

挤压、压榨加工以及添加微生物植酸酶对全脂大豆饲养虹鳟鱼 (*Oncorhynchus mykiss*) 的表观养分消化率的影响*

程宗佳 博士, 美国大豆协会

Ronald W. Hardy 博士, 美国爱达荷大学 Hagerman 养鱼实验站,

摘 要

本试验研究挤压、压榨加工以及添加微生物植酸酶对全脂大豆饲养虹鳟鱼时的干物、粗蛋白、氨基酸和矿物质表观消化率的影响。用未加工的、挤压的、压榨的大豆作试验材料。挤压大豆分别以 200、400、600、800、1000 FTU/kg 饲料的剂量添加微生物植酸酶 (Natuphos 5000 L); 压榨大豆以 200 FTU/kg 饲料的剂量添加微生物植酸酶。每种材料都以 30:70 的比例与一种酪蛋白-白明胶参照饲料混合以测定其表观消化率。

制作了 9 种试验饲料。总共 900 条鱼 (平均初重 170.8 ± 5.5 g) 饲养在 18 个 150 升鱼缸内, 每缸 50 条鱼。每种饲料投放于随机确定的 2 个鱼缸中。饲养一周后开始收集粪便, 粪便收集用人工压肛法进行, 每隔三天收集一次, 共收集三次, 用氧化钪作内标记。结果表明, 与未加工大豆相比, 挤压加工提高了粗蛋白和硫的消化率, 但显著降低 ($P < 0.05$) 镁和总磷的消化率。挤压大豆添加植酸酶使镁、总磷、植酸磷、锰和锌的消化率显著提高 ($P < 0.05$)。压榨大豆添加植酸酶后使粗蛋白、硫、总磷和植酸磷的消化率显著提高 ($P < 0.05$)。使挤压大豆中的磷和其它矿物质能有效释放的植酸酶最佳剂量, 对鳟鱼为 400 FTU/kg 饲料左右。

前 言

大豆是世界上种植最广泛的油料作物。提取油脂后的豆粕因其良好的氨基酸平衡和较高的粗蛋白含量而被用作动物饲料的蛋白来源。豆粕在鱼饲料研究和商品化方面也日见兴旺 (Cho 等, 1974; Reinitz, 1980; Tacon 等, 1983; Abel 等, 1984; Robinson 等, 1985; Wilson 和 Poe, 1985; Hughes, 1988; 1991; Pongmaneerat 和 Watanabe, 1992; Oliva-Teles 等, 1994; Riche 和 Brown, 1996)。Hardy (1995) 指出, 全球豆粕产量在以往 25 年的连续增长, 使豆粕成为鱼饲料在未来应用方面最有希望的替用蛋白源。

来自捕捞鱼的鱼粉和鱼油产量目前在世界范围未见增长, 因而有必要对替用蛋白源和油脂源的营养价值作出评价。全脂大豆大致含有 38% 粗蛋白, 18% 油脂, 可以用来代替鱼饲料中的鱼粉和鱼油 (Wilson, 1992)。但是, 未加工的全脂大豆含有抗胰蛋白酶之类的抗营养因子, 会降低全脂大豆配制的鱼饲料的粗蛋白或氨基酸消化率。挤压 (俗称膨化) 或压榨加工可以破坏抗胰蛋白酶和其它抗营养因子的大部分活性, 从而提高全脂大豆对鱼的营养价值 (Wilson, 1992)。

饲料工业采用干挤压制作全脂大豆, 也通过压榨技术生产豆油和豆粕。在挤压和压榨过程中大豆发生物理化学变化。温和的加工条件可提高植物蛋白消化率 (Srihara 和 Alexander, 1984; Håkansson 等, 1987); 但剧烈的加工条件会使赖氨酸与还原糖发生美拉德反应而降低蛋白和氨基酸的消化率。

挤压对矿物质生物利用率的影响正日益受人关注。植物原料配制的鱼饲料, 其矿物质生物利用率通常受植酸盐含量的影响。Cheng 和 Hardy (付印中) 报道, 以大麦、玉米面筋粉和小

麦配

* 原文发表于 Aquaculture 218 (1-4): 501-514, March, 2003.

制的虹鳟鱼饲料，其铜、磷和锌的利用率在挤压后明显下降，部分原因是植物原料中内在的植酸酶被挤压的高温破坏。鉴于挤压后矿物质利用率下降，因而有必要寻求改善挤压鱼饲料矿物质利用率的方法。

微生物植酸酶是专一分解植酸盐的酶，动物（包括虹鳟鱼）的消化道内有这种酶，但其活性不能将植酸盐充分地消化(Bitar 和 Reinhold, 1972; Ketola, 1985; Lall, 1991)。现今已有可添加到鱼和其它动物饲料中的商业化植酸酶出售。本试验的目标是：1.评价挤压加工、压榨加工和在挤压全脂大豆及压榨大豆中添加植酸酶对虹鳟鱼饲料中干物、粗蛋白、氨基酸、磷和其它矿物质的表观消化率的影响；2.确定可以让全脂大豆中的磷和其它矿物质有效释放的植酸酶最佳剂量。

材料和方法

试验设计和试验饲料制备

本试验按完全随机设计进行安排，以挤压全脂大豆配制的试验饲料添加植酸酶的剂量处理分别为 0、200、400、600、800、1000 FTU/kg 饲料；以压榨大豆配制的试验饲料添加植酸酶的剂量为 200 FTU/kg 饲料；此外还有未加工大豆。以上三类材料都按 30%比例与一种酪蛋白-白明胶配制的参照饲料（70%，表 1）混合，用以测定干物和几种养分的表观消化率。试验饲料未添加常量或微量元素。

表 1 参照饲料的组成

原料	%
酪蛋白 ¹	44.0
白明胶 ²	10.5
糊精 ²	14.3
羧甲基纤维素 ²	1.0
-纤维素 ²	4.5
复合维生素 ³	2.0
复合氨基酸 ⁴	4.1
抗坏血酸 ⁵	0.2
氯化胆碱 ¹	1.0
氧化钇 ²	0.01
Finnstim ⁶ 增味剂	1.39
鱼油（鲱鱼） ⁷	17.0

¹ 购自 ICN Biomedicals, Inc., Cleveland, OH, USA.

² 购自 ICN Biomedicals, Inc., Cleveland, OH, USA

³ 给每 kg 饲料提供：硫胺素 62 mg，核黄素 71 mg，烟酸 294 mg，泛酸钙 153 mg，吡哆醇 50 mg，叶酸 22 mg，维生素 B₁₂ 0.08 mg，生物素 0.8 mg，myoinositol, 176 mg，维生素 A 8818 IU，维生素 D₃ 588 mg，维生素 E 670 mg，复合水溶性维生素 K 37mg。

⁴ 给每 kg 干饲料提供：蛋氨酸 10 mg，精氨酸 10mg、组氨酸 3 mg、赖氨酸 10mg、甘氨酸 10mg、

苏氨酸 2 mg。

⁵ 购自 Hoffman La-Roche, Basel, Switzerland。

⁶ 增味剂, 含甜菜碱 48%, 购自 EWOS Canada, LTD, Surrey, B.C., Canada。

⁷ 购自 Rangen Inc., Buhl, ID, USA

将未加工大豆等分三份。一份用锤片粉碎机(制造商 Roskamp Champion, Waterloo, IA, USA)粉碎;第二份用干挤压机 (Insta-Pro® Model 2500) 进行挤压;第三份经干挤压后用一种型号为 Insta-Pro® Model 1500 的连续卧式压榨机(制造商 Insta-Pro International, Des Moines, IA, USA)在 154-160°C 不加水条件下压榨。在挤压和压榨过程中,大豆的一部分水分被蒸发;压榨过程还会压出约 63%的豆油(表 2)。由于水份的减少,要压榨大豆中的其它养分水平相应提高。将微生物植酸酶(Natuphos 5000 L, 活性 5,537 FTU/g,批号 lot # 20-0251, BASF, Canada)先用自来水混合再与干料搅拌加进饲料中(300ml/kg 饲料)。干料与水和植酸酶混合后立即用面条机制成颗粒饲料,在 20 °C 左右风干 48 h,室温保存 2 周后使用。

表 2 大豆化学分析结果(湿基,双样品分析结果平均)

项目	未加工大豆	挤压全脂大豆	压榨大豆
水分(%)	9.05	5.88	6.30
粗蛋白(%)	40.40	41.80	48.80
粗脂肪(%)	14.14	15.32	5.24
镁(%)	0.28	0.29	0.34
硫(%)	0.32	0.33	0.40
总磷(%)	0.62	0.63	0.73
植酸磷(%)	0.46	0.51	0.46
铜(mg kg ⁻¹)	15.00	16.00	18.50
锰(mg kg ⁻¹)	28.50	30.00	34.50
锌(mg kg ⁻¹)	40.50	42.50	49.00
精氨酸(%)	2.96	3.03	3.49
组氨酸(%)	1.08	1.13	1.31
异亮氨酸(%)	1.85	1.87	2.26
亮氨酸(%)	3.12	3.23	3.76
赖氨酸(%)	2.52	2.60	3.00
蛋氨酸(%)	0.55	0.57	0.68
苯丙氨酸(%)	2.06	2.12	2.45
苏氨酸(%)	1.47	1.58	1.85
色氨酸(%)	0.32	0.60	0.70
缬氨酸(%)	2.00	2.00	2.36
丙氨酸(%)	1.69	1.77	2.07
天冬氨酸(%)	4.46	4.68	5.51
胱氨酸(%)	0.58	0.60	0.72
谷氨酸(%)	7.16	7.52	8.89
甘氨酸(%)	1.65	1.74	2.04

脯氨酸(%)	2.02	2.11	2.49
丝氨酸(%)	1.70	1.84	2.24
酪氨酸(%)	1.44	1.48	1.70

试验饲料的化学分析结果列入表 3。挤压的全脂大豆和添加植酸酶的全脂大豆试验饲料的营养构成近似。这两类饲料的多数养分均略高于未加工大豆试验饲料，其差别与未加工大豆、挤压全脂大豆和压榨大豆的化学组成差别相当。所有试验饲料的粗蛋白水平均低于参照饲料，这是由于试验饲料都按 30:70 之比加以稀释的缘故。挤压的和添加植酸酶的全脂大豆试验饲料，其氨基酸构成也近似，但低于参照饲料和添加植酸酶的压榨大豆试验饲料。

表 3 试验饲料化学分析结果（湿基，双样品分析结果平均）

项 目	参照 饲料	未加工 大豆	挤压全脂大豆						压榨大豆
			植酸酶添加量(FTU/kg 饲料)						200
			0	200	400	600	800	1000	
水分 (%)	10.95	7.70	7.45	7.41	7.37	7.18	6.92	7.20	7.90
粗蛋白(%)	57.56	49.79	51.33	50.93	51.49	51.56	51.52	51.71	53.20
镁(%)	0.07	0.09	0.09	0.10	0.09	0.10	0.09	0.10	0.11
硫(%)	0.59	0.52	0.53	0.53	0.53	0.53	0.50	0.53	0.53
总磷 (%)	0.37	0.45	0.46	0.47	0.46	0.46	0.44	0.46	0.48
植酸磷(%)	0.01	0.16	0.17	0.17	0.16	0.16	0.16	0.12	0.20
铜(mg kg ⁻¹)	5.30	9.20	8.85	8.80	8.75	8.70	8.70	8.75	10.15
锰 (mg kg ⁻¹)	3.10	9.80	11.00	11.50	12.50	11.50	13.00	11.00	12.50
锌(mg kg ⁻¹)	96.50	100.00	105.00	98.50	100.00	99.00	100.00	97.50	105.00
精氨酸 (%)	3.26	3.00	2.98	3.14	3.28	3.07	3.13	3.04	3.40
组氨酸(%)	1.52	1.40	1.35	1.47	1.53	1.39	1.41	1.47	1.53
异亮氨酸 (%)	2.21	2.07	2.02	2.12	2.29	2.08	2.02	2.05	2.32
亮氨酸(%)	4.39	3.74	3.73	3.99	4.18	3.79	3.99	3.81	4.22
赖氨酸(%)	4.61	3.59	3.57	3.78	3.99	3.65	3.77	3.65	4.05
蛋氨酸(%)	2.04	1.62	1.49	1.64	1.69	1.57	1.64	1.50	1.66
苯丙氨酸(%)	2.46	2.23	2.20	2.34	2.46	2.23	2.34	2.27	2.52
苏氨酸(%)	2.09	1.79	1.77	1.90	1.95	1.77	1.91	1.82	1.99
色氨酸(%)	0.55	0.45	0.47	0.52	0.51	0.52	0.50	0.52	0.58
缬氨酸(%)	2.99	2.61	2.56	2.69	2.91	2.64	2.59	2.61	2.95
丙氨酸(%)	2.30	2.00	2.00	2.10	2.23	2.07	2.14	2.04	2.26
天冬氨酸(%)	3.65	3.66	3.64	3.87	4.01	3.73	3.86	3.70	4.27
胱氨酸 (%)	0.18	0.28	0.28	0.30	0.31	0.29	0.30	0.29	0.34
谷氨酸 (%)	11.32	8.66	8.78	9.39	9.85	9.00	9.36	8.83	10.19
甘氨酸 (%)	4.18	3.05	3.11	3.25	3.48	3.31	3.36	3.13	3.52
脯氨酸(%)	6.01	4.25	4.29	4.58	4.87	4.43	4.72	4.39	4.89
丝氨酸(%)	2.32	1.90	1.88	2.09	2.06	1.89	2.07	1.95	2.16

酪氨酸(%)	2.25	1.85	1.85	2.01	2.07	1.86	2.00	1.92	2.13
植酸酶活性分析值： (FTU/kg 饲料)	0	0	0	210	455	690	817	1046	225

饲养和粪便收集

50 条一组的虹鳟鱼 (学名 *Oncorhynchus mykiss*, 平均初重 170.8 ± 5.5 g) 饲养在一个 150 升有机玻璃鱼缸内, 共 18 个鱼缸。以 5 l/min 速度给鱼缸连续供水(14.5 °C)。给每种试验饲料随机指定两个鱼缸。用两周时间让鱼适应试验条件, 在此期间, 所有的鱼都喂一种商业虹鳟鱼饲料(商品名和产地 Silver Cup, Murray, UT, USA), 该饲料含 10% 水、42% 粗蛋白、12% 粗脂肪、3% 粗纤维和 9% 灰分。

实验室从早 5 点到晚 7 点用荧光灯照明。收集粪便之前的一周, 每天下午 1 点用试验饲料 (表 3) 喂食一次, 至明显吃饱为止。收集粪便在早 8 点进行, 手工将所有的鱼挤出粪便, 按鱼缸收集一起。收集粪便每隔三天进行一次, 共收集三次。手工挤粪之前, 用一种麻醉剂(tricaine methane sulfonate, 间氨基苯酸乙酯甲磺酸盐, 用量 100 mg/l, 供货 Argent Chemical Laboratories, Redmond, WA, USA) 将鱼轻微麻醉。

化学分析

将饲料和粪便放在对流烘箱内 105 °C 通夜烘干。干燥的样品用手工研磨粉碎。用 LECO FP-428 测氮仪(LECO Instruments, St. Joseph, MI, USA)测定粗蛋白 (总氮 $\times 6.25$)。用索氏抽提仪(Soxtec System HT, FOSS TECATOR AB, Hoganas, Sweden)以氯化亚甲作溶剂测定粗脂肪。矿物元素用 Optima 3200 原子分光光度仪(Perkin-Elmer Corp., Norwalk, CT, USA)测定。扼要地说, 将双份平行样品置 60°C 下干燥 48 h, 粉碎至通过 1mm 筛, 取 0.25g 试样加进 3ml 浓缩的微量元素级硝酸, 室温放置过夜进行预硝化, 然后在 105°C 硝化 3-4h。用 18 M Ω ·cm 水将硝化物稀释至 10ml, 用以分析镁、硫、磷、铜、锰、锌和钼。平行样品的植酸磷按 Harland and Oberleas (1986)方法测定。氨基酸用 Beckman System 6300 氨基酸分析仪(Beckman Instruments, Inc., Fullerton, CA, USA)测定。

计算和统计方法

用非吸收指示剂钼为基准, 计算干物、粗蛋白、矿物质和氨基酸的表观消化率 (Sugiura 等, 1998)。对这些数据进行方差分析, 以确定挤压加工和添加植酸酶对全脂大豆和压榨大豆的干物和各营养成分的影响。参照饲料和试验饲料的营养成分消化率计算式如下: 表观消化率(%) = $100 \times [1 - (\text{饲料钼} \% / \text{粪便钼} \%) \times (\text{粪便养分} \% / \text{饲料养分} \%)]$ (Maynard 和 Loosli, 1969)。参照饲料和试验饲料的干物消化率计算式如下: 表观消化率 = $100 \times [1 - (\text{饲料钼} \% / \text{粪便钼} \%)]$ 。

未加工大豆、挤压全脂大豆、添加植酸酶的挤压全脂大豆和压榨大豆, 其干物和营养成分的消化率用下列算式(Cho 和 Slinger, 1979)计算: 表观消化率 = $[\text{试验饲料消化率} - (1 - i) \times \text{参照饲料消化率}] / i$, 其中: i 是所计算的材料在试验饲料中的%, 本试验中 $i = 30\%$ 或 0.3。统计计算按 Prism(管理用的程序可靠性信息系统)第 3 版本(GraphPad, Inc., San Diego, CA, USA)进行。

结 果

未加工大豆、挤压全脂大豆、添加植酸酶的挤压全脂大豆和压榨大豆, 饲养虹鳟鱼时, 其

干物、粗蛋白和矿物质的表观消化率列入表 4。在各种试验饲料之间，干物和铜的表观消化率没有显著差别，但粗蛋白、镁、硫、总磷、植酸磷、锰和锌的表观消化率差别显著。与未加工大豆的各项表观消化率相比，未添加植酸酶的挤压加工可提高粗蛋白和磷的表观消化率，显著降低镁和总磷的表观消化率，但对干物、植酸磷、铜、锰和锌的表观消化率没有影响。添加植酸酶 200 FTU/kg 饲料的挤压全脂大豆，与未加工大豆的各项表观消化率相比，可显著提高粗蛋白、镁、硫、总磷、植酸磷、锰和锌的表观消化率，但对干物和铜的表观消化率没有影响；与经过挤压但未添加植酸酶的全脂大豆的表观消化率相比，可显著提高镁、总磷、植酸磷、锰和锌的表观消化率。这表明添加植酸酶能有效地释放挤压全脂大豆中的镁、总磷、植酸磷、锰和锌。添加植酸酶 400 FTU/kg 饲料的挤压全脂大豆，比添加 200 FTU/kg 饲料的挤压全脂大豆的各项表观消化率，又进一步提高了镁、总磷、植酸磷、锰和锌的表观消化率，证明植酸酶的剂量对挤压全脂大豆中镁、总磷、植酸磷、锰和锌的释放有影响。不过，植酸酶的剂量超过 600 FTU/kg 饲料 即不再进一步提高镁、总磷、植酸磷、锰和锌的表观消化率。这意味着植酸酶的最佳剂量对鳟鱼大致是 400 FTU/kg 饲料。压榨大豆添加植酸酶，与未加工大豆的各项表观消化率相比，可显著提高粗蛋白、硫、总磷和植酸磷的表观消化率，但对干物、镁、铜、锰和锌的表观消化率没有明显影响。

表 4 虹鳟鱼对大豆的干物、粗蛋白和矿物质的表观消化率

(%, 平均值 ± S. D., N = 2 鱼缸), 附不同上标字符的同行平均值之间差异显著 (P < 0.05)

项目	未加工大豆	挤压全脂大豆						压榨大豆	P 值
		植酸酶添加量 (FTU/kg 饲料)						200	
		0	200	400	600	800	1000		
干物	4.5 ±1.6	73.8 ±8.2	73.6 ±3.6	75.7 ±3.7	70.2 ±3.5	82.0 ±1.5	74.2 ±4.3	75.9 ±3.3	0.3829
粗蛋白	88.0 ±0.4 ^a	97.2 ±1.1 ^b	96.8 ±0.6 ^b	96.0 ±2.3 ^b	95.4 ±1.8 ^b	97.8 ±0.4 ^b	96.6 ±0.2 ^b	97.9 ±0.2 ^b	0.0005
镁	68.5 ±0.4 ^a	59.6 ±2.7 ^b	74.7 ±1.2 ^c	80.0 ±0.3 ^d	79.5 ±1.5 ^d	83.4 ±0.5 ^d	81.7 ±0.0 ^d	68.0 ±3.3 ^a	<0.0001
硫	93.1 ±0.4 ^a	97.0 ±0.7 ^b	96.2 ±0.1 ^b	96.8 ±0.0 ^b	93.2 ±0.2 ^b	97.2 ±0.0 ^b	96.0 ±0.3 ^b	97.3 ±0.2 ^b	0.0001
总磷	21.2 ±0.1 ^a	12.5 ±4.8 ^b	81.3 ±3.4 ^c	92.2 ±0.0 ^d	89.7 ±0.3 ^d	95.2 ±0.6 ^d	93.9 ±0.3 ^d	31.7 ±6.5 ^e	<0.0001
植酸磷	29.9 ±1.2 ^a	19.6 ±6.1 ^a	60.9 ±1.9 ^b	87.2 ±1.3 ^c	93.8 ±1.2 ^c	93.7 ±4.7 ^c	93.8 ±1.4 ^c	60.6 ±0.2 ^b	<0.0001
铜	89.9 ±0.2	93.3 ±1.2	92.1 ±1.6	93.2 ±0.1	92.1 ±0.4	93.6 ±0.1	93.4 ±0.2	92.7 ±2.7	0.1767
锰	20.3 ±0.4 ^a	13.5 ±1.2 ^a	46.2 ±2.9 ^b	76.3 ±6.1 ^c	78.1 ±0.4 ^c	81.2 ±0.8 ^c	81.4 ±1.2 ^c	16.8 ±0.9 ^a	<0.0001
锌	14.6 ±5.7 ^a	7.2 ±0.3 ^a	48.4 ±3.3 ^b	85.1 ±13.0 ^c	73.7 ±2.1 ^c	78.8 ±0.5 ^c	80.9 ±3.3 ^c	15.7 ±5.6 ^a	<0.0001

用未加工大豆、挤压全脂大豆、添加植酸酶的挤压全脂大豆和压榨大豆饲养虹鳟鱼时各种氨基酸的表观消化率列入表 5。挤压加工使所有氨基酸的表观消化率都比未加工大豆明显提

高。添加植酸酶对挤压全脂大豆中氨基酸的表观消化率没有正的影响,尽管在某些剂量时使某几种氨基酸的表观消化率有所增减。这是因为没有添加植酸酶的挤压全脂大豆中各种氨基酸的表观消化率已经很高(> 95%)。添加植酸酶使压榨大豆中所有氨基酸的表观消化率都比未加工大豆明显提高。

讨 论

在养鱼生产中矿物质的利用率,特别是磷的利用率日益受人关注。磷是淡水环境最重要的污染源之一。因此,降低饲料的含磷水平和粪便含磷量,是减少环境污染的重要途径。有几项用冷

表5 虹鳟鱼对大豆的氨基酸的表观消化率(% , 平均值 ± S. D. , N=2 鱼缸), 附不同上标字符的同行平均值之间差异显著(P<0.05)

项目	未加工大豆	挤压全脂大豆						压榨大豆	P 值
		植酸酶添加量 (FTU/kg 饲料)						200	
		0	200	400	600	800	1000		
精氨酸	88.9 ±1.0 ^a	98.9 ±0.2 ^b	98.8 ±0.0 ^b	99.1 ±0.2 ^b	96.5 ±0.5 ^b	99.5 ±0.0 ^b	98.2 ±0.1 ^b	99.5 ±0.0 ^b	<0.0001
组氨酸	91.3 ±0.3 ^a	97.8 ±0.2 ^b	98.0 ±0.1 ^b	98.1 ±0.3 ^b	93.3 ±0.6 ^c	98.6 ±0.1 ^b	96.7 ±0.3 ^b	98.4 ±0.2 ^b	<0.0001
异亮氨酸	84.4 ±0.9 ^a	96.3 ±0.3 ^b	96.2 ±0.6 ^b	97.3 ±0.5 ^b	91.6 ±0.4 ^c	97.0 ±1.1 ^b	94.6 ±0.5 ^b	97.1 ±0.2 ^b	<0.0001
亮氨酸	85.4 ±1.1 ^a	97.7 ±0.3 ^b	97.6 ±0.0 ^b	98.3 ±0.1 ^b	92.6 ±0.7 ^c	98.5 ±0.1 ^b	96.0 ±0.1 ^d	98.5 ±0.1 ^b	<0.0001
赖氨酸	93.4 ±0.5 ^a	98.0 ±0.2 ^b	98.4 ±0.2 ^b	98.7 ±0.0 ^b	94.3 ±0.7 ^c	99.1 ±0.1 ^b	97.5 ±0.1 ^b	98.9 ±0.1 ^b	<0.0001
蛋氨酸	95.9 ±0.1 ^a	98.5 ±0.0 ^b	99.1 ±0.0 ^b	99.1 ±0.3 ^b	95.2 ±0.3 ^a	99.4 ±0.2 ^b	97.9 ±0.1 ^b	99.4 ±0.1 ^b	<0.0001
苯丙氨酸	84.4 ±1.2 ^a	97.7 ±0.3 ^b	97.7 ±0.1 ^b	98.1 ±0.2 ^b	93.1 ±0.8 ^c	98.7 ±0.0 ^b	96.5 ±0.2 ^b	98.7 ±0.1 ^b	<0.0001
苏氨酸	86.5 ±1.2 ^a	96.1 ±1.0 ^b	96.4 ±0.4 ^b	96.6 ±0.4 ^b	91.6 ±1.3 ^c	98.0 ±0.3 ^d	94.6 ±0.3 ^b	97.4 ±0.4 ^d	<0.0001
色氨酸	93.3 ±0.2 ^a	96.7 ±0.8 ^b	98.1 ±0.6 ^b	97.8 ±0.1 ^b	93.8 ±0.3 ^c	97.8 ±0.2 ^b	96.7 ±0.7 ^b	98.7 ±0.4 ^b	<0.0001
缬氨酸	87.3 ±0.6 ^a	97.6 ±0.0 ^b	97.8 ±0.7 ^b	98.4 ±0.1 ^b	92.6 ±0.7 ^c	98.4 ±0.2 ^b	96.1 ±0.2 ^d	98.6 ±0.0 ^b	<0.0001
丙氨酸	86.7 ±1.2 ^a	97.3 ±0.5 ^b	97.4 ±0.1 ^b	98.1 ±0.2 ^b	94.0 ±1.1 ^c	98.6 ±0.0 ^d	96.5 ±0.1 ^b	98.7 ±0.2 ^d	<0.0001
天冬氨酸	81.9 ±1.4 ^a	97.6 ±0.4 ^b	97.4 ±0.0 ^b	98.2 ±0.3 ^c	93.3 ±0.9 ^d	98.9 ±0.1 ^c	96.2 ±0.2 ^b	98.9 ±0.1 ^c	<0.0001
胱氨酸	77.2 ±3.1 ^a	96.0 ±3.1 ^b	97.4 ±2.8 ^b	95.1 ±3.5 ^b	90.1 ±2.4 ^b	98.1 ±2.1 ^b	95.4 ±3.1 ^b	97.8 ±3.2 ^b	0.0012
谷氨酸	89.8 ±0.5 ^a	98.2 ±0.1 ^b	98.3 ±0.1 ^b	98.8 ±0.0 ^{bd}	93.8 ±0.6 ^c	99.2 ±0.0 ^d	96.8 ±0.1 ^e	99.1 ±0.0 ^d	<0.0001

甘氨酸	91.4 ±0.7 ^a	98.3 ±0.2 ^b	98.4 ±0.0 ^b	98.6 ±0.1 ^b	96.5 ±0.5 ^c	99.0 ±0.0 ^d	97.7 ±0.1 ^c	98.9 ±0.1 ^d	<0.0001
脯氨酸	92.7 ±0.5 ^a	98.1 ±0.2 ^b	98.3 ±0.0 ^b	98.5 ±0.1 ^b	93.4 ±0.8 ^a	98.9 ±0.0 ^b	96.4 ±0.2 ^c	98.5 ±0.1 ^b	<0.0001
丝氨酸	85.9 ±1.7 ^a	97.2 ±0.8 ^b	97.6 ±0.6 ^b	97.6 ±0.5 ^b	91.8 ±1.4 ^c	98.5 ±0.5 ^b	95.4 ±0.2 ^b	98.2 ±0.3 ^b	<0.0001
酪氨酸	90.1 ±0.9 ^a	95.0 ±0.6 ^b	95.9 ±2.9 ^b	96.0 ±1.3 ^b	91.0 ±0.6 ^a	96.1 ±0.9 ^b	93.4 ±0.6 ^a	95.6 ±0.1 ^b	0.0064

水鱼（如虹鳟鱼、鲑鱼）进行的研究表明，典型的商业化饲料用于日粮的磷，大约 20% 留在鱼体内(Ketola, 1982; Philips and Beveridge, 1986; Ackefors and Enell, 1990; Holby and Hall, 1991; Ketola and Harland, 1993)，就是说其余的磷都排到水里。鱼粉是用于食肉性鱼饲料的一种主要原料，但是，鱼粉含磷很高，其生物利用率对许多种鱼（包括虹鳟鱼和鲑鱼）不高(NRC, 1993)。而且，鱼粉比全脂大豆之类的植物蛋白粉要贵。在冷水鱼饲料中用全脂大豆替换鱼粉，不仅可减少日粮中的磷，还会降低饲料成本。

本试验中未加工大豆的植酸磷占到总磷的 74.2%，这正是其磷的生物利用率不高的原因所在，对虹鳟鱼而言，未加工大豆中植酸磷与总磷的表观消化率分别为 29.9% 与 21.2%。Riche and Brown (1996) 和 Sugiura 等 (1998) 报道，豆粕中植酸磷与总磷的表观利用率对虹鳟鱼分别是 0 和 20%。而且，据报道植酸磷会降低多种日粮成分的生物利用率和鱼的生产表现。Spinelli 等 (1983) 报道，饲喂植酸盐的虹鳟鱼，生长速度和饲料转化率下降 10%。Sugiura 等 (1998) 报道，虹鳟鱼对日粮中钙、铁、镁、锰、磷、锶和锌的吸收，在饲喂豆粕时低于饲喂一种酪蛋白-白明胶配制的半纯日粮时的吸收。Gatlin 和 Wilson (1984) 发现，当斑点叉尾鲷的日粮含植酸盐 1.1% 时，对锌的需要量比报道的需要量大 10 倍。Richardson 等 (1985) 报道过半纯日粮中的高植酸盐含量抑制鲑鱼的生长和饲料效率。Satoh 等 (1989) 也报道，当斑点叉尾鲷日粮中含植酸盐从 1.1% 增加到 2.2% 时，鱼的增重、饲料效率和椎骨含锌量均下降。

关于用干挤压机或压榨机加工制作的饲料喂养虹鳟鱼时矿物质表观消化率方面的资料，以往尚未见报道。按本研究的结果，挤压加工使得挤压全脂大豆中的镁和总磷的表观消化率低于未加工大豆，这好象是因为干挤压的高温降低了大豆内在的植酸酶的活性。但本研究在未加工大豆和挤压全脂大豆配制的饲料中未见植酸酶活性（表 3），说明挤压全脂大豆中镁和总磷表观消化率下降另有原因。Powers Hughes 和 Soares (1998) 曾报道，豆粕、玉米面筋粉、小麦次粉和米糠配制的鱼饲料经 65 °C 挤压后，植酸酶活性降低 29-79%。据本研究结果，挤压全脂大豆添加植酸酶后，镁、总磷、植酸磷、锰和锌的表观消化率都得到提高。Wise (1983) 指出，植物源植酸盐可以与其它二价和三价离子，如钙、铁、镁、锰和锌，结合生成植酸盐-矿物质复合物。我们的研究表明，当磷的表观消化率提高时，镁、锰和锌的表观消化率也提高，说明全脂大豆的植酸盐-矿物质复合物中的磷是与镁、锰和锌结合在一起的。

其他一些研究人员也报道过在虹鳟鱼和其它鱼饲料中添加植酸酶有助于磷和其它矿物质的释放(Cain 和 Garling, 1995; Rodehutsord 和 Pfeffer, 1995; Schaefer 等, 1995; Jackson 等, 1996; Lanari 等, 1998; Oliva-Teles 等, 1998; Powers Hughes 和 Soares, 1998; Storebakken 等, 1998; Vielma 等, 1998; 2000; Forster 等, 1999; Papatryphon 等, 1999; Masumoto 等, 2001; Papatryphon 和 Soares, 2001; Sugiura 等, 2001)。但是，关于添加植酸酶的最佳剂量，在不同

的研究和不同的鱼种之间都不一样。据本研究的结果，挤压全脂大豆添加 400 FTU/kg 饲料左右，磷和其它矿物质的释放最佳。进一步应进行用添加植酸酶但不添加常量和微量矿物质的饲料饲养虹鳟鱼的试验，以进一步考查添加植酸酶是否有助于挤压全脂大豆中常量和微量矿物质的释放。还应检测水质，以证实添加植酸酶对环境保护的好处。

结 论

根据本研究的结果，我们的结论是：干挤压可提高粗蛋白和硫的表观消化率，但降低镁和总磷的表观消化率；挤压全脂大豆添加植酸酶的最佳剂量对虹鳟鱼是 400 FTU/kg 饲料左右。

致谢

十分感谢加拿大 British Columbia 省 BASF Canada 公司对本项研究部分经费的赞助。感谢 BASF Canada 公司的 Rudi Kampen 先生为我们提供植酸酶。感谢 Insta-Pro International 公司的 Nabil Said 博士提供大豆产品。感谢 Robert P. Wilson 博士和另外两位匿名评阅人对本文的建议和帮助。还感谢本实验室的 Mike Casten, Carol Hoffman, Jana Cole 和 Lori Ambrose 的协助。

参 考 文 献

- Abel, H.J., Becker, K., Meske, C.H.R., Friedrich, W., 1984. Possibilities of using heat-treated full-fat soybeans in carp feeding. *Aquaculture* 42, 97-108.
- Ackefors, H., Enell, M., 1990. Discharge of nutrients from Swedish fish farming to adjacent sea areas. *Ambio*. 19, 28-35.
- Bitar, K., Reinhold, J. G., 1972. Phytase and alkaline phosphatase activities in intestinal mucosa of rat, chicken, calf, and man. *Biochem. Biophys. Acta* 268, 442-452.
- Cain, K.D., Garling, D.L., 1995. Pretreatment of soybean meal with phytase for salmonid diets to reduce phosphorus concentrations in hatchery effluents. *Prog. Fish-Cult.* 57, 114-119.
- Cheng, Z.J., Hardy, R.W., (付印中). Effect of phytase on apparent digestibility coefficients of nutrients and energy availability of barley, canola meal, wheat and wheat middlings measured in vivo using rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquacult. Nutri.*
- Cho, C.Y., Slinger, S.J., 1979. Apparent digestibility measurement in feedstuffs for rainbow trout. In: Halver, J.E., Tiews, K. (Eds.), *Proc. World Symp. on Finfish Nutrition and Fishfeed Technology*, Vol. II. Heinemann, Berlin, Germany, pp. 239-247
- Cho, C.Y., Bayley, H.S., Slinger, S.J., 1974. Partial replacement of herring meal with soybean meal and other changes in diet for rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *J. Fish. Res. Bd. Canada* 31, 1523-1528.
- Forster, I., Higgs, D.A., Dosanjh, B.S., Rowshandeli, M., Parr, J., 1999. Potential for dietary phytase to improve the nutritive value of canola protein concentrate and decrease phosphorus output in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) held in 11 °C fresh water. *Aquaculture* 179, 109-125.
- Gatlin, III, D.M., Wilson, R.P., 1984. Zinc supplementation of practical channel catfish diets. *Aquaculture* 41, 31-36.
- Håkansson, B., Jägerstad, M., Öste, R., Åkesson, B., Jonsson, L., 1987. The effects of various thermal processes on protein quality, vitamins and selenium content in whole-grain wheat and white flour. *J. Cereal Sci.* 6, 269-282.
- Hardy, R.W., 1995. Current issues in salmonid nutrition. In: Lim, C.E., Sessa, D.J. (Eds), *Nutrition and Utilization Technology in Aquaculture*. AOCS Press, Champaign, IL, USA, pp. 26-35.
- Harland, B.F., Oberleas, D., 1986. Anion-exchange method for determination of phytate in foods: Collaborative

study. J. AOAC. 69, 667-670.

Holby, O., Hall, P.O.J., 1991. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. 2. Phosphorus. Mar. Ecol. Prog. Ser. 70, 263-272.

Hughes, S.G., 1988. Assessment of lupin flour as a diet ingredient for rainbow trout (Salmo gairdneri). Aquaculture 71, 379-385.

Hughes, S.G., 1991. Use of lupin flour as a replacement for full-fat soy in diets for rainbow trout (Oncorhynchus mykiss). Aquaculture 93, 57-62.

Jackson, L.S., Li, M.H., Robinson, E.H., 1996. Use of microbial phytase in channel catfish Ictalurus punctatus diets to improve utilization of phytate phosphorus. J. World Aquacult. Soc. 27, 309-313.

Ketola, H.G., 1982. Effect of phosphorus in trout diets on water pollution. Salmonid 6, 12-15.

Ketola, H.G., 1985. Mineral nutrition: effects of phosphorus in trout and salmon feeds on water pollution. In: Cowey, C.B., Mackie, A.M., Bell, C.B. (Eds.), Nutrition and Feeding in Fish. Academic Press, New York, NY, USA, pp. 465-474.

Ketola, H.G., Harland, B.F., 1993. Influence of phosphorus in rainbow trout diets on phosphorus discharges in effluent water. Trans. Am. Fish. Soc. 122, 1120-1126.

Lall, S.P., 1991. Digestibility, metabolism and excretion of dietary phosphorus in fish. In: Cowey, C.B., Cho, C.Y. (編). Nutritional Strategies and Aquaculture Waste. Proceedings of the First International Symposium on Nutritional Strategies in Management of Aquaculture Waste. University of Guelph, Ontario, Canada. pp. 21-36.

Lanari, D., D'Agaro, E., Turri, C., 1998. Use of nonlinear regression to evaluate the effects of phytase enzyme treatment of plant protein diets for rainbow trout (Oncorhynchus mykiss). Aquaculture 161, 345-356.

Masumoto, T., Tamura, B., Shimeno, S., 2001. Effects of phytase on bioavailability of phosphorus in soybean meal-based diets for Japanese flounder Paralichthys olivaceus. Fish. Sci. 67, 1075-1080.

Maynard, L.A., Loosli, J.K., 1969. Animal Nutrition. McGraw-Hill, New York, NY, USA, 533 pp.

NRC (National Research Council). 1993. Nutrient Requirements of Fish. National Academy Press, Washington, D.C., 114 pp.

Oliva-Teles, A., Gouveia, A.J., Gomes, E., Rema, P., 1994. The effect of different processing treatments on soybean meal utilization by rainbow trout, Oncorhynchus mykiss. Aquaculture 124, 343-349.

Oliva-Teles, A., Pereira, J.P., Gouveia, A., Gomes, E., 1998. Utilization of diets supplemented with microbial phytase by seabass (Dicentrarchus labrax) juveniles. Aquat. Living Resources 11, 255-259.

Papatryphon, E., Howell, R.A., Soares, Jr., J.H., 1999. Growth and mineral absorption by striped bass Morone saxatilis fed a plant feedstuff based diet supplemented with phytase. J. World. Aquacult. Soc. 30, 161-173.

Papatryphon, E., Soares, Jr., J.H., 2001. The effect of phytase on apparent digestibility of four practical plant feedstuffs fed to striped bass, Morone saxatilis. Aquacult. Nutr. 7, 161-167.

Philips, M., Beveridge, M., 1986. Cages and the effect on water condition. Fish Farmer 9, 17-19.

Pongmaneerat, J., Watanabe, T., 1992. Utilization of soybean meal as protein source in diets for rainbow trout. Nippon Suisan Gakkaishi 58, 1983-1990.

Powers Hughes, K., Soares Jr., J.H., 1998. Efficacy of phytase on phosphorus utilization in practical diets fed to striped bass Morone saxatilis. Aquacult. Nutr. 4, 133-140.

Reinitz, G., 1980. Soybean meal as a substitute for herring meal in practical diets for rainbow trout. Prog. Fish-Cult. 42, 103-106.

Richardson, N.L., Higgs, D.A., Beams, R.M., McBride, J.R., 1985. Influence of dietary calcium, phosphorus, zinc and sodium phytate level on cataract incidence, growth and histopathology in juvenile chinook salmon (Oncorhynchus tshawytscha). J. Nutr. 115, 553-567.

- Riche, M., Brown, P.B., 1996.** Availability of phosphorus from feedstuffs fed to rainbow trout, Oncorhynchus mykiss. Aquaculture 142, 269-282.
- Robinson, E.H., Miller, J.K., Vergara, V.M., Ducharme, G.A., 1985.** Evaluation of dry extrusion-cooked protein mixes as replacements for soybean meal and fish meal in catfish diets. Prog. Fish-Cult. 47, 102-109.
- Rodehutsord, M., Pfeffer, E., 1995.** Effects of supplemental microbial phytase on phosphorus digestibility and utilization in rainbow trout (Oncorhynchus mykiss). Water Sci. Technol., 31, 141-147.
- Satoh, S., Poe, W.E., Wilson, R.P., 1989.** Effect of supplemental phytate and /or tricalcium phosphate on weight gain, feed efficiency and zinc content in vertebrae of channel catfish. Aquaculture 80, 155-161.
- Schaefer, A., Koppe, W.M., Meyer-Burgdorff, K.H., Gunther, K.D., 1995.** Effects of microbial phytase on utilization of native phosphorus by carp in a diet based on soybean meal. Water Sci. Tech. 31, 149-155.
- Spinelli, J., Houle, C.R., Wekell, J.C., 1983.** The effect of phytates on the growth of rainbow trout (Salmo gairdneri) fed purified diets containing varying quantities of calcium and magnesium. Aquaculture 30, 71-83.
- Srihara, P., Alexander, J. C., 1984.** Effect of heat treatment on nutritive quality of plant protein blends. J. Can. Inst. Food Sci. Technol. 17, 237-241.
- Storebakken, T., Shearer, K.D., Roem, A.J., 1998.** Availability of protein, phosphorus and other elements in fish meal, soy-protein concentrate and phytase-treated soy-protein-concentrate-based diets to Atlantic salmon, Salmo salar. Aquaculture 161, 365-379.
- Sugiura, S.H., Dong, F.M., Rathbone, C.K., Hardy, R.W., 1998.** Apparent protein digestibility and mineral availabilities in various feed ingredients for salmonid feeds. Aquaculture 159, 177-202.
- Sugiura, S.H., Gabaudan, J., Dong, F.M., Hardy, R.W., 2001.** Dietary microbial phytase supplementation and the utilization of phosphorus, trace minerals and protein by rainbow trout [Oncorhynchus mykiss (Walbaum)] fed soybean meal-based diets. Aquacult. Research 32, 583-592.
- Tacon, A.G.J., Haaster, J.V., Featherstone, P.B., Kerr, K., Jackson, A.J., 1983.** Studies on the utilization of full-fat soybean and solvent extracted soybean meal in a complete diet for rainbow trout. Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish. 49, 1437-1443.
- Vielma, J., Lall, S.P., Koskela, J., Schöner, F.J., Mattila, P., 1998.** Effects of dietary phytase and cholecalciferol on phosphorus bioavailability in rainbow trout (Oncorhynchus mykiss). Aquaculture 163, 309-323.
- Vielma, J., Mäkinen, T., Ekholm, P., Koskela, J., 2000.** Influence of dietary soy and phytase levels on performance and body composition of large rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) and algal availability of phosphorus load. Aquaculture 183, 349-362.
- Wilson, R.P., Poe, W.E., 1985.** Effects of feeding soybean meal with varying trypsin inhibitor activities on growth of fingerling channel catfish. Aquaculture 46, 19-25.
- Wilson, T.R., 1992.** Full-fat soybean meal- an acceptable, economical ingredient in chinook salmon grower feeds. Ph.D. dissertation. University of Washington, Seattle, WA, USA.
- Wise, A., 1983.** Dietary factors determining the biological activities of phytate. Nutri. Abs. Rev. 53, 791-807.