玉米秸秆:麸皮为 100:0,原料:水为 1:4.5,微量元素添加量为 4.4%,尿素添加量为 5%。采用最佳发酵培养基,玉米秸秆经氨水氨化和固态发酵后真蛋白含量由 2.05%提高到 28.61%,比原料本身的真蛋白含量高 1 295.6%;粗蛋白含量由 2.8%提高到 32.39%,比原料本身的粗蛋白含量高 1 056.8%。

关键词:固态发酵;玉米秸秆;饲料蛋白;发酵培养基

中图分类号:X712 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)06-2484-05

Study on the Fermentation Medium of Solid-State Fermentation of Corn Straw to Produce Feeding-Protein

LI Ri-qiang, WANG Ai-ying, GE Zhi-an

(School of Environment and Resource, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of multiple use of corn straw, and reduce its pollution to environment and protect eco-environment, the effect of the combination of the fermentation medium of solid-state fermentation of ammoniated corn straw to produce feeding-protein on the protein content of fermented products were studied by using orthogonal design of four factors and three levels. Experiments were performed according to $L_{27}(3^3)$ orthogonal design, in which the different ratios of ammonified corn straw to wheat bran (w/w) were 100:0, 95:5 and 90:10, respectively; the ratios of solid material to water (w/w) were 1:3, 1:4.5 and 1:6, separately; the concentrations of trace elements were 0%, 2.2% and 4.4%; and the concentrations of urea were 2%, 3% and 4%. Data were analyzed using student t-test, analysis of variance test, and Duncan's multiple range test. The results showed that the effect of trace elements on the pure protein content of the fermented product was significant ($P<0.01$), and the effect of interaction between the ratio of ammoniated corn straw to wheat bran and trace element on that was also significant ($P<0.05$). The optimal combination of the medium was 100:0 of ammoniated corn straw; wheat bran, 1:4.5 of raw material; water, adding 4.4% of trace element and 5% of urea respectively. Using the optimal combination of the fermentation medium, the pure protein content of the corn straw was increased from 2.05% to 28.61% after ammonification and solid-state fermentation, which was 1 295.6% higher than that of non-fermented control. While the crude protein content of the corn straw was increased from 2.8% to 32.39%, which was 1 056.8% higher than that of non-fermented control.

Keywords: solid-state fermentation; corn straw; feeding-protein; fermentation medium

世界上种植的各种谷物每年可自然再生秸秆约 1.7×10^9 t, 我国的各类农作物秸秆资源十分丰富, 每年产量约 7.0×10^8 t^[1], 仅玉米秸秆有 2.4×10^8 t, 这是一个巨大的可利用的再生资源, 但目前对秸秆的利用率却

很低, 用作饲料的还不足 10%, 大部分被直接燃烧, 这不仅浪费资源, 还造成环境污染。另外, 我国是一个饲料严重短缺的大国, 每年需进口大量鱼粉以补饲料蛋白的不足。因此, 探索将秸秆转化为动物可利用的营养价值高的饲料蛋白的方法是一项具有战略意义的研究课题。

玉米秸秆中的纤维素为逆式 D-葡萄糖的聚合体, 与 D-木糖多聚体的半纤维素、果胶质和苯衍生物

收稿日期: 2007-12-13

基金项目: 山西省科技攻关资助项目(022049)

作者简介: 李日强(1961—), 男, 副教授, 主要从事环境微生物及废水处理的教学与研究工作。E-mail: liriqiang@sxu.edu.cn

木质素结合在一起,不能溶于水,也不能被消化液所溶解,更不能被畜禽类胃肠道消化分解。因此,要提高玉米秸秆的营养价值,应将难以消化的纤维素降解,增加可消化蛋白的含量。近年来,人们分离和筛选出了一些分解秸秆的高效菌株^[2-8],用其来发酵秸秆类纤维素物质生产饲料蛋白。杨雪霞等^[9]以汽爆玉米秸秆为原料,优化了固态发酵生产蛋白饲料的工艺条件。Yang 等^[10]将固态发酵和青贮联合起来,增加了青贮效率并降低了生物处理过程的成本。黄丹莲等^[11]通过正交实验法对影响白腐菌固态发酵降解稻草木质素的单因素培养条件进行了优化。李爱华等^[12]通过对纤维素酶、半纤维素酶活力的比较,筛选出康宁木霉 Km-1、米曲霉 Mq-1 作为纤维素分解酶菌种,再配合以热带假丝酵母 Rj-1、白地霉 Ba-1 和植物乳酸菌 ZH-1 等,经分别培养后,按一定比例配成农作物秸秆发酵剂。潘锋等^[13]以稻草为原料,利用酵母菌和真菌混合发酵生产蛋白饲料。史小丽等^[14]通过正交实验对黑曲霉和饲料酵母在秸秆上共发酵生产单细胞蛋白的条件进行了研究。张伟心等^[15]通过筛选确定了发酵玉米秸秆生产菌体蛋白饲料混合菌的组成。杨雪霞等^[16]在加氨条件下对玉米秸秆进行了汽爆处理和固态发酵。李日强和张峰^[17]利用能降解纤维素和木质素的菌种对玉米秸秆粉进行了单菌株发酵、多菌株组合发酵以及不同氮源发酵生产饲料蛋白的研究。李日强等^[18]针对玉米秸秆的立体结构与木质素的屏障作用,对玉米秸秆进行了氨化处理和固态发酵生产饲料蛋白的研究。人们虽然在利用微生物发酵秸秆生产饲料蛋白的研究中做了大量的工作,但发酵产物的蛋白含量都较低,并且对固态发酵培养基各组分的配比还缺乏系统的实验研究。本研究是利用组合菌株固态发酵氨化玉米秸秆,通过改变发酵培养基各组分的配比,以期得到最好的发酵效果,为提高玉米秸秆的利用效率、降低对环境的污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 菌种

组合菌株由青霉(*Penicillium* sp.)、葱色串孢(*Torula allii*)、黑孢毛壳(*Chaetomium atrosporum*)和白地霉(*Geotrichum candidum*)4 株菌组成。其中 *Penicillium* sp. 由本实验室分离所得,其余 3 株购于中国科学院微生物研究所。

1.2 培养基

1.2.1 斜面培养基

采用马铃薯培养基。

1.2.2 液态种子培养基

将 200 g 去皮马铃薯切块,加水 1 000 mL 煮沸 30 min,然后用纱布过滤,再加入 20 g 蔗糖,溶化后补加水到 1 000 mL,自然 pH,每 160 mL 分装到 250 mL 三角瓶中,再加入 1%的秸秆粉,0.1 MPa 灭菌 20 min。

1.3 玉米秸秆的氨化

将从太原市小店区北张村大田采到的玉米秸秆粉碎过 60 目筛,向干燥的玉米秸秆粉中加入 30% (W/W)的水,混合均匀后迅速转移到下口瓶中,再从瓶的底部加入 16%(V/W)的氨水后,立即密封下口瓶,放入 35 ℃左右的培养箱中氨化 9 d,在 60 ℃下烘干备用^[18]。

1.4 实验设计与统计分析

采用正交实验法,用 4 因素 3 水平(表 1)实验,考虑到各因素间的交互作用,选取 L₂₇(3¹³)正交表(表 2)进行实验。对实验结果进行方差分析和平均数的 Duncan 多重比较。

表 1 发酵培养基配比因素水平表

Table 1 The factors and their levels of fermentation medium				
水平	氨化玉米秸秆:麸皮 (W/W)A	物料:水 (W/W)B	微量元素 /%,C	尿素 /%,D
1	100:0	1:3	0	4
2	95:5	1:4.5	2.2	5
3	90:10	1:6	4.4	6

1.5 微量元素

微量元素混合液由 FeSO₄·7H₂O 0.597%、ZnSO₄·7H₂O 0.528%、MnSO₄·H₂O 0.074%、MgSO₄·7H₂O 1.217%、KH₂PO₄ 1.0%组成。

1.6 固态发酵

将所选用的 4 株菌活化,分别接种到 250 mL 装有液态种子培养基的三角瓶中,28 ℃振荡(135 r·min⁻¹)培养 36 h,混合后以总量为 20%的接种量接种于按实验设计的各固态发酵培养基中(表 2),30 ℃静置发酵培养 5 d,每个实验重复 3 次。

1.7 分析方法

真蛋白含量分析:取发酵产物 1 g(干重)加 30 mL 75%的乙醇提取 1 h,充分搅拌后,于 4 000 r·min⁻¹下离心 10 min,弃去上清液,沉淀于 60 ℃下干燥,而后依据 GB/T 6432—94 进行蛋白含量的测定。粗蛋白含量的测定按照 GB/T 6432—94 进行。

2 结果与分析

发酵产物在 60 ℃下烘干,进行真蛋白和粗蛋白的测定,结果见表 2。对表 2 发酵产物真蛋白含量的初步方差分析结果表明(见表 3),微量元素对发酵产物真蛋白含量的影响差异显著($P<0.05$),其余因素及其交互作用对发酵产物真蛋白含量的影响差异皆不显著($P>0.05$)。

将表 3 中比 2 MSe (2 倍误差项均方)小的那些(氨化玉米秸秆:麸皮,物料:水和尿素)离差平方和及自由度因素合并到误差项,得到新的方差分析结果(见表 4)。由表 4 可见,微量元素添加量对发酵产物真蛋白含量的影响差异显著($P<0.01$),氨化玉米秸秆:麸皮和微量元素添加量间的交互作用($A\times C$)对发

酵产物真蛋白含量的影响差异显著($P<0.05$),即 A 因素与 C 因素各水平之间的不同搭配对发酵产物真蛋白含量的影响差异显著,其余因素和交互作用对发酵产物真蛋白含量的影响差异不显著。

由氨化玉米秸秆:麸皮 $\times$ 微量元素添加量 ($A\times C$)发酵产物真蛋白含量的二元表(表 5),应用 Duncan 的多重比较可以获得氨化玉米秸秆:麸皮和微量元素添加量的最佳搭配为 A_1C_3 ,即氨化玉米秸秆:麸皮为 100:0,微量元素添加量为 4.4%。

由于物料:水和尿素各水平之间差异不显著(见表 3),考虑到实际生产中的应用,组合菌株(青霉、葱色串孢、黑孢毛壳和白地霉)固态发酵氨化玉米秸秆制备饲料蛋白发酵培养基的最佳配比为 $A_1B_2C_3D_2$,即氨化玉米秸秆:麸皮为 100:0,物料:水为 1:4.5,微量

表 2 正交设计[L₂₇(3¹³)]及实验结果($\bar{x}\pm s$)
Table 2 Orthogonal design[L₂₇(3¹³)]and the results of experiment($\bar{x}\pm s$)

实验号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	发酵产物	发酵产物
	A	B	A×B	A×B	C	A×C	A×C	B×C	B×C				D	真蛋白/%	粗蛋白/%
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	18.85±1.81	24.71±1.12
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	19.46±1.73	31.84±0.92
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	23.31±1.02	34.41±0.55
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	22.22±1.22	27.68±0.78
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	19.29±1.65	26.37±0.54
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	28.61±0.78	32.39±0.38
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	19.54±1.88	30.67±0.67
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	20.55±1.54	23.19±0.45
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	25.36±0.88	31.1±0.85
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	22.7±0.89	26.52±0.79
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	21.59±1.11	32.96±0.94
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	25.03±0.78	33.81±0.79
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	23.10±0.67	26.67±0.84
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	21.29±1.21	25.24±1.05
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	24.15±0.87	28.05±0.69
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	18.57±1.34	23.71±1.46
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	21.13±0.68	25.23±0.96
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	24.38±1.03	29.42±0.68
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	21.45±1.32	28.9±0.84
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	21.11±0.87	26.15±0.93
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	23.02±0.68	28.18±0.86
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	22.16±1.23	26.68±0.78
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	19.37±1.65	25.27±1.34
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	19.34±1.48	28.77±0.45
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	23.31±0.78	27.35±0.75
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	22.61±1.21	25.94±0.83
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	20.39±0.89	23.82±1.56

注:玉米秸秆的真蛋白含量为 2.05%,粗蛋白含量为 2.80%。

元素添加量为 4.4%和尿素添加量为 5%。在此配比下,发酵产物中真蛋白的含量达 28.61%;粗蛋白含量达 32.39%。

表 3 发酵产物真蛋白含量的方差分析
Table 3 ANOVA for the pure protein content of fermented products

变差来源	差方和	自由度	均方	F	显著性
A	4.72	2	2.36	0.9	*
B	0.85	2	0.42	0.16	
C	45.88	2	22.94	8.79	
D	0.49	2	0.24	0.10	
A×B	22.42	4	5.6	2.14	
A×C	44.13	4	11.03	4.23	
B×C	9.51	4	2.38	0.91	
误差项	15.68	6	2.61		
合计	143.68	26			

注:*表示 $P<0.05$ 。

表 4 发酵产物真蛋白含量的方差分析
Table 4 ANOVA for the pure protein content of fermented products

变差来源	差方和	自由度	均方	F	显著性
C	45.88	2	22.94	12.67	**
A×B	22.42	4	5.6	3.09	*
A×C	44.13	4	11.03	6.09	
B×C	9.51	4	2.38	1.31	
误差项	21.74	12	1.81		
合计	143.68	26			

注:**表示 $P<0.01$;*表示 $P<0.05$ 。

表 5 A×C(氨化玉米秸秆:麸皮×微量元素添加量)发酵产物真蛋白平均含量(%)

Table 5 The pure protein content of fermented products by interaction A×C(mean)		微量元素/%		
氨化玉米秸秆:麸皮		0	2.2	4.4
100:0	20.2	19.77	25.76	
95:5	21.47	21.34	24.52	
90:10	22.31	21.03	20.92	

3 讨论

张伟心等^[15]对发酵培养基中玉米秸秆与麸皮的比例以及物料与水的比例进行了考察,表明玉米秸秆:麸皮为 1:1 效果最好,物料:水以 1:1.2 为宜。而本实验结果表明氨化玉米秸秆:麸皮为 100:0,物料:水为 1:4.5,即发酵采用纯秸秆粉,无需在发酵培养基中添

加其他有机营养物如麸皮等,可降低成本。无机盐是微生物生长必不可少的一类营养物质,它们为机体生长提供必须的金属元素。这些金属元素在机体中参与酶的组成、构成酶的活性、维持细胞的稳定性、调节与维持细胞的渗透压平衡和控制细胞的氧化还原等。秸秆中无机盐含量很低,而且明显缺乏钴、铜、硫、钠、硒和碘等元素,所以在发酵培养基中添加合适的无机盐是必不可少的。氮源是微生物生长繁殖所必需的营养要素,能够被微生物用作氮源的物质有很多,在实验室或生产上常用的氮源物质有铵盐、硝酸盐和尿素等,对相同添加量的尿素和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 发酵产物的真蛋白含量进行对比分析,加入尿素对秸秆真蛋白含量的提高效果比加入 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 的要好^[17],故实验以尿素为氮源物质。

另外,秸秆这种天然纤维性材料具有复杂的立体结构,特别是木质素的屏障作用,使微生物很难将其快速转化。利用氨水对玉米秸秆进行氨化处理,能大幅度提高秸秆的含氮量,部分地改变其天然结构。氨化后的玉米秸秆富集了大量的可发酵性碳源和氮源,有利于微生物的固态发酵,所以本实验在固态发酵之前首先对玉米秸秆进行了氨化处理。张伟心等^[15]和王德培等^[19]对发酵的起始 pH 进行了研究,结果分别表明最佳起始 pH 为 5.5 和 3.0,但对于固态发酵,调节发酵培养基 pH 的工序较烦琐,所以本实验采用起始自然 pH 发酵。

4 结论

(1)利用组合菌株(青霉、葱色串孢、黑孢毛壳和白地霉)在固态发酵氨化玉米秸秆生产饲料蛋白的过程中,微量元素添加量对发酵产物真蛋白含量的影响差异显著($P<0.01$),氨化玉米秸秆:麸皮与微量元素添加量间的交互作用对发酵产物真蛋白含量的影响差异显著($P<0.05$)。

(2)利用组合菌株(青霉、葱色串孢、黑孢毛壳和白地霉)固态发酵氨化玉米秸秆生产饲料蛋白的最佳发酵培养基配比为 $\text{A}_1\text{B}_2\text{C}_3\text{D}_2$,即氨化玉米秸秆:麸皮为 100:0,原料:水为 1:4.5,微量元素添加量为 4.4%,尿素添加量为 5%。

(3)采用最佳发酵培养基配比,玉米秸秆经氨水氨化和固态发酵后真蛋白含量由 2.05% 提高到 28.61%,比原料本身的真蛋白含量高 1 295.6%;粗蛋白含量由 2.8%提高到 32.39%,比原料本身的粗蛋白含量高 1 056.8%。

参考文献:

[1] 卞有生. 生态农业中废弃物的处理与再生利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000. 125.
BIAN You-Sheng. The treatment and reutilization of wastes in ecological agriculture[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000. 125.

[2] 孙力军, 商常发, 钟德山, 等. 高效秸秆发酵剂优良菌种的分离筛选与鉴定[J]. 安徽农业技术师范学院学报, 1999, 13(3): 11-13.
SUN Li-jun, SHANG Chang-fa, ZHONG De-shan, et al. Isolation and identification of good strains of high effective straw fermentation agent [J]. *Journal of Anhui Agrotechnical Teachers College*, 1999, 13(3): 11-13.

[3] 万鲁长, 黄春燕, 于迎春, 等. 作物秸秆发酵转化高效菌株筛选及其初步鉴定[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2001, 32(4): 438-442.
WAN Lu-chang, HUANG Chun-yan, YU Ying-chun, et al. Selection and identification of high efficiency strains for fermentation transform of crop stubble[J]. *Journal of Shandong Agricultural University*, 2001, 32(4): 438-442.

[4] 李日强, 辛小芸, 刘继青. 天然秸秆纤维素分解菌的分离选育[J]. 上海环境科学, 2002, 21(1): 8-11.
LI Ri-qiang, XIN Xiao-yun, LIU Ji-qing. Isolation and screening on straw cellulose-decomposing microorganisms[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2002, 21(1): 8-11.

[5] 陈翠微, 刘长江, 郭文洁, 等. 玉米秸秆发酵剂优良菌种的筛选[J]. 沈阳农业大学学报, 2000, 31(6): 559-561.
CHEN Cui-wei, LIU Chang-jiang, GUO Wen-jie, et al. Screening of elite strains for maize straw ferment[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2000, 31(6): 559-561.

[6] 李日强, 王爱英, 孔令冬. 一株纤维素分解菌的分离选育 [J]. 山西大学学报(自然科学版), 2006, 29(3): 317-320.
LI Ri-qiang, WANG Ai-ying, KONG Ling-dong. Isolation and screening of a cellulose-decomposing fungus strain[J]. *Journal of Shanxi University*, 2006, 29(3): 317-320.

[7] José Dorado , Gonzalo Almendros , Susana Camarero , et al. Transformation of wheat straw in the course of solid-state fermentation by four ligninolytic basidiomycetes[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 1999, 25: 605-612.

[8] Hesham M Abdulla, Sahar A. El-Shatoury. Actinomycetes in rice straw decomposition[J]. *Waste Management*, (2006), doi: 10. 1016/j. wasman. 2006. 06. 006.

[9] 杨雪霞, 陈洪章, 李佐虎. 汽爆玉米秸秆固态发酵生产饲料的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2001, 2: 27-29.
YANG Xue-xia, CHEN Hong-zhang, LI Zuo-hu. A study on production of feed from steam explosion pretreated corn straw through solid state fermentation[J]. *Grain and Feed Industry*, 2001, 2: 27-29.

[10] YANG Xue-xia, CHEN Hong-zhang, GAO Hong-liang, et al. Bio-conversion of corn straw by coupling ensiling and solid-state fermentation[J]. *Bioresource Technology*, 2001, 78: 277-280.

[11] 黄丹莲, 曾光明, 黄国和, 等. 白腐菌固态发酵条件最优化及其降解植物生物质的研究[J]. 环境科学学报, 2005, 25(2): 232-237.
HUANG Dan-lian, ZENG Guang-ming, HUANG Guo-he, et al. Optimum conditions of solid-state fermentation for white-rot fungi and for its degrading straw[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(2): 232-237.

[12] 李爱华, 李耀忠, 陈卫民, 等. 农作物秸秆发酵剂研究初报 [J]. 宁夏大学学报, 2002, 23(3): 275-277.
LI Ai-hua, LI Yao-zhong, CHEN Wei-min, et al. Primary study on zymosis agent of fodder[J]. *Journal of Ningxia University*, 2002, 23(3): 275-277.

[13] 潘 锋, 史小丽, 杨树林, 等. 多菌种混合发酵稻草生产蛋白饲料的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2001, 8: 25-26.
PAN Feng, SHI Xiao-li, YANG Shu-lin, et al. Studies on the production of protein feed from straw through co-fermentation by multi-strains[J]. *Grain and Feed Industry*, 2001, 8: 25-26.

[14] 史小丽, 潘 锋, 杨树林. 固态发酵秸秆生产单细胞蛋白的初步研究[J]. 粮食与饲料工业, 2000, 12: 27-28.
SHI Xiao-li, PAN Feng, YANG Shu-ling. Studies on solid fermentation of fodder for producing SCP[J]. *Grain and Feed Industry*, 2000, 12: 27-28.

[15] 张伟心, 马艳玲, 霍玉鹏. 混合菌发酵玉米秸秆生产菌体蛋白饲料的研究[J]. 饲料研究, 2000, 6: 5-7.
ZHANG Wei-xin, MA Yan-ling, HUO Yu-peng. Study on fermentation of corn straw to produce feeding-protein by using the combination of the multiple-strains[J]. *Feed Research*, 2000, 6: 5-7.

[16] 杨雪霞, 陈洪章, 李佐虎. 玉米秸秆氨化汽爆处理及其固态发酵[J]. 过程工程学报, 2001, 1(1): 86-89.
YANG Xue-xia, CHEN Hong-zhang, LI Zuo-hu. Steam-explosion of ammoniated corn straw and subsequent solid state fermentation[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2001, 1(1): 86-89.

[17] 李日强, 张 峰. 不同菌株固态发酵玉米秸秆生产饲料蛋白的比较研究[J]. 生态学报, 2001, 21(9): 1512-1518.
LI Ri-qiang, ZHANG Feng. Study on the solid-state fermentation of waste straw to produce feeding-protein by using some fungal strains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(9): 1512-1518.

[18] 李日强, 张 峰, 张伟峰. 氨化和固态发酵玉米秸秆生产饲料蛋白的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(6): 1636-1639.
LI Ri-qiang, ZHANG FENG, ZHANG Wei-Feng. Ammonification and solid-state fermentation of corn straw to produce feeding-protein[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(6): 1636-1639.

[19] 王德培, 刘 瑛, 夏兰英, 等. 里氏木霉和酵母菌混合发酵玉米秸秆的研究[J]. 天津轻工业学院学报, 2002, 2: 1-3.
WANG De-pei, LIU Ying, XIA Lan-ying, et al. Study on mixed culture fermentation of trichoderma and yeast for hydrolysis of corn straw[J]. *Journal of Tianjin University of Light Industry*, 2002, 2: 1-3.