

分类号

博 士 学 位 论 文

硫代葡萄糖甙降解化学与油菜籽脱毒工艺的研究

Chemistry of Degradation of Glucosinolates
and Technology of Detoxification of Rapeseed

研 究 生：钱 和

专 业：油脂与植物蛋白工程

研 究 方 向：油料作物的综合利用

导 师：刘复光 教 授

指导小组成员：雕鸿荪 教 授

沈培英 副教授

无锡轻工业学院

地址：无锡市青山湾

一九九四年五月

致 谢

本论文是由导师刘复光教授选题并提供了许多资料,后经粮油系姚惠源教授、吴嘉根教授、雕鸿荪教授、谷文英教授、刘当慧教授、裘爱泳教授、倪培德副教授、沈培英副教授集体讨论,正式立题。论文期间,他们给予了极大的关心和指导,在此表示衷心的感谢。

本论文是在指导小组雕鸿荪教授、沈培英副教授的精心指导和热情鼓励下完成的,在此向他们表示衷心的感谢。

姚惠源教授、谷文英教授、裘爱泳教授对论文的进展和水平也给予了极大的关心和指导,在此向他们表示衷心的感谢。

论文期间得到了测试中心汤坚副教授、袁身淑高工、王林祥、刘亚岷、王树英、张奇等老师,食工系萧刚老师,粮油系江志伟、陆骑凤、华聘聘等老师及华欲飞、王兴国、杭晓敏等同学,江苏省农科院饲料食品研究所蒋玉琴老师,南京大学化学系周以泉副教授、吴琳等老师,江苏省食品发酵研究所胡志云高工、李德芳、尹捷等工程师的热情支持和帮助,在此表示最诚挚的感谢。

论文期间还得到了粮油系及有关教研室、院科研处、研究生科、设备处、测试中心有关人员的热情支持和帮助,在此表示最诚挚的谢意。

最后,向所有关心、帮助和支持我完成博士论文工作的老师、同学和家人表示衷心的感谢。

摘 要

关于菜籽粕脱毒饲用研究已有三十多年的历史,至今仍无可广泛应用、简单易行的脱毒方法。作者在全面了解油菜籽中各种营养成分与抗营养成分的基础上,对各种脱毒方法作了系统的比较研究,并进行了探索性实验,综合分析并比较了各种脱毒方法的优缺点,根据国情及油菜籽脱毒研究现状,提出了在油菜籽加工过程中进行脱毒的构想。围绕此构想进行研究,主要研究结果如下:

1、现行油菜籽加工工艺在取油方面是相当成功的,最终菜籽粕中残油只有1%左右,但加工过程中必需氨基酸,特别是有效赖氨酸大量损失,降低了菜籽粕饲用质量;蒸炒过程中,硫甙主要发生酶解与非酶解反应;经预榨阶段后,内源硫甙酶基本失活,油脂浸出后菜籽粕蒸汽脱溶阶段,硫甙主要发生非酶降解反应,残留于菜籽粕中的降解产物之一腈类化合物是制约菜籽粕饲用的主要因素;植酸、纤维素在加工过程中基本无变化,单宁含量下降37-40%,它们也是限制菜籽粕饲用的抗营养因素。

2、完整油菜籽在贮存期间其内源硫甙酶酶活没有显著降低,有较好的贮存稳定性,而且内源硫甙酶酶活与硫甙含量成正比。内源硫甙酶最适酶解条件是:50-70℃, pH6-8。即使在最佳酶解条件下,生胚、30目、60目样品中硫甙的酶解率都很低,只有将油菜籽充分磨碎(至少通过100目筛),有效地打破油菜籽中硫甙酶和硫甙的区域化分布,才能得到令人满意的酶解率。油菜籽粒度过小,给油脂浸出过程带来难以克服的困难,因此,在现行油菜籽加工工艺中蒸炒阶段引入自动酶解脱毒法是不可行的。

3、通过对硫甙非酶降解规律逐步深入的研究,积累了大量实验数据;在归纳总结硫甙非酶降解性质的基础上,分析推导硫甙非酶降解机理,合理解释有关实验现象,并根据对硫甙非酶降解机理的认识,得到促进硫甙非酶降解反应的化学试剂;采用响应曲面法分析、优化硫甙降解条件,在大量实验的基础上,成功地使硫甙非酶降解率在15-25min内达到90%以上,且避免了大量腈类化合物的生成,摆脱了长期以来化学脱毒法必需经长时间高温热处理及腈类化合物大量生成致

使脱毒效果不佳的困境,为在油菜籽加工过程中蒸炒阶段脱毒构想的实现奠定了坚实基础。

4、在加压热处理过程中有效赖氨酸的损失大于常压热处理,但热处理时间在30min内, Na_2SO_3 可有效地抑制Maillard反应,减少有效赖氨酸的损失。妥善解决了长期以来难以解决的脱毒处理与菜籽蛋白质量之间的矛盾。

5、在实验室基础上,研究了油菜籽湿法脱壳、干法脱壳的工艺条件以及菜籽粕筛分脱壳的工艺条件,测定了脂肪、蛋白质、硫甙、植酸在菜籽壳与仁中的分布情况。

6、在油菜籽制油过程中脱毒的新工艺设计思想新颖,只须改造现行制油过程中的蒸炒设备,便可在油菜籽加工后同时得到油和脱毒菜籽粕。实验结果表明,采用新工艺可提高油的浸出速度,完全不影响油的质量,取油后所得的菜籽粕脱毒效果好,脱毒成本低,每公斤菜籽粕处理成本仅增加0.0188元。

关键词: 油菜籽 脱毒 硫代葡萄糖甙 硫代葡萄糖甙酶
有效赖氨酸 植酸 纤维素 脱壳

Studies on Chemistry of Degradation of Glucosinolates
and Technology of Detoxification of Rapeseed

ABSTRACT

The research on detoxification of rapeseed and rapeseed meal has been carried out for more than 30 years, but there has been no method suitable for using extensively. According to the knowledge of various kinds of nutritive and antinutritive compositions of rapeseed, the paper has made a systematic comparative study and engaged in investigated experiments. After comprehensive analyses on the advantage and disadvantage of various kinds of detoxificative methods, the paper raised a envisage according to the domestic condition and present situation of the research on the detoxification of rapeseed and rapeseed meal, which is to detoxificate during the processing of rapeseed. The main results include:

- 1、The traditional processing of rapeseed is very successful in getting the oil, the remains is only about 1% in the rapeseed meal finally. But essential amino acids, especially valid lysine is greatly lost during the process, and this reduces the quality of rapeseed meal for feed. During the cook processing, the glucosinolates in rapeseed will be definitely degraded enzymatically and non-enzymatically. After pre-express, the endogenous myrosinase is almost inactivated. During the desolvent process, non-enzymatical degradation of glucosinolates is the main reaction. One of degradation products, which is called nitriles, is the main restrict element of rapeseed meal for feed. Phytic acid

changes little and tannin reduces at 37-40% during the process. They are also the anti-nutritious elements which restrict the using of rapeseed meal for feed.

2、The activity of endogenous myrosinase in rapeseed does not reduce obviously during the storage, and it is in proportion to the amount of glucosinolate. The optimal conditions of enzymatic degradation are pH6-8 and temperature 50-70°C. Even under the optimal conditions, the enzymatic degradation ratios of glucosinolates which exist in flakes, 30 and 60 mesh samples are all very low. Should the rapeseed be grinded completely (at least through 100 mesh), the regional distribution of myrosinase and glucosinolates will be destroyed, and thus can we get a satisfactory enzymatic degradation ratio. Because the powder size of rapeseed is too small, there is much difficulty in solvent extraction. So, it is not feasible to carry out endogenous myrosinase degradation of glucosinolates during the cook processing.

3、By a further study on the regulation of non-enzymatic degradation of glucosinolate, accumulated a lot of experiment data. On the basis of summary of the regulation of non-enzymatic degradation properties of glucosinolates, we can infer the non-enzymatic degradation mechanism of glucosinolate and explain relevant experiment phenomena. According to the non-enzymatic degradation mechanism of glucosinolate, we have got the chemical which can catalyze reaction of degradation of glucosinolates, analyze and optimize the condition of the degradation of glucosinolate with central composite rotate design. By many experiments, we succeed in making more than 90% ratio of glucosinolates degradation in 15-25min and avoiding producing much nitriles. This result lay a foundation of the envisage that to detoxicate during the process-

ing of rapeseed.

4、 The loss of valid lysine in pressure thermal treatment is more than that in normal thermal treatment. Na_2SO_3 can efficiently inhibit the maillard reaction, decrease the loss of valid lysine, and solve the contradictory between the detoxification treatment and the rapeseed protein.

5、 Studied the technology condition of wet and dry dehull of rapeseed, analysed the distribution of fat, protion, glucosinolate and phytic acid in the meal and hull of rapeseed.

6、 Only need to improve the cooking equipment in the traditoinal processing of rapeseed, oil and detoxificated rapeseed meal can be obtained. The result of experiment shows that the new technology can enhance the rate of solvent extraction and it has no bad enfluence on the quality of oil. The detoxificated rapeseed meal has a good quality. The cost only increases 0.0188 yuan RMB/kg rapeseed meal.

KEY WORDS: Rapeseed Detoxification Glucosinolate
Myrosinase Valid lysine Phytic acid Fiber Dehull

目 录

第一章 绪论

1.1	油菜籽的品种与分类	(1)
1.2	油菜籽中的营养成分与抗营养成分	(1)
1.2.1	油菜籽中的营养成分	(1)
1.2.2	油菜籽中的抗营养成分	(2)
1.3	各类脱毒方法评述	(4)
1.3.1	生物化学脱毒法	(4)
1.3.2	物理化学脱毒法	(4)
1.3.3	化学脱毒法	(5)
1.3.4	溶剂浸出法	(5)
1.3.5	解毒剂脱毒	(5)
1.3.6	培育油菜新品种	(6)
1.4	研究现状与探索性实验	(6)
1.4.1	研究现状	(6)
1.4.2	探索性实验结果总结	(7)
1.5	立题依据与研究目标	(9)
1.5.1	立题依据	(9)
1.5.2	研究目标与研究内容	(9)

第二章 现行油菜籽加工过程中各种成份的变化

2.1	引言	(12)
2.2	材料和方法	(12)
2.2.1	样品来源	(12)
2.2.2	取样项目及部位	(12)
2.2.3	脂肪的测定	(12)
2.2.4	蛋白质的测定	(13)
2.2.5	氨基酸组成的测定	(13)
2.2.6	硫甙总量的测定	(13)
2.2.7	硫甙酶酶活的测定	(13)
2.2.8	植酸含量的测定	(13)

2.2.9	单宁含量的测定	(14)
2.2.10	纤维素含量的测定	(14)
2.2.11	腈类化合物的测定	(14)
2.3	结果与讨论	(15)
2.3.1	脂肪含量的变化	(15)
2.3.2	蛋白质含量与氨基酸组成的变化	(15)
2.3.3	硫甙酶酶活的变化	(17)
2.3.4	硫甙含量的变化	(18)
2.3.5	硫甙降解产物之一腈的含量变化	(19)
2.3.6	植酸含量的变化	(20)
2.3.7	单宁含量的变化	(20)
2.3.8	油菜籽及其粕中纤维素的含量	(20)
2.3.9	小结	(21)

第三章 油菜籽中硫甙酶及其酶解性质的研究

3.1	引言	(22)
3.2	材料与方法	(22)
3.2.1	材料	(22)
3.2.2	脱脂油菜籽粉的制备	(23)
3.2.3	硫甙总量的测定	(23)
3.2.4	硫甙酶活的测定	(23)
3.3	结果与讨论	(23)
3.3.1	油菜籽品种、贮存时间与硫甙酶酶活的关系	(23)
3.3.2	温度对硫甙酶酶活的影响	(24)
3.3.3	pH对硫甙酶酶活的影响	(26)
3.3.4	样品含水量与硫甙酶解率的关系	(27)
3.3.5	硫甙酶的激活与抑制	(28)
3.3.6	粒度对硫甙酶解率的影响	(28)
3.3.7	小结	(30)

第四章 油菜籽中硫甙非酶降解性质的研究

4.1	引言	(31)
-----	----	------

4.2	材料和方法	(31)
4.2.1	材料	(31)
4.2.2	样品含水量的调节	(31)
4.2.3	硫甙酶的钝化	(32)
4.2.4	残甙的测定	(32)
4.2.5	色质联用测定样品中各种硫甙的含量	(32)
4.2.6	色质联用测定硫甙降解产物的种类与含量	(35)
4.3	结果与讨论	(36)
4.3.1	常压条件下硫甙的热降解规律	(36)
4.3.2	加压条件下硫甙的热降解规律	(39)
4.3.3	各种硫甙的降解规律与降解产物	(41)
4.3.3.1	各种硫甙的降解规律	(41)
4.3.3.2	硫甙降解产物的测定	(46)
4.3.4	硫甙非酶降解反应机理的探讨	(48)
4.3.4.1	硫甙的分子结构	(48)
4.3.4.2	硫甙非酶降解产物	(48)
4.3.4.3	硫甙非酶降解反应的性质	(49)
4.3.5	促进硫甙降解化学试剂的选择	(52)
4.3.6	响应曲面法分析优化硫甙非酶降解条件	(54)
4.3.7	小结	(56)

第五章 加压热处理对有效赖氨酸的影响

5.1	引言	(57)
5.2	材料与方法	(57)
5.2.1	材料	(57)
5.2.2	加压及常压热处理	(57)
5.2.3	有效赖氨酸的测定	(57)
5.3	结果与讨论	(57)
5.3.1	菜籽及其饼粕中有效赖氨酸测定方法	(57)
5.3.1.1	澄清剂种类、用量与离心时间对澄清效果的影响	(58)
5.3.1.2	方法的稳定性	(58)

5.3.1.3	方法的精密度和准确性	(59)
5.3.2	热处理对蛋白质营养价值的影响	(59)
5.3.3	加压及常压热处理对有效赖氨酸的影响	(61)
5.3.4	Maillard反应抑制剂的选择	(63)
5.3.5	小结	(65)
第六章 油菜籽脱壳技术的研究		
6.1	引言	(66)
6.2	材料与方法	(66)
6.2.1	材料	(66)
6.2.2	脂肪的测定	(66)
6.2.3	蛋白质的测定	(66)
6.2.4	硫甙的测定	(67)
6.2.5	植酸的测定	(67)
6.2.6	单宁的测定	(67)
6.2.7	纤维素的测定	(67)
6.3	结果与讨论	(67)
6.3.1	油菜籽湿法脱壳	(67)
6.3.2	油菜籽干法脱壳	(67)
6.3.3	菜籽粕筛分脱壳	(69)
6.3.4	菜籽壳合理利用的途径	(69)
6.3.5	讨论	(70)
第七章 油菜籽脱毒新工艺路线的研究		
7.1	引言	(71)
7.2	材料与方法	(71)
7.2.1	材料	(71)
7.2.2	脂肪的测定	(71)
7.2.3	蛋白质的测定	(71)
7.2.4	硫甙的测定	(71)
7.2.5	有效赖氨酸的测定	(71)
7.2.6	植酸的测定	(71)

7.2.7	单宁的测定	(72)
7.2.8	毛菜籽油色泽的测定	(72)
7.2.9	毛菜籽油含硫量的测定	(72)
7.2.10	毛菜籽油酸价的测定	(72)
7.2.11	毛菜籽油过氧化值的测定	(72)
7.2.12	毛菜籽油茴香胺值的测定	(72)
7.2.13	毛菜籽油水分及挥发物的测定	(72)
7.3	结果与讨论	(72)
7.3.1	脱毒菜籽粕的质量分析	(72)
7.3.2	加压热处理代替蒸炒过程对油脂浸出速度的影响	(73)
7.3.3	毛菜籽油的质量分析	(74)
7.3.4	技术经济效益分析	(74)
7.3.5	小结	(75)
	重要结论	(76)
	参考文献	(78)

第一章 绪 论

1.1 油菜籽的品种与分类

油菜属十字花科(Cruciferae)芸苔属(Brassica)植物,其栽培种是由十字花科芸苔属植物的若干个种组成,不是植物分类学上一个单一的物种[1]。我国油菜按播种季节划分,有冬油菜和春油菜;按叶片和种子气味划分,有辣油菜、甜油菜和苦油菜;根据植物学形态特征、遗传亲缘关系并结合农艺性状又可将油菜分为三大类型:白菜型(Brassica Campetres & Chinensis)、芥菜型(Brassica Juncea)和甘蓝型(Brassica Napus)[2,3]。

关于我国白菜型、芥菜型和甘蓝型油菜籽的种子含油量与特征列于表1-1。

表1-1 各种类型油菜籽的含油量与特征

类 型	含 油 量/%	特 征
白菜型	一般:35-45 最高:50	大小不一,千粒重3g左右,无辛辣味,皮壳有褐色、黄色、黄褐杂色等
芥菜型	一般:30-35 最高:50	较小,千粒重2-3g,辛辣味较强,皮壳有黄、红、褐色等
甘蓝型	一般:35-45 最高:50	较大,千粒重3-4g,无辛辣味,皮壳呈黑褐色

1.2 油菜籽中的营养成份与抗营养成份

1.2.1 油菜籽中的营养成份

油菜籽中的主要营养成份有脂肪、蛋白质、矿物质、固醇等。

油菜籽中的脂肪含量一般为干重的30-50%,是脂肪酸的甘油三酸酯,又称甘油三酯,俗称菜籽油,以分散的亚细胞器形式--油体存在于细胞质中。

油菜籽中的蛋白质含量一般为干重的25%左右,其幅度在21-30%。主要存在于胚中,含量为干胚重的28-30%,皮壳中含量较低,仅为干重的15%左右。据报道[4,5],用温和方法制取的菜籽蛋白氨基酸组成合

理,必需氨基酸含量丰富,赖氨酸含量高于大豆蛋白,蛋氨酸和胱氨酸含量高于大豆蛋白和酪蛋白,具有较高的营养价值。

油菜籽中各种矿物质含量为4-5%,菜籽粕中矿物质含量为7-8%,也高于大豆及其粕中矿物质的含量[6]。

油菜籽中有四种植物固醇:菜籽固醇、菜油固醇、胆固醇和 β -谷固醇。其中 β -谷固醇含量占一半以上。 β -谷固醇能影响肠道对胆固醇(动物固醇)的吸收,故具有降低人体血清中胆固醇的作用[7]。

1.2.2 油菜籽中的抗营养成分

油菜籽中的抗营养成分主要有硫甙、植酸、多酚类化合物、纤维素等。

硫甙是广泛存在于十字花科植物中的一类含硫化合物。到目前为止共发现了100多种[8],其公认的结构为 β -D-硫代葡萄糖甙[9]。

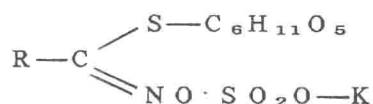


图1-1 硫甙的分子结构通式

所有的硫甙都可视为由两部分组成,一为非糖部分,另一为 β -D-葡萄糖部分或简称葡萄糖部分,二者通过硫甙键联接起来(图1-1)。分子结构中的基团R是硫甙中的可变基团,随着基团R的不同,硫甙的种类和性质也就不同。

据报道[8],各种油菜籽中发现的硫甙有30多种,主要有7-10种。硫甙广泛存在于油菜植株体的各个器官中,尤以种子内含量最高。但硫甙的总量和组成在不同类型(白菜型、芥菜型、甘蓝型)和不同品种的油菜中存在着差异[10-13]。徐文俊等[14]对我国油菜常规品种(系)的硫甙含量进行了分析,发现硫甙含量集中在3.0%-8.0%。其中白菜型最低,平均4.04%,集中在3.0-5.0%;芥菜型次之,平均在4.87%,集中在3.0-5.0%;甘蓝型最高,平均在6.13%,集中在5-7%。春油菜硫甙含量低于冬油菜。

吴新镛等[15]用HPLC对我国三大类型及近缘野生油菜品种的硫甙组成进行了研究。我国芥菜型油菜的硫甙组成以丙烯基硫甙为主;甘蓝型油菜的硫甙组成以3-丁烯基硫甙、2-羟基-3-丁烯基硫甙、2-

羟基-4-戊烯基硫甙为主；白菜型油菜的硫甙组成以3-丁烯基硫甙、4-戊烯基硫甙、2-羟基-3-丁烯基硫甙、2-羟基-4-戊烯基硫甙为主。

双低品种与普通品种油菜籽中的硫甙组成无大差异，但双低品种吲哚硫甙的绝对量与常规油菜相同，故吲哚硫甙的相对含量较高，约占总硫甙量的30%，甚至更多[11]。因此，研究吲哚硫甙对双低油菜籽的加工是非常重要的。

硫甙与硫代葡萄糖甙酶(EC3.2.3.1,简称硫甙酶或芥子酶)共存。硫甙以钾盐或钠盐的颗粒存在于胚的细胞质中，而硫甙酶则存在于植物细胞原体中[16-18]，二者处于彼此有效分离状态。当植物组织被破坏时，在一定温度和湿度等条件下，硫甙即被硫甙酶酶解，产生一系列分解产物：硫氰酸酯、异硫氰酸酯、恶唑烷硫酮、腈等[19,20]。

人们曾认为硫甙是非活性的，菜籽粕的毒性主要来自硫甙的降解产物，进一步研究表明，不仅硫甙降解产物而且硫甙也具有抗营养性和毒性，且不同硫甙的抗营养性和毒性有所差别[20]。

油菜籽中含植酸4-7%，分布在细胞质蛋白体的球状体中[21-23]，也有资料报道油菜籽内存在蛋白质与植酸的配合物，但该配合物有可能是在萃取过程中形成的[24]。植酸对钙、镁、锌等二价或三价离子有极强的螯合作用，使这些金属离子不易为动物所利用。动物食用菜籽粕后表现出缺锌症状，如厌食、疲劳、生长机能衰退、蛋白质吸收能力下降等都是因植酸引起的[25-27]。有关实验还证明，植酸可抑制胰蛋白酶和 α -淀粉酶的活性[28-30]。因此，植酸是菜籽粕中不可忽视的抗营养因素之一，但其抗营养作用可通过添加锌得到缓解。

油菜籽中的多酚类化合物通常以游离酸、酯及不溶性化合物等形式存在，在中性和碱性条件下易发生氧化和聚合作用，使菜籽粕变黑并产生不良气味。多酚类化合物及其氧化物能与蛋白质[31,32]、必需氨基酸[33]、酶和其它物质形成配合物，使蛋白质的营养价值显著降低，故多酚类化合物也是限制菜籽粕饲用的重要因素之一。

油菜籽中含有高达13-16%的纤维素，比其它油料作物(含纤维素4-6%)和谷类作物(含纤维素1-6%)都高，这主要是由于油菜籽颗粒小，皮壳所占比例大，皮壳(种皮)中又含有较多的纤维素有关[7]。由于纤维素分子排列紧密，人体和家禽体内的酶不能将其水解，只有食草动物肠道中的寄生菌所分泌的纤维素酶才能将其部分地水解为葡萄

糖而被机体利用,这样就大大影响了菜籽粕的饲用价值。动物试验结果也表明,纤维素降低单胃动物的消化率,减少代谢能[34],因而也是菜籽粕中重要的抗营养因素之一。

1.3 各类脱毒方法评述

1.3.1 生物化学脱毒法

生物化学脱毒法包括酶催化水解法和微生物发酵法。

酶催化水解法的具体方法有两种,一种是利用外加黑芥子酶及酶的激活剂(如 V_C 等),使硫甙加速分解,然后通过汽提或溶剂浸出以达到脱毒的目的。另一种方法称为自动酶解法[35],其基本原理是利用菜籽中的硫甙酶酶解硫甙,由于酶解产物异硫氰酸酯、恶唑烷硫酮、腈等都是脂溶性的,可在油脂浸出工序中提取出来,在油脂后续加工过程中除去。目前,酶催化水解法还没有用于大规模的工业化生产。该方法除了有不能脱除纤维素、植酸、多酚类化合物的缺点外,对利用外源酶催化水解法而言,其限制推广的原因之一是外加酶即黑芥子酶的来源困难,原因之二是脱除硫甙酶解产物的过程过于复杂,成本过高,对自动酶解法而言,实际难与现行油菜籽加工工艺配套,原因是必需将菜籽充分磨细,导致粉末度太大,给油脂浸出过程带来难以克服的困难。

关于微生物脱毒法应用较多[36-40],具体有:(1)利用微生物降解硫甙;(2)厌氧发酵法;(3)发酵中和法。微生物脱毒法的特点是条件温和,干物质损失小,硫甙降解彻底,脱毒效果好,且能提高菜籽粕中蛋白质的含量和质量,从而改善菜籽粕的饲料效价;但微生物脱毒法发酵周期长,一般需要30-60天,因而连续化、工业化难以进行。若利用细菌和霉菌发酵,需增加锅炉、种子罐、发酵罐等设备,以及大体积的水泥发酵池。发酵后的脱毒菜籽粕含水48-50%,将其干燥则需大量能源,使脱毒成本增加。因此,微生物发酵法只能在某些特定地区使用,难以大规模推广普及。

1.3.2 物理化学脱毒法

1982年,J. Luethy等通过动物实验证实造成动物增重下降、肝脏