文章编号:1673-1689(2010)06-0870-06

二次通用旋转组合设计优化亚麻籽挤压膨化工艺的研究

宋春芳
(江南大学 机械工程学院,江苏 无锡 214122)

摘 要: 采用SLG67-18.5双螺杆挤压机进行亚麻籽挤压膨化加工,以提高亚麻籽食用品质。研究了模孔直径、粉碎粒度、膨化温度、螺杆转速、喂料转速、含水率6个工艺参数对挤压膨化亚麻籽中HCN(氰化氢)去除率和膨化度的影响规律。通过二次通用旋转组合设计法,得到温度、含水率、螺杆转速、喂料速度对亚麻籽中HCN去除率、体外消化率、模头压力的数学模型,并进行优化,优化结果表明,温度156 ℃,含水率16.6%,螺杆转速219 r/min,喂料速度76.1 kg/h,亚麻籽挤压膨化效果最好。研究结果为亚麻籽的开发利用及现有挤压膨化机的操作和调整提供了理论依据。

关键词: 亚麻籽;双螺杆;膨化;二次通用旋转组合设计
中图分类号: TS 205 **文献标识码:** A

Optimization of Extruding Technique of Flaxseed Using Quadratic Regressive Currency Rotary Design

SONG Chun-fang
(College of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: With the aim of increase the quality of flaxseed, SLG67-18.5 twin-screw extruder was used to investigate and optimize the effect of diameter of mould, crushed granularity, temperature, moisture content, rotation speed of screw and feeding speed on removal rate of HCN in flaxseed and extrusion intensity. Mathematic expressions of removal rate of HCN, in vitro protein digestibility and mould pressure was set up by quadratic regressive currency rotary design. And the optimum conditions were listed as follows temperature, moisture content, rotation speed of screw and feeding speed 156 ℃, 16.6%, 219 r/min and 76.1kg/h respectively. The results presented here provided knowledge to the development and use of flaxseed, and to the operation and adjustment of the existing extruders.

Key words: flaxseed, twin-screw, extrude, quadratic regressive currency rotary design

亚麻籽含有亚麻籽胶、木脂素、α-亚麻酸等功能成分,具有有较高的利用价值[1],许多国家将

收稿日期: 2010-01-15
基金项目: 江南大学预研基金项目(2008LYY010)。
作者简介: 宋春芳(1974—),女,内蒙古巴盟人,工学博士,副教授,主要从事过程装备与控制工程方面的研究。
Email:gracecf927@163.com

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

亚麻籽直接少量作为保健食品添加到食品中食用,或者将亚麻籽加到动物饲料中使动物产品富集这些成分,从而提高产品的食用价值,但因其中毒性物质和抗营养因子,如抗 VB_6 因子,生氰糖苷等的存在,尤其是生氰糖苷的毒性,限制了亚麻籽的使用和用量[2-4]。

挤压膨化机是一种集输送、混和、加热和加压等多种化工单元操作于一体的连续式反应器,物料的作用时间短、营养损失小[5-7],可有效地提高亚麻籽营养成分的吸收。亚麻籽挤压膨化处理对于降低毒性成分的影响,提高体外消化率和营养价值,改善适口性是一项很有意义的研究课题。

1　材料与分析

1.1　材料与设备

设备采用北京世联机械生产的 SLG67-18.5 同向旋转双螺杆挤压膨化机,螺杆转速范围为 0～300 r/min,粉碎机选用北京环亚天元机械技术有限公司的 RT-66S 油脂粉碎机。

亚麻籽产于黑龙江省兰西县品种为内亚 3 号。经筛选去杂后用油脂粉碎机粉碎备用,含水率为 6.3%,原料粉中生氰糖苷的含量为 276.7 mg/kg。

1.2　试验指标测定

1.2.1　*亚麻籽中 HCN(氢化氰)去除率*

$$去除率=(1-\frac{膨化后料\ HCN\ 质量}{原料\ HCN\ 质量})\times 100\%$$

亚麻籽中 HCN 含量的测定[8]以糖苷形式存在于植物体内的氰化物经浸泡水解后,进行水蒸汽蒸馏。蒸出的氢氰酸被碱液吸收。在碱性条件下,以碘化钾为指示剂。用硝酸银标准溶液进行滴定定量。记录其消耗体积,从而得出试样中氰化物(以氢氰酸计)的质量分数(mg/kg)。

1.2.2　*膨化物膨化度*　膨化度的测定采用行业中常用的比重法[9]。

1.2.3　*体外消化率的测定方法*　亚麻籽蛋白质体外可消化性采用 Hsu 的胰蛋酶、凝乳酶与肠肽酶体外消化率的测定方法[10-11]。

1.2.4　*模头压力的测定*　模头压力数值可以从与熔体压力传感器相连的智能数字压力表中直接显示出来。

1.3　试验方案

1.3.1　*单因素实验分析*　主要考察模孔直径、粉碎粒度、膨化温度(挤压螺杆后区温度,靠近模头段的挤压螺杆温度)、螺杆转速、喂料转速、含水率对亚麻籽中 HCN 去除率和膨化度的影响,去除不显著因素,确定优化因素取值范围。除每个图中所研究的单因素外,其余参数均按照粉碎目数 24 目(试验确定),模孔直径 5.2 mm(图 1,图 2),模孔直径 4.2 mm(图 4～7),螺杆转速 160 r/min,水分 6.3%,喂料速度 47.4 kg/h,膨化温度 120 ℃。

1.3.2　*二次回归通用旋转组合设计优化亚麻籽挤压膨化工艺参数*　采用二次回归通用旋转组合设计试验方案,得到亚麻籽中各性能指标数学模型,确定最佳优化参数组合[12]。

表 1　亚麻籽挤压膨化二次回归通用旋转组合设计试验因素水平编码表

Tab. 1　Factors and levels of regressive currency rotary design for extruded flaxseed

试验因素	温度/℃ x_1	含水率/% x_2	螺杆转速/(r/min) x_3	喂料速度/(kg/h) x_4
下星号臂(−2)	108	10	120	47.4
下水平(−1)	120	13	145	58.4
零水平(0)	132	16	170	69.4
上水平(+1)	144	19	195	80.4
上星号臂(+2)	156	22	220	91.4

2　结果与讨论

2.1　单因素实验

2.1.1　*粒度对亚麻籽挤压膨化效果的影响*　由图 1 和图 2 可以看出,随着亚麻籽目数增加,粉碎粒度减小,亚麻籽膨化度而减小,HCN 去除率增加。膨化温度 140 ℃要比 120 ℃时的膨化效果和脱毒效果好。说明在挤压膨化过程中,温度对亚麻籽膨化脱毒的影响显著。亚麻籽的粉碎目数越大,即亚麻籽粉粒度越小,HCN 去除率越大,脱毒效果越好。亚麻籽粉碎越细,生氰糖苷与酶的接触越充分,遂发生酶促水解反应,加快了 HCN 逸出。由于粉碎粒度过细,油脂粉碎机生产率低,仅为 5 kg/h。所以采用中间的粉碎目数 24 目进行后期试验。

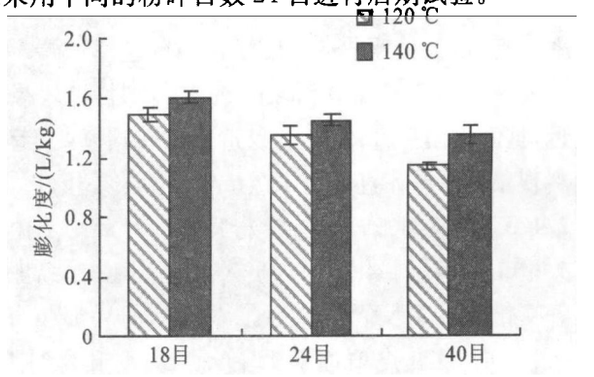


图 1　粉碎粒度对亚麻籽膨化度的影响

Fig. 1　Effect of crushed granularity on extrusion

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

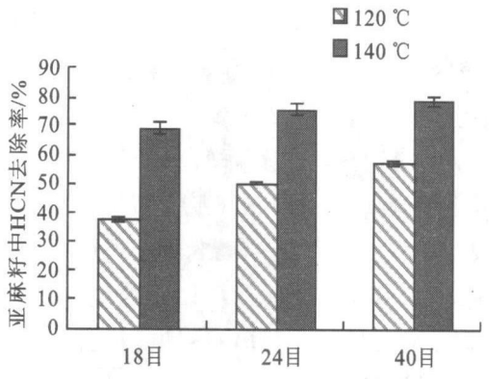


图2 粉碎粒度对亚麻籽中HCN去除率的影响

Fig. 2 Effect of crushed granularity on removal rate of HCN

2.1.2 模孔直径对亚麻籽膨化效果的影响 图3可见，模孔直径对于亚麻籽的膨化度影响规律不是很明显。除了模孔直径为4.2 mm时有略微下降外，其他的3个模孔直径下，亚麻籽的膨化度相当。说明模孔直径对膨化度影响不显著。

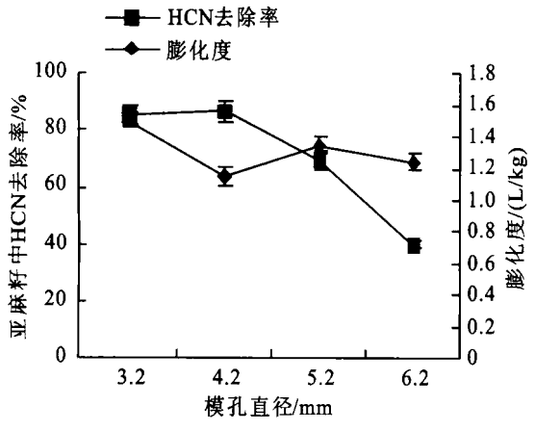


图3 模孔直径对亚麻籽中HCN去除率和膨化度的影响

Fig. 3 Effect of diameter of mould on removal rate of HCN in flaxseed and extrusion intensity

随模孔直径增加，当模孔直径由3.2 mm增加到4.2 mm，膨化亚麻籽中HCN去除率几乎不变，均在86%左右。当模孔直径大于4.2 mm，随模孔直径增加，亚麻籽中HCN去除率明显减少，脱毒效果变差。其原因可能是因为模孔直径增大，亚麻籽中膨化腔的压力减少，使得膨化的瞬间水分蒸发速率减慢，从而使得携带HCN逸出的速率减慢。由于在3.2 mm与4.2 mm的挤压膨化脱毒效果相近，且由于模孔直径过小，易造成物料堵塞，引起喷料现象。故模孔直径为4.2 mm试验效果较好。

2.1.3 温度对亚麻籽挤压膨化效果的影响 由图4可知，亚麻籽膨化度从100 ℃升高到120 ℃，亚麻籽膨化度略微下降，只减少了0.6%，而从120 ℃到140 ℃时，膨化度增加了7.4%；当温度升高到140 ℃时，膨化度几乎没有什么变化。

亚麻籽中HCN去除率随膨化温度升高而升

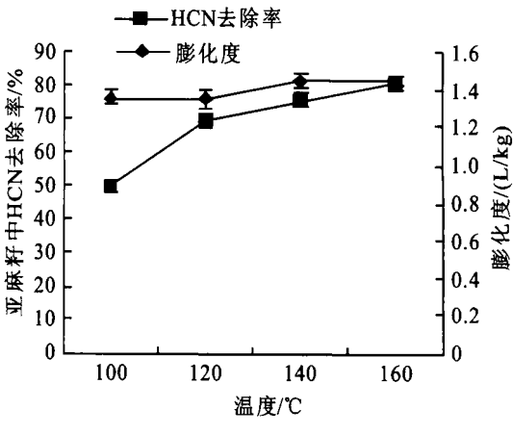


图4 温度对亚麻籽中HCN去除率和膨化度的影响

Fig. 4 Effect of temperature on removal rate of HCN in flaxseed and extrusion intensity

高。这表明升高温度能增加脱毒效果，一方面是升高温度可以使β-糖苷酶的活性增加，加快了生氰糖苷向氢氰酸的转化速率[13]，另一方面温度升高使得亚麻籽中水分的蒸发速率提高，从而携带HCN从亚麻籽中逸出，加快了HCN逸出。

后期的优化试验中，选取了大温度区间进行优化，取膨化温度区间为108～156 ℃。

2.1.4 螺杆转速对亚麻籽挤压膨化效果的影响 图5可见，膨化度随螺杆转速先减少，到190 r/min后，随螺杆转速升高而升高。

随螺杆转速的升高，亚麻籽中HCN去除率随螺杆转速升高而升高。其原因可能是双螺杆挤压膨化机螺杆转速的提高使得生氰糖苷与β-糖苷酶充分接触，速度越高，接触越充分，遂发生酶促水解反。

由此，在选择螺杆转速时，应该选择较大的转速，在后期的优化试验中，选择了较大的螺杆转速区间120～220 r/min。

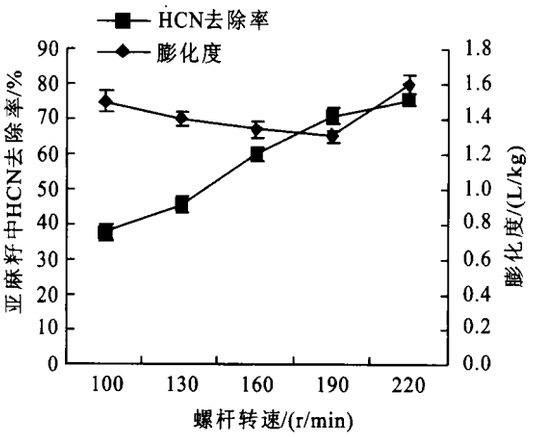


图5 螺杆转速对HCN去除率和膨化度的影响

Fig. 5 Effect of screw speed on removal rate of HCN in flaxseed and extruded extent

2.1.5 喂料速度对亚麻籽挤压膨化效果的影响 由图6可以看出，当喂料速度由25.5 kg/h增加到

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

69.4 kg/h时,亚麻籽中 HCN 去除率呈现明显的增长趋势;当喂料速度继续升高时,HCN 去除率料速度的升高而减小,从试验结果可以看出,喂料速度对亚麻籽膨化脱毒的影响比较复杂。喂料速度过高或者过高,均易于使得亚麻籽中生氰糖苷与 β-糖苷酶接触不充分,减慢了 HCN 逸出。

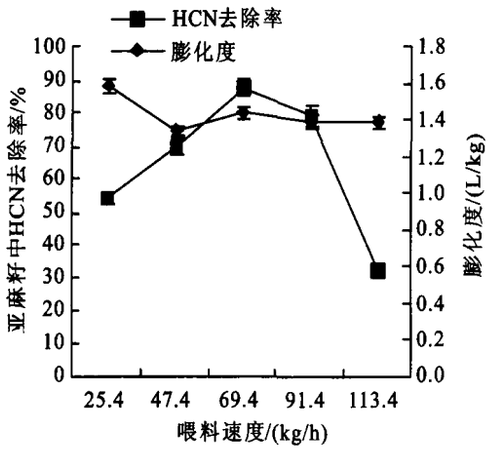


图 6　喂料速度对 HCN 去除率和膨化度的影响

Fig. 6　Effect of feeding speed on removal rate of HCN in flaxseed and extruded extent

由于当喂料速度由 91.4 kg/h 增加到 113.4 kg/h时,亚麻籽中 HCN 去除率急剧减少. 所以在优化工艺选择区间中,剔除了这部分区间,选择了较小的喂料速度区间为 47.4～91.4 kg/h。

2.1.6　*含水率对亚麻籽挤压膨化效果的影响*　图 7 表明,除了含水率为 14.3%时膨化度略微有所下降外,总的趋势是随含水率升高,膨化度增加,但含水率对亚麻籽膨化度影响并不显著。

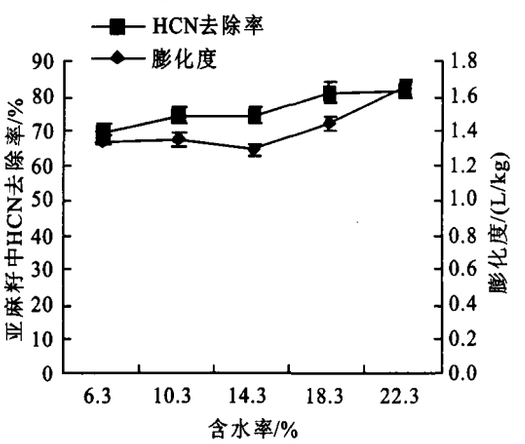


图 7　含水率对 HCN 去除率和膨化度的影响

Fig. 7　Effect of moisture on removal rate of HCN in flaxseedand extrusion intensity

亚麻籽中 HCN 去除率随含水率增加而增加。这是因为含水率越高,亚麻籽中水分携带 HCN 在膨化过程的瞬间逸出速度越快,且水分的提高加快了生氰糖苷的水解。

总的趋势看,亚麻籽中 HCN 去除率随含水率增加而增加,故在优化试验中选取较大范围的含水率 10%～22%。

2.2　二次回归通用旋转组合设计试验

对计算所得的各性能指标进行处理,建立了各个因素对 HCN 去除率、体外消化率、模头压力和膨化度的二次次回归数学模型,经过对数学模型的 F 检验后,确认为有效。回归模型分别为:

HCN 去除率:$y_1 = 80.842\,86 + 3.845\,83z_1 + 2.045\,83z_2 + 2.762\,50z_3 - 1.087\,50z_4 + 1.718\,75z_1z_4 + 1.893\,75z_2z_4 - 1.606\,25z_3z_4 + 1.209\,08z_2^2 - 1.540\,92z_4^2$

体外消化率:$y_2 = 74.610\,57 - 0.867\,29z_2 + 0.414\,79z_4 + 0.576\,94z_1z_3 - 0.926\,28z_1^2 + 0.385\,97z_3^3$

模头压力:$y_3 = 2.804\,29 - 1.177\,92z_2 + 0.187\,92z_3 + 0.322\,92z_4 + 0.441\,87z_1z_2 + 0.238\,12z_1z_3 + 0.225\,63z_1z_4 - 0.461\,88z_2z_4 + 0.180\,49z_1^2 + 0.245\,49z_2^2 + 0.277\,99z_3^2$

其中,膨化度经 F 检验,确认回归方程不显著,说明温度、含水率、螺杆转速、喂料速度对膨化度的交互影响均不显著,对 HCN 去除率、体外消化率和模头压力的交互影响的交互影响显著。

2.3　优化参数确定

通过图形分析,比较直观地了解到各个因素对亚麻籽挤压膨化指标的影响,然而,对于确定的原始条件,需要确定 4 个因素 z_1, z_2, z_3, z_4 之间的最佳组合,使得亚麻籽挤压膨化效果最好。

2.3.1　*目标函数确定*　选择亚麻籽挤压膨化中最重要性能指标亚麻籽 HCN 去除率为目标函数,即 y_1 为目标函数。

2.3.2　*约束条件的确定*　各个因素的取值范围是必要的约束条件;膨化后的亚麻籽希望脱毒效果好的同时,营养价值高,易于消化。正交试验得到的膨化亚麻籽体外消化率的范围为 69.5%～77.1%,消化率越高越好,为此,选择体外消化率高于上下限的均值,即 73%来作为其中一个约束条件;正交试验中模头压力的范围在 1.51～11.91,从试验结果看,模头压力>2 MPa 时,可形成稳定正常的喷射,膨化产品的感官质量较好。而模头压力过高,容易造成"喷爆"现象,参照实验,模头压力高于 10 MPa 时,就容易出现"喷爆"现象,故约束条件为:$2 \leqslant z_1 \leqslant 2$;$-2 \leqslant z_2 \leqslant 2$;$-2 \leqslant z_3 \leqslant 2$;$-2 \leqslant z_4 \leqslant 2$;$y_2 \geqslant 73$;$2 \leqslant y_3 \leqslant 10$　采用 MATLAB 程序进行优化,得到亚麻籽挤压膨化工艺条件是:温度 156 ℃,含水率 16.6%,螺杆转速 219 r/min,喂料速度 76.1

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

kg/h,相应的各项评价指标为亚麻籽中HCN去除率93.46%,膨化亚麻籽体外消化率为74.75%,模头压力为6.22 MPa。

表2 四因素二次回归通用旋转组合设计试验方案及编码表

Tab. 2 Quadratic regressive currency rotary design of four factors

序号	温度 z_1/℃	含水率 z_2/%	螺杆转速 z_3/(r/min)	喂料速度 z_4/(kg/h)	HCN去除率 y_1/%	体外消化率 y_2/%	模头压力 y_3/%	膨化度 y_4/%
1	1	1	1	1	91.2	75.1	4.2	1.55
2	1	1	1−	−1	86.1	72.5	4.02	1.45
3	1	1	−1	1	90	72.9	2.37	1.56
4	1	1	−1	−1	73.4	73.1	1.92	1.59
5	1	−1	1	1	76.3	76.2	6.58	1.40
6	1	−1	1	−1	86.6	75.4	3.54	1.60
7	1	−1	−1	1	84.9	76.9	5.69	1.40
8	1	−1	−1	−1	74.4	75.6	3.78	1.46
9	−1	1	1	1	78.1	74.7	1.51	1.40
10	−1	1	1	−1	76.1	72.7	2.06	1.35
11	−1	1	−1	1	76.8	76.0	2.06	1.30
12	−1	1	−1	−1	77.2	74.7	2.06	1.45
13	−1	−1	1	1	76.2	75.8	5.78	1.50
14	−1	−1	1	−1	77.7	73.4	5.8	1.40
15	−1	−1	−1	1	63.2	77.1	6.4	1.26
16	−1	−1	−1	−1	68.9	77.4	3.86	1.45
17	−2	0	0	0	77.8	69.5	2.86	1.24
18	2	0	0	0	89.6	69.8	3.24	1.45
19	0	−2	0	0	86.6	75.1	5.07	1.70
20	0	2	0	0	90.8	72.7	1.55	1.40
21	0	0	−2	0	75.6	75.3	3.65	1.46
22	0	0	2	0	89	74.5	3.23	1.36
23	0	0	0	−2	88.3	73.8	2.7	1.7
24	0	0	0	2	67.1	74.0	2.8	1.55
25	0	0	0	0	78.7	75.6	2.81	1.54
26	0	0	0	0	84.6	74.7	2.07	1.19
27	0	0	0	0	81.7	72.2	2.5	1.35
28	0	0	0	0	83.4	74.5	3.45	1.75
29	0	0	0	0	81.7	75.4	3	1.69
30	0	0	0	0	79.8	75.1	2.7	1.65
31	0	0	0	0	76	74.7	3.1	1.6

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3 结　语

1)通过单因素试验,结果表明亚麻籽膨化度随着粉碎目数减少,模孔直径减小,膨化温度升高,喂料速度增加而增加,随螺杆转速先下降,后升高;含水率对亚麻籽膨化度影响并不显著。亚麻籽中 HCN 去除率随粉碎目数增加,模孔直径减少,膨化温度升高,螺杆转速升高,含水率增加而增加。喂料速度过低或者过高,均影响亚麻籽的膨化脱毒效果。

2)二次回归通用旋转组合设计法表明,温度、含水率、螺杆转速、喂料速度对亚麻籽中 HCN 去除率、模头压力、体外消化率交互作用显著,对膨化度交互作用不显著。亚麻籽挤压膨化脱毒最优工艺条件是:温度 156 ℃,含水率 16.6%,螺杆转速 219 r/min,喂料速度 76.1 kg/h,相应的各项评价指标为亚麻籽中 HCN 去除率 93.46%,膨化亚麻籽体外消化率为 74.75%,模头压力为 6.22 MPa。

参考文献(References):

[1] 张建华,倪培德,华欲飞. 亚麻籽中的生氰糖苷[J]. 中国油脂, 1998,22(5):58－60.
ZHANG Jian-hua, Ni Pei-de, Hua Yu-fei. Cyanogenic glycosides of flaseed[J]. **China Oils and Fats**, 1998,22(5):58－60. (in Chinese)

[2] Ivan S, Palmer. Isolation of factors in Linseed oil meal against chronic selenosis in Rats [J]. **J. Nutr**, 1980,110:145－150.

[3] Madhusudhan K T, Singh N. Effect of detoxification treatment on the physiochemical properties of linseed proteins[J]. **J Agric Food Chem**, 1985,33:1219－1222.

[4] Conn E. E. Cyanogenic glycosides[J]. **J Agric Food Chem**, 1969,17:519－526.

[5] Klosterman H J. VB6 anatagonists of natural origin[J]. **J Agric Food Chem**, 1974,22:13.

[6] 刘金荣,赵文斌,江发寿,等. 亚麻籽与籽油的营养成分及理化特性研究[J]. 营养学报,2003,25(2):157－158.
LIU Jin-rong, ZHAO Wen-bin, JIANG Fa-shou, et al. Study on the nutritional components and characteristics of the linseed and linseed oil [J]. **Acta Nutrimenta Sinica**, 2003,25(2):157－158. (in Chinese)

[7] 杨涛, 辛建美, 徐青,等. 双螺杆挤压技术在食品工业中的研究应用现状[J]. 食品与生物技术学报, 2009, 28(6):733－740.
YANG Tao, XIN Jian-mei, XU Qing, et al. The research application status of in food industry[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2009, 28(6):733－740. (in Chinese)

[8] 杨胜. 饲料分析及饲料质量检测技术 [M]. 北京:中国农业大学出版社,1999,1:204－206.

[9] 崔玉洁. 秸秆螺旋挤压成形颗粒饲料的研究[D]. 辽宁:沈阳农业大学,2001.

[10] Gonthier C, Mustafa A F, Berthiaume R, et al. Effects of feeding micronized and extrued flaxseed on ruminal fermentation and nutrient utilization by dairy cows[J]. **Journal of dairy science**, 2004,87:1854－1863.

[11] Hsu S H. Changes in the carbohydrate contents of germinating soybean seeds[J]. **Crop Science**, 1977,13:407－410.

[12] 孙巍, 夏春雨, 蔡和晖, 等. 中心组合试验优化毛云芝菌固体发酵培养条件[J]. 食品与生物技术学报,2009,28(5):688－692.
SUN Wei, XIA Chun-yu, CAI He-Hui, et al. Culture condition optimization of solid substrate fermentation by coriolus hirsutus using central composite design[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2009, 28(5):688－692. (in Chinese)

[13] Wanasundara P K. Removal of cyanogenic glycosides of flaxseed meal[J]. **Food Chemistry**, 1993,48:263－268.

(责任编辑:朱明)

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net