

饲料生产的质量管理方法及 试验参数对动物生长的影响

程宗佳 博士 美国大豆协会饲料技术主任

Warren G. Dominy 博士 美国海洋研究所水产饲料和营养室

Keith C. Behnke 博士 美国堪萨斯州立大学谷物科学技术系

前 言

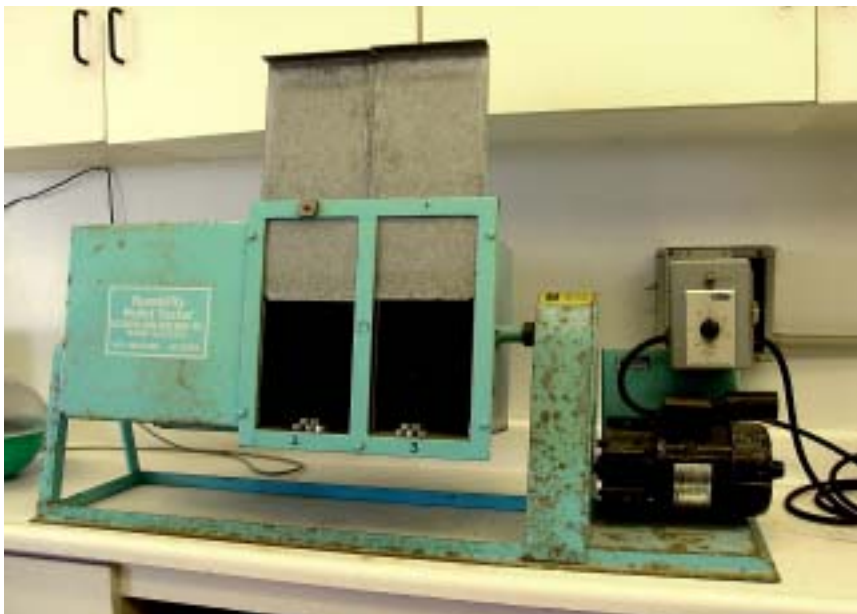
饲料工业，特别是水产饲料制造业，在以往 20 年迅猛发展。人口增长和生活的改善促进了对动物肉类、从而对饲料的需求。要生产高质量饲料，就必须具备优良的加工设备并掌握质量管理方法。本文拟介绍在美国饲料工业界用于饲料质量管理的几项基本而重要的实验室操作规程，希望对中国饲料工业的饲料质量管理有用。

一、颗粒饲料持久力指标（美国农业工程协会标准方法：ASAE 5269-3）

颗粒持久力指标（Pellet durability index，简写 PDI）用来衡量颗粒饲料（或粗屑饲料）在散运中（如货车）抗御破碎的相对能力。这项操作规程由堪萨斯州立大学谷物科学技术系首创，后被美国农业工程协会采纳。颗粒持久力测试装置见图 1，该操作规程见附录 A。

颗粒测试通常在冷却后立即进行，颗粒温度降到室温 ± 5.6 即视为冷却。如果测试时间推迟，持久力测试结果应标注冷却后推迟的小时数。例如在冷却后 4 小时测得颗粒持久力为 95，则测试结果写为 (95) 4。如在冷却之前进行测试，水分蒸发会明显丢失重量，使得表观颗粒持久力偏低。这就必须在试样翻滚前后做水分测定，从而确定水分蒸发丢失的重量，对最后重量作相应补偿。这种情况下颗粒持久力结果写为 (95) (1)。该操作规程可以修改变通，在试样翻滚前加进 5 个 1.27cm 六角形螺帽。

图 1 颗粒饲料持久力指标的测试装置

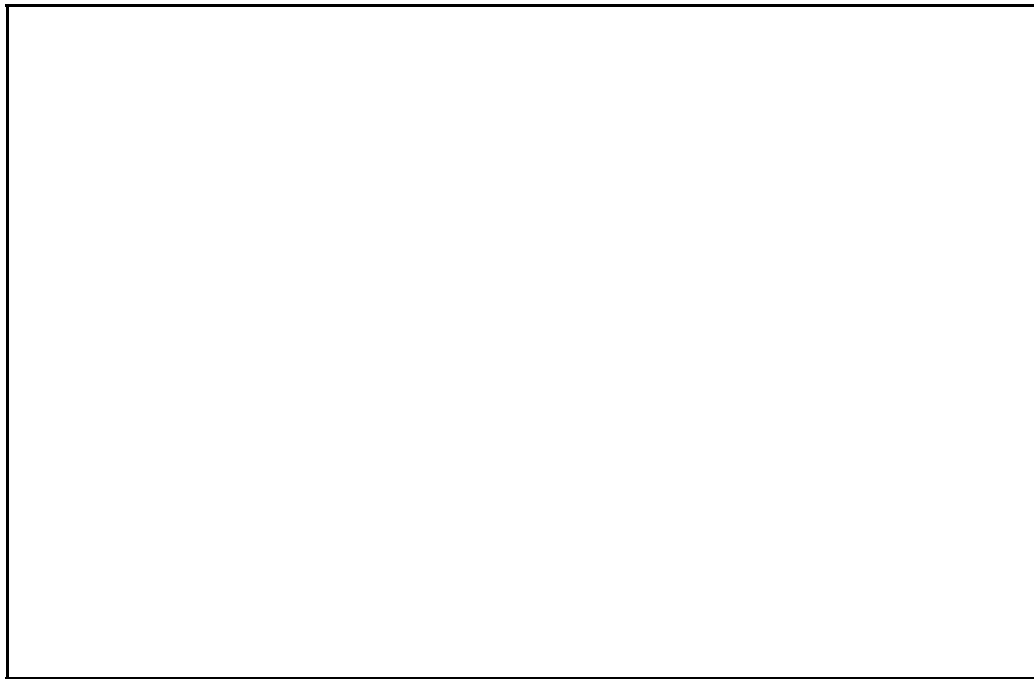


颗粒持久力与动物生长密切相关。Stark 等(1993)报道, 颗粒饲料饲喂仔猪(5. 6 kg , 断奶后 7 至 35 天), 与饲喂粉状饲料的猪相比, 其平均日增重 (ADG) 高 3. 9%, 饲料转化率 (FCR , 饲料/增重, 注: FCR 越低越好) 低 11. 3%; 与饲喂含 25%细粉的颗粒饲料的仔猪相比, 增重相近, FCR 低 2. 6% (图 2)。Stark 等 (1993) 的另一个试验发现, 用粉状饲料或含 60%细粉的饲料饲喂肥育的初产母猪 (53. 1kg), 其 ADG 一般低于用颗粒饲料饲养的猪。用过筛颗粒养猪, 其 FCR 比用粉状饲料养猪低 4. 7%, 过筛颗粒饲料中的细粉含量会使 FCR 直线上升 (图 3)。这些试验结果证明, 降低颗粒饲料的持久力指标会削弱颗粒饲料的优点。

图 2 颗粒质量对哺乳仔猪生长的影响(Stark 等, 1993)



图 3 颗粒质量对肥育猪生长的影响(Stark 等, 1993)



二、粒度（美国农业工程协会标准：ASAE S319）

这一方法用来测定一种饲料或原料样品的平均颗粒大小。计算粒度的数学公式很复杂，但我们只需了解如何使用计算机软件即可。要测定粒度，首先要了解筛号和筛孔数的关系，表 1 列举了筛号、筛孔数和颗粒大小之间的关系。粒度分析装置见图 4。扼要地说，将 12 个下列筛号的筛层和一个筛底叠在一起，即 Tyler 筛号（或美国筛号）8，10，14（12），20（16），28（30），35（40），48（50），65（70），100，150（140），200，270；将 100g 样品放进筛的顶层，摇动 10min；记录每层筛的样品重（图 5）；然后将重量数据输入计算机软件，粒度即自动得出，并有粒度分布显示（图 6）。

表 1 筛子和筛布规格—用于筛理测试的美国标准局筛号（USBS）

USBS 筛号	Tyler 标志目	ASTM 标志 μm	每 in 实际孔数	USBS 规格 in	筛孔尺寸 mm
4	4	4760	4.22	0.187	4.76
5	5	4000	4.98	0.4157	4.00
6	6	3360	5.81	0.132	3.36
7	7	2830	6.80	0.111	2.83
8	8	2380	7.89	0.0937	2.38
10	9	2000	9.21	0.0787	2.00
12	10	1680	10.72	0.0661	1.68
14	12	1410	12.58	0.0555	1.41
16	14	1190	14.66	0.0469	1.19
18	16	1000	17.15	0.0394	1.00
20	20	840	20.16	0.0331	0.84
25	24	710	23.47	0.0280	0.71
30	28	590	27.62	0.0232	0.59
35	32	500	32.15	0.0197	0.50

40	35	420	38.02	0.0165	0.42
45	42	350	44.44	0.0138	0.35
50	48	297	52.36	0.0117	0.297
60	60	250	61.93	0.0098	0.250
70	65	210	72.46	0.0083	0.210
80	80	177	85.47	0.0070	0.177
100	100	149	101.10	0.0059	0.149
120	115	125	120.48	0.0079	0.125
140	150	105	142.86	0.0041	0.105
170	170	88	166.67	0.0035	0.088
200	200	74	200.00	0.0029	0.074
230	230	62	238.10	0.0024	0.062
270	270	53	270.25	0.0021	0.053
325	325	44	323.00	0.0017	0.044

图 4 饲料或原料粒度测试装置



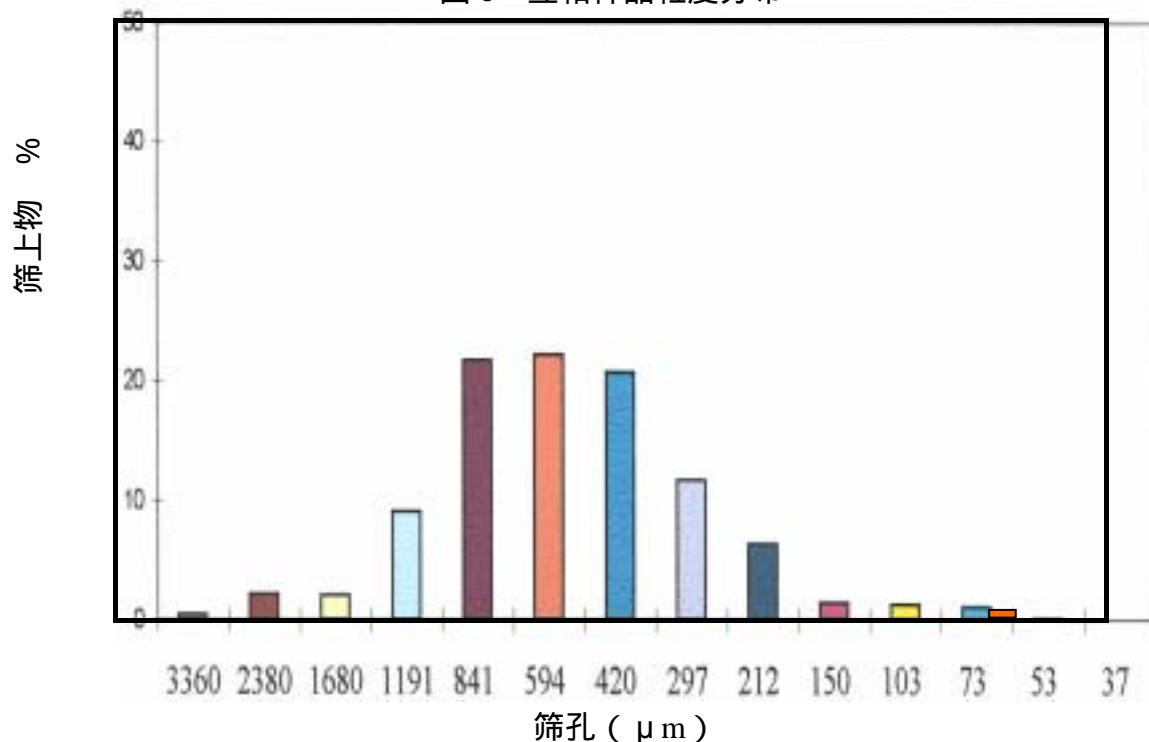
图 5 记录样品重量并计算豆粕样品粒度用的表格

材料：豆粕，日期：91.11.01

美国筛号	大小 μm	重量 g	%	%以下	log 直径	重量 \times log 直径	log 直径 $-\log DgW$	重量(log 直径 $-\log DgW)^2$
6	3360	0.40	0.41	99.59	3.06	1.44	0.79	0.25
8	2380	2.01	2.08	97.51	3.45	6.94	0.64	0.82
12	1680	2.00	2.07	95.44	3.30	6.06	0.49	0.48
16	1191	8.74	9.04	86.40	3.15	27.54	0.34	1.01
20	841	20.99	21.70	64.70	3.00	62.98	0.19	0.75

30	594	21.48	22.21	42.49	2.85	61.20	0.04	0.03
40	420	20.04	20.72	21.77	2.70	54.08	-0.11	0.25
50	297	11.28	11.66	10.10	2.55	28.74	-0.26	0.78
70	212	6.09	6.30	3.81	2.40	14.61	-0.41	1.03
100	150	1.35	1.40	2.41	2.25	3.04	-0.56	0.42
140	103	1.23	1.27	1.14	2.09	2.58	-0.72	0.63
200	73	1.01	1.04	0.09	1.94	1.96	-0.87	0.77
270	53	0.06	0.06	0.03	1.79	0.11	-1.02	0.06
筛底	37	0.03	0.03	0.00	1.65	0.05	-1.16	0.04
总 和		96.71	100.00			271.86		
粒度, DgW		647		表面积 (cm ²)/g		85.9		

图 6 豆粕样品粒度分布



粒度与淀粉糊化、颗粒持久力、颗粒水稳定度以及动物生长密切相关。Pal ani swamy 和 Ali (1991) 试验表明, 将饲料原料的粒度降为 500, 420, 300, 250, 210 和 50 μm , 以 210 μm 颗粒的水稳定度最强。印度白虾 *Penaeus indicus* 用原料粒度为 210 μm 的饲料喂养时, 生长速度最快, FCR 和消化吸收都最佳。Obal do 等 (1998) 将虾饲料的原料粒度从 603 μm 降为 586、521、408、272、124 和 69 μm 进行试验得出, 当粒度为 124 μm 时, 颗粒持久力、颗粒水稳定度、淀粉糊化度以及虾的增重全都提高 (分别示于图 7、8、9、10)。Mavromichalis 等 (1998) 报道, 获得哺乳仔猪和肥育猪最佳生长表现的小麦粒度分别为 600 μm 和 400 μm (图 11)。

图 7 粒度对虾饲料颗粒持久力指标的影响(Obal do 等, 1998)

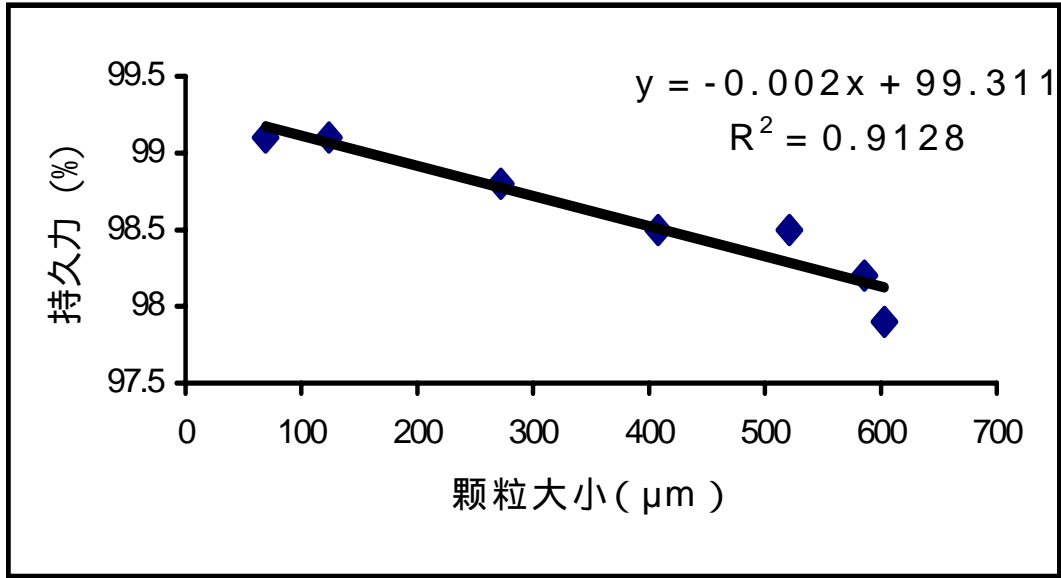


图 8 粒度对虾饲料颗粒水稳定度指标的影响(Obal do 等, 1998)

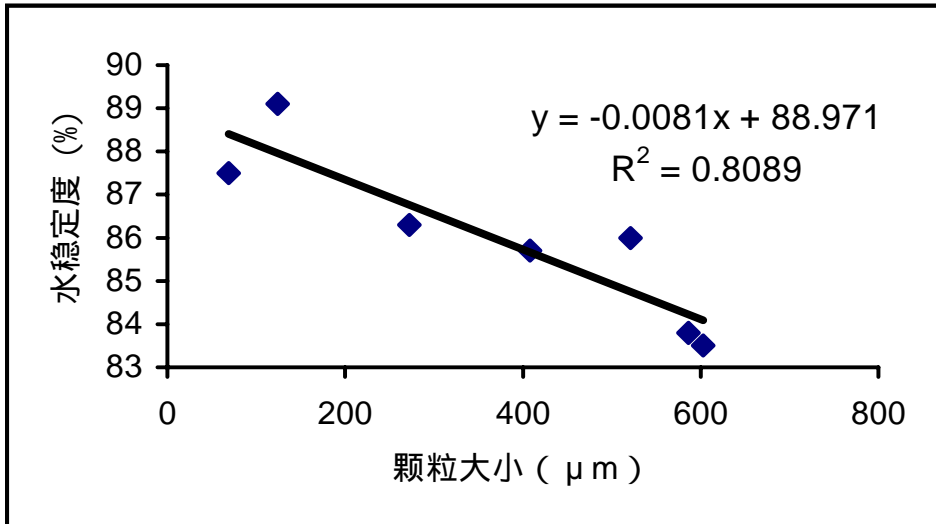


图 9 粒度对虾饲料淀粉糊化度的影响(Obal do 等, 1998)

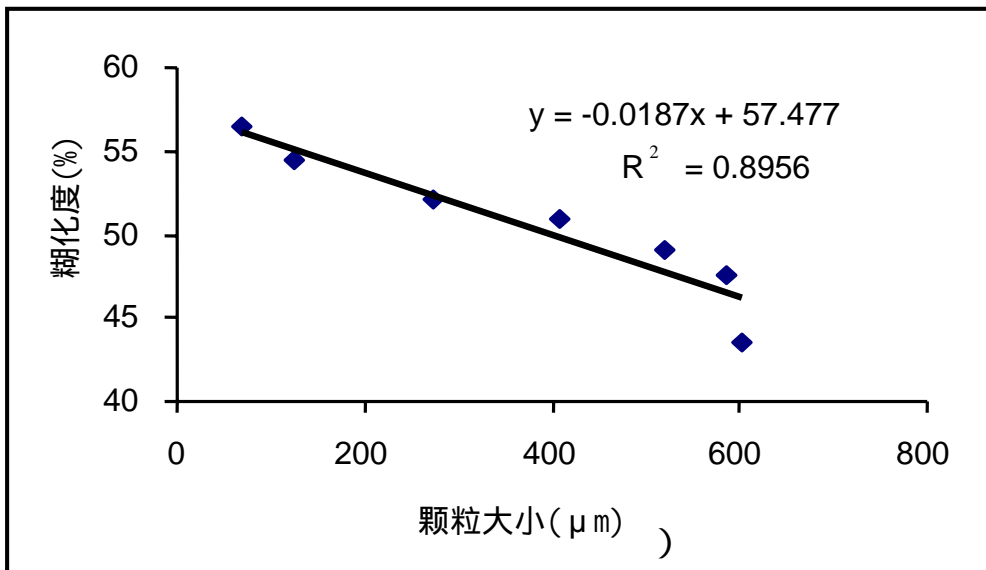


图10 粒度对虾增重的影响(Obal do 等, 1998)

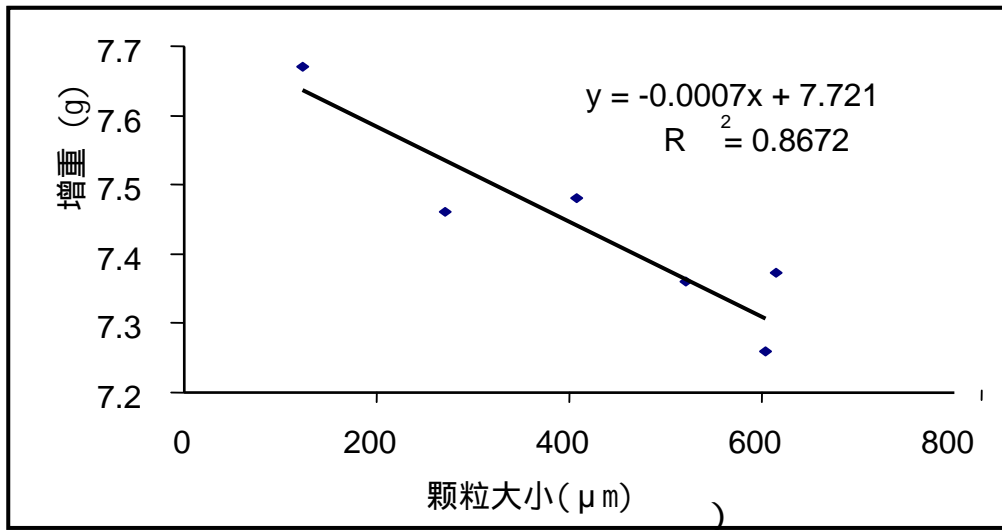
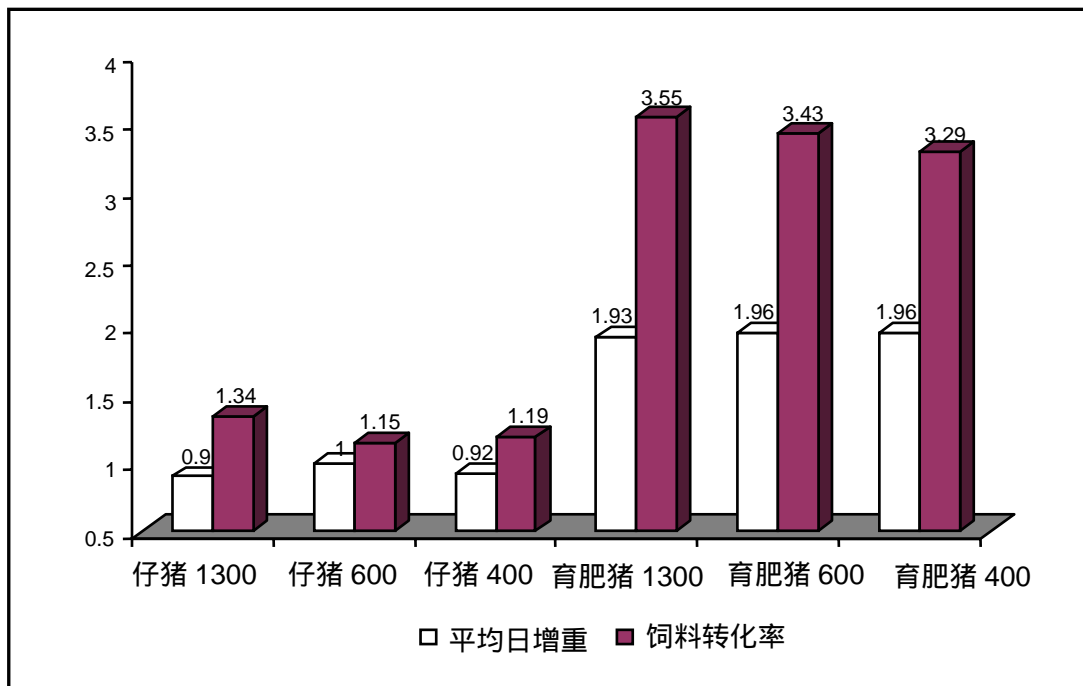


图11 粒度对哺乳仔猪和肥育猪生长的影响(Mavromichalis 等, 1998)



三、淀粉糊化度

淀粉糊化度或熟化度是指饲料原料或全价饲料中淀粉糊化的百分率。淀粉糊化后，其结晶态和折射消失，淀粉粒膨胀，溶剂和反应物因而得以进入淀粉分子。有几个可用来测定淀粉糊化度的方法，详见附录 B (Chiang 和 Johnson, 1977)。另一个词，破损淀粉，借用于制粉工业，原指碾磨后全麦粉中“糊化”的淀粉，饲料工业中，破损淀粉指粉碎后原料中“糊化”的淀粉。但在粉碎过程中并不给物料加水，所以淀粉只能破碎而不能“糊化”。在通过制粒机、膨胀机或挤压机加工饲料时，蒸汽（热和水）注入物料，物料中的淀粉才会糊化。一种用来测试淀粉糊化度的装置示于图 12。

图 12 一种用于测试淀粉糊化度的装置



淀粉糊化度与颗粒持久力和动物生长有相关关系。Traylor 等 (1998)发现，提高玉米为主的饲料中的淀粉糊化度，使肥育猪饲料的颗粒持久力加大(图 13)。Hongtrakul 等 (1997) 报道了一个 18 天试验的结果，断奶仔猪 (6.8 kg, 21 日龄) 的日粮分别含糊化玉米 14.5、38.7、52.7、64.4、89.3%，其 ADG 和 FCR 分别为 0.35、0.32、0.31、0.30、0.34 kg 和 1.35、1.37、1.41、1.35、1.37。这说明淀粉糊化度对断奶仔猪生长的影响是不规则的，但干物质、氮和总能的表观消化率在淀粉糊化度为 64.4% 时最佳 (图 14)。

关于淀粉糊化度与颗粒持久力的关系存在一些误解。许多人认为，颗粒持久力上升的原因在于淀粉糊化度的提高。这只是部分原因，事实上，许多因素都影响颗粒的持久力，例如，蛋白类型就对颗粒持久力和水稳定度起重要作用。小麦面筋是一种天然的粘合剂，含有面筋的饲料，

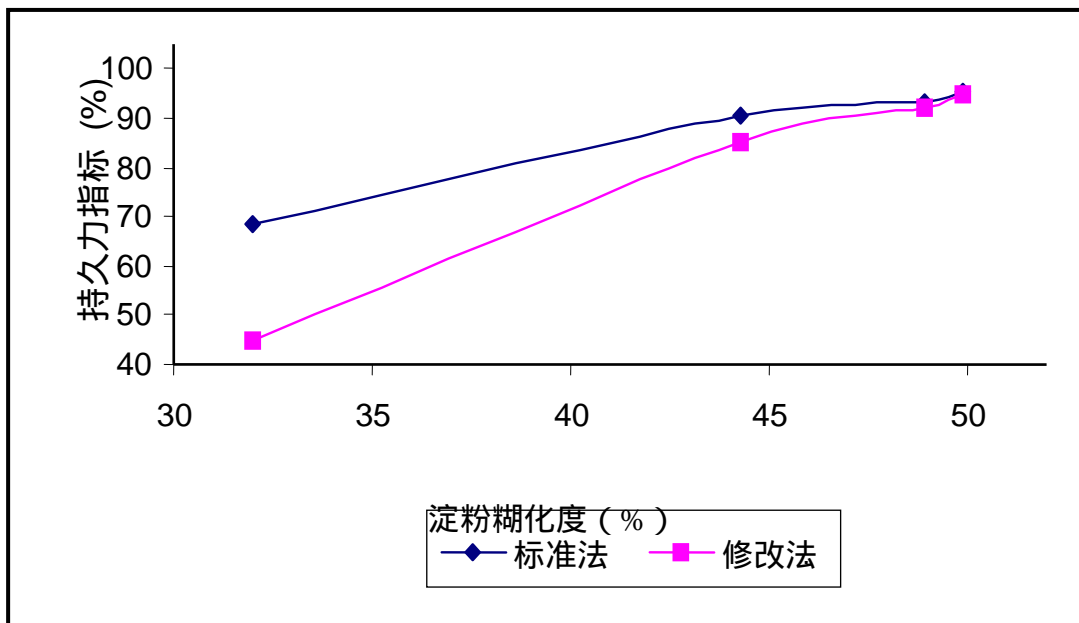


图 14 挤压玉米的淀粉糊化度对哺乳仔猪生长的影响(Hongtrakul 等, 1997)

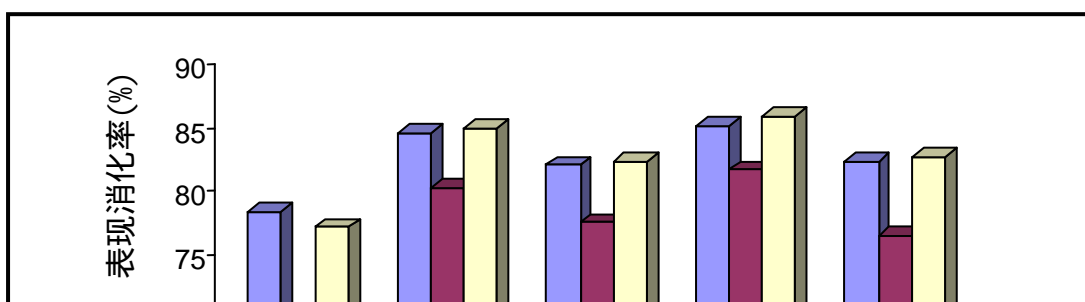
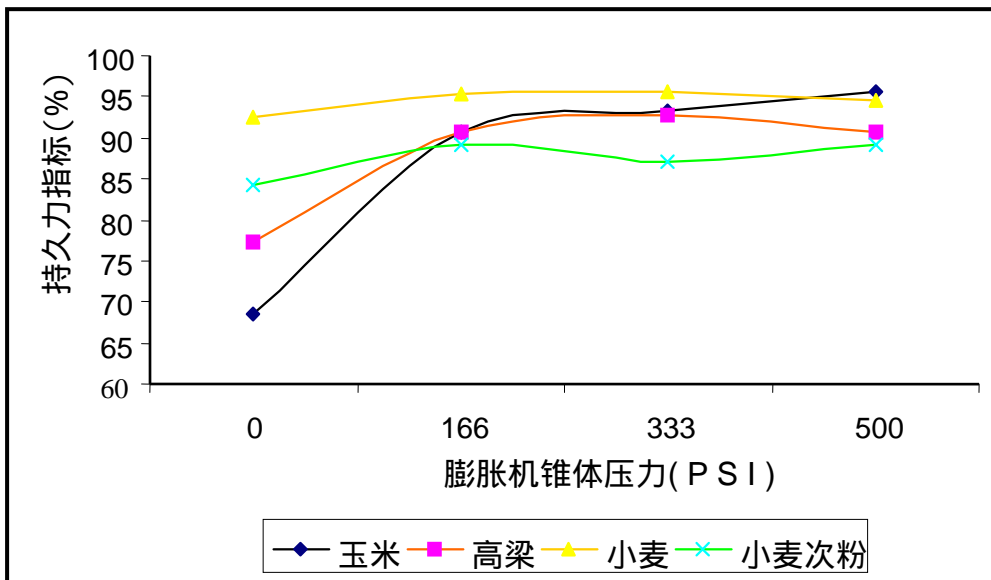
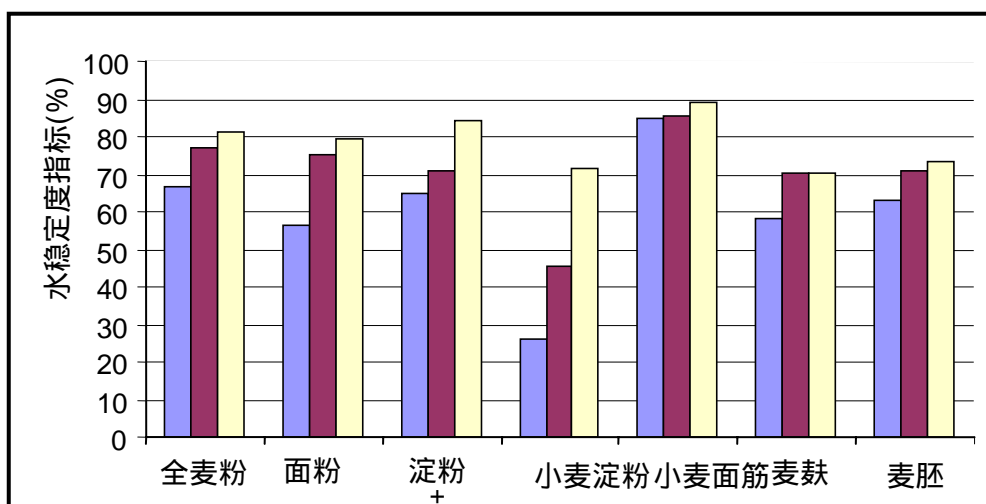


图 15 膨胀机锥体压力对用玉米、高粱、小麦和小麦次粉制作的肥育猪颗粒饲料持久力指标的影响 (Traylor 等, 1998)



颗粒持久力明显提高。图 15 显示一种用玉米、高粱、小麦和小麦次粉制作的猪饲料的颗粒持久力，它清楚地表明，原料（蛋白）类型也会影响颗粒持久力；以小麦为主的猪饲料所含的面筋粘性最强。Cheng (2000) 比较过几种含不同原料的虾颗粒饲料的水稳定度指标，即分别含有全麦粉、面粉、小麦淀粉加小麦面筋、小麦淀粉、小麦面筋、麦麸、麦胚，发现含小麦面筋的虾饲料水稳定性最强（图 16）。

图 16 用小麦及小麦产品制作的虾饲料在 42°C 和 3 种不同水分条件下用绞肉机加工所得的水稳定度指标（浸水 1h）



四、水稳定度指标

颗粒的水稳定度指标(WSI)现已用于虾饲料的质量管理。因为虾是缓慢而间歇取食的,所以要求虾饲料物理性质稳定,粘合牢固,能在水中停留不散的时间比大多数鱼饲料更长。高度耐水饲料能减少养分流失并使颗粒保持合格的物理状态,从而减少水污染并改进饲料转化率(Meyers等,1972)。为使虾饲料能在水中停留数小时,必须让饲料原料牢固粘合。通常使用粘合剂,诸如膨润土、羧甲基纤维、纤维素衍生物、二十四磺酸盐(Lignosulfonates),以改善用于家畜和鱼的颗粒饲料质量,但都不足以获得水稳定度合格的虾颗粒饲料(Akiyama等,1992),而且对于虾都没有营养价值。全麦粉、小麦粉和小麦面筋是良好的粘合剂,而且确能给虾提供养分。

除了粘合剂,另外还有一些因素能影响虾饲料的水稳定度,包括:原料特性,如粒度,淀粉、脂类及液体含量;加工条件,如在搅拌机内的物料水分,搅拌时间,搅拌均匀度,加工水温和时间,制粒和烘干的温度和时间;制粒机配置,如模孔尺寸和环模厚度;供水情况,如水流速度,水温,水中气流速度以及水的卫生状况;虾的数量;以及饲料浸水的时间长短。

早期Wood等(1954)研究鳟鱼和鲤鱼饲料时,涉及改善颗粒水稳定度的方法。他们的工作以及Combs and Burrows(1958)的研究都考查过胍尔豆胶和羧甲基纤维的粘合性能。Hepher(1969)研究过小麦面筋的粘合性。前后多人研究过各种养分的丢失,如维生素(Goldblatt等,1978,1980;Slinger等,1978);氨基酸(Yamada and Yone,1985);矿物质(Goldblatt等,1978);干物质(Forster,1972;Balazs等,1973;Farmanfarmanian等,1982;Taechanuruk and Stickney,1982;Hashim and Saat,1992);以及蛋白、灰分、脂类和碳水化合物(Cuzon等,1982)。这些研究都对改善水产饲料的颗粒水稳定度作出了重要贡献。附录C描述了一个测试水稳定度指标的简单方法。

Cheng等(2001a;2002a)应用这个方法研究得出制作虾颗粒饲料的最佳水分、加工水温和浸水时间对水稳定度的影响。他们还用实验室绞肉机制作了用于研究的最佳WSI虾颗粒饲料(Cheng等,2002b,2002c)。Bortone等(1995a)证实,颗粒的水稳定度指标与下列指标呈正相关,即FCR($r=0.88, P<0.01$),淀粉糊化度($r=0.88, P<0.05$),白对虾(*Penaeus vannamei*)的增重($r=0.82, P<0.05$)。Bortone等(1995b)进一步得出,颗粒水稳定度指标与FCR呈正相关($r=0.74, P=0.02$),与淀粉糊化度呈正相关($r=0.86, P=0.002$)。美国夏威夷海洋研究所建立了一个测定虾颗粒饲料的水稳定度的修订方法。测定虾颗粒饲料的水稳定度的装置见图17。

图17 一种测试虾饲料颗粒水稳定度指标的修装置



五、总磷和植酸磷

动物体的灰分 70%以上是由钙和磷组成(Maynard and Loosli, 1962)。磷在骨骼形成和营养代谢中起着重要作用，磷缺乏症，如幼畜的佝偻病可致动物死亡。因此，制定动物饲料配方必须考虑有适量的磷以满足动物需要。还必须有磷的实验室分析，以保证饲料的含磷量与饲料包装袋上标明的规格相符。测磷不仅对畜禽饲料重要，对水产饲料也同样重要。

水产养殖是世界上增长最快的产业之一。不过，由于体系的强化，水产养殖也受到环境保护更多的关注和节制。磷是一种危险的水域污染物，过量的磷排放到清洁水域中会使藻类和浮游生物生长，从而降低水溶的氧导致水污染(Miller 等, 1974; Beveridge, 1984; Boyd, 1990; Sugiura 等, 1999)。因此，减少磷向水域的排放对养殖业的持续发展至关重要。用鳟鱼和鲑鱼做试验得出的数据表明，在典型的商业饲养中，日粮的磷只有 20%左右留在鱼体中(Ketola, 1982; Phillips and Beveridge, 1986; Ackefors and Enell, 1990; Holby and Hall, 1991; Ketola and Harland, 1993)。这意味着大约 80%的日粮磷未被利用，而是以可溶态和粪便形式排放到水域中。现已了解，不留存鱼体内的磷的数量取决于鱼饲料中磷的含量和磷来源的生物利用率。

鱼粉是鱼饲料的一种主要原料。但是，鱼粉含有相当多的磷和其它矿物质，而很多种鱼，包括鳟鱼和鲑鱼，对磷的利用率是较低的(NRC 1993; Sugiura 等, 1998)。目前鱼粉供应在世界范围未见增长，这完全取决于捕鱼产量。秘鲁和智利两个国家生产的鱼粉大约占全球鱼粉产量的三分之二。但是，据渔业研究结果(Hardy, 1995)，在尼尔诺年份，海洋变暖使得鱼群迁离海岸，这些国家的鱼粉产量可周期性地波动 20%以上。再者，鱼粉往往比大多数油粕如豆粕、谷物及其副产品，价格更高。因此，使用豆粕或谷物及其副产品对于制作经济而有利于环保的鱼饲料就更加重要了。但是，豆粕或谷物及其副产品中的总磷，大约三分之二以植酸磷存在，而鱼对植酸磷的生物利用率是非常有限的(Ogino 等, 1979; NRC, 1993; Raboy, 1997)。Sugiura 等 (1998)报道，虹鳟鱼对豆粕中磷的利用率是 22%。然而，Riche and Brown (1996)得出，虹鳟鱼对豆粕中的磷根本不能利用。由此可见测磷的重要性了。测定总磷和植酸磷的简化法分别列入附录 D 和附录 E。

尽管虹鳟鱼对豆粕中的磷利用率低，但这实际上取决于豆粕来源和鱼的大小。Cheng 等

(2002d; 2002e)最近发现,虹鳟鱼(体重 223.4g)对豆粕中磷的利用率为 63.2%。Cheng and Hardy (2002d)还进一步发现,挤压加工对豆粕中磷和氨基酸的利用率均无明显影响(表 2)。这结果说明,挤压加工对豆粕的磷和氨基酸不会造成明显损害。

表 2 豆粕的氨基酸组成(% ,干基)和虹鳟鱼对豆粕中氨基酸的利用率(%)

项 目	氨基酸组成		氨基酸利用率	
	豆粕	挤压豆粕	豆粕	挤压豆粕
必需氨基酸				
精氨酸	3.27	3.29	99.5	99.5
组氨酸	1.28	1.30	99.2	99.1
异亮氨酸	2.14	2.29	98.6	98.6
亮氨酸	4.41	4.61	98.9	98.7
赖氨酸	2.80	2.80	99.4	99.4
蛋氨酸	0.76	0.76	99.5	99.3
苯丙氨酸	2.54	2.60	99.1	98.9
苏氨酸	1.88	1.92	98.1	98.3
色氨酸	0.56	0.70	98.2	98.4
缬氨酸	2.25	2.39	99.1	99.0

(续)

项 目	氨基酸组成		氨基酸利用率	
	豆粕	挤压豆粕	豆粕	挤压豆粕
非必需氨基酸				
丙氨酸	2.47	2.53	98.7	98.4
天冬氨酸	5.22	5.29	98.8	98.7
胱氨酸	0.79	0.82	97.2	97.2
谷氨酸	9.22	9.67	99.4	99.3
甘氨酸	1.92	1.94	98.9	98.9
脯氨酸	2.72	2.82	99.2	99.1
丝氨酸	2.25	2.43	98.8	98.8
酪氨酸	1.79	1.85	98.3	98.4

来源: Cheng and Hardy, 2002

提高豆粕中磷的利用率的另一途经是给豆粕配制的动物饲料施用植酸酶。植酸酶是专一水解植酸的酶。许多动物的消化道都有这种酶,但通常数量很少,不足以将饲料中的植酸明显分解(Bitar and Reinhold, 1972)。给含有豆粕或谷物及其加工副产品的鱼饲料施用植酸酶,不仅可降低鱼饲料的含磷量,还能减少向水域排放磷的数量。现在已有可添加到鱼和其它动物饲料中的商品植酸酶出售。不过植酸酶的效力可能各有不同,这取决于酶的来源和饲料配方。Cheng and Hardy (2002d)给干挤压全脂大豆制作的虹鳟鱼饲料施用植酸酶,得出植酸酶的最佳剂量大致是 400 FTU/kg 饲料(表 3,表 4)。

表 3 虹鳟鱼对大豆中的干物质、粗蛋白和矿物质的表观消化率

(%,平均值 ± 标准差),带不同字母的同行平均值之间差异显著 (P < 0.05)

项 目	未加工	添加植酸酶 (FTU/kg 饲料) 的挤压大豆	压榨
-----	-----	-------------------------	----

	大豆	0	200	400	600	800	1000	大豆	P 值
干物质	74.5 ±1.6a	73.8 ±8.2a	73.6 ±3.6a	75.7 ±3.7a	70.2 ±3.5a	82.0 ±1.5a	74.2 ±4.3a	75.9 ±3.3a	0.3829
粗蛋白	88.0 ±0.4a	97.2 ±1.1b	96.8 ±0.6b	96.0 ±2.3b	95.4 ±1.8b	97.8 ±0.4b	96.6 ±0.2b	97.9 ±0.2b	0.0005
镁	68.5 ±0.4a	59.6 ±2.7b	74.7 ±1.2c	80.0 ±0.3d	79.5 ±1.5d	83.4 ±0.5d	81.7 ±0.0d	68.0 ±3.3a	<0.0001
硫	93.1 ±0.4a	97.0 ±0.7b	96.2 ±0.1b	96.8 ±0.0b	93.2 ±0.2b	97.2 ±0.0b	96.0 ±0.3b	97.3 ±0.2b	<0.0001
总磷	21.2 ±0.1a	12.5 ±4.8b	81.3 ±3.4c	92.2 ±0.0d	89.7 ±0.3d	95.2 ±0.6d	93.9 ±0.3d	31.7 ±6.5e	<0.0001
植酸磷	29.9 ±1.2a	19.6 ±6.1a	60.9 ±1.9b	87.2 ±1.3c	93.8 ±1.2c	93.7 ±4.7c	93.8 ±1.4c	60.6 ±0.2b	<0.0001
铜	89.9 ±0.2a	93.3 ±1.2a	92.1 ±1.6a	93.2 ±0.1a	92.1 ±0.4a	93.6 ±0.1a	93.4 ±0.2a	92.7 ±2.7a	0.1767
锰	20.3 ±0.4a	13.5 ±1.2a	46.2 ±2.9b	76.3 ±6.1c	78.1 ±0.4c	81.2 ±0.8c	81.4 ±1.2c	16.8 ±0.9a	<0.0001
锌	14.6 ±5.7a	7.2 ±0.3a	48.4 ±3.3b	85.1 ±13.0c	73.7 ±2.1c	78.8 ±0.5c	80.9 ±3.3c	15.7 ±5.6a	<0.0001

来源：Cheng and Hardy, 2002

表 4 虹鳟鱼对大豆中的氨基酸的表观消化率（%，平均值 ± 标准差），带不同字母的同行平均值之间差异显著（P < 0.05）

氨基酸	未加工大豆	添加植酸酶 (FTU/kg 饲料) 的挤压大豆						压榨大豆	P 值
		0	200	400	600	800	1000		
精氨酸	88.9 ± 1.0a	98.9 ± 0.2b	98.8 ± 0.0b	99.1 ± 0.2b	96.5 ± 0.5b	99.5 ± 0.0b	98.2 ± 0.1b	99.5 ± 0.0b	<0.0001
组氨酸	91.3 ± 0.3a	97.8 ± 0.2b	98.0 ± 0.1b	98.1 ± 0.3b	93.3 ± 0.6c	98.6 ± 0.1b	96.7 ± 0.3b	98.4 ± 0.2b	<0.0001
异亮氨酸	84.4 ± 0.9a	96.3 ± 0.3b	96.2 ± 0.6b	97.3 ± 0.5b	91.6 ± 0.4c	97.0 ± 1.1b	94.6 ± 0.5b	97.1 ± 0.2b	<0.0001
亮氨酸	85.4 ± 1.1a	97.7 ± 0.3b	97.6 ± 0.0b	98.3 ± 0.1b	92.6 ± 0.7c	98.5 ± 0.1b	96.0 ± 0.1d	98.5 ± 0.1b	<0.0001
赖氨酸	93.4 ± 0.5a	98.0 ± 0.2b	98.4 ± 0.2b	98.7 ± 0.0b	94.3 ± 0.7c	99.1 ± 0.1b	97.5 ± 0.1b	98.9 ± 0.1b	<0.0001
蛋氨酸	95.9 ± 0.1a	98.5 ± 0.0b	99.1 ± 0.0b	99.1 ± 0.3b	95.2 ± 0.3a	99.4 ± 0.2b	97.9 ± 0.1b	99.4 ± 0.1b	<0.0001
苯丙氨酸	84.4 ± 1.2a	97.7 ± 0.3b	97.7 ± 0.1b	98.1 ± 0.2b	93.1 ± 0.8c	98.7 ± 0.0b	96.5 ± 0.2b	98.7 ± 0.1b	<0.0001
苏氨酸	86.5 ± 1.2a	96.1 ± 1.0b	96.4 ± 0.4b	96.6 ± 0.4b	91.6 ± 1.3c	98.0 ± 0.3d	94.6 ± 0.3b	97.4 ± 0.4d	<0.0001
色氨酸	93.3 ± 0.2a	96.7 ± 0.8b	98.1 ± 0.6b	97.8 ± 0.1b	93.8 ± 0.3c	97.8 ± 0.2b	96.7 ± 0.7b	98.7 ± 0.4b	<0.0001

缬氨酸	87.3 ± 0.6a	97.6 ± 0.0b	97.8 ± 0.7b	98.4 ± 0.1b	92.6 ± 0.7c	98.4 ± 0.2b	96.1 ± 0.2d	98.6 ± 0.0b	<0.0001
丙氨酸	86.7 ± 1.2a	97.3 ± 0.5b	97.4 ± 0.1b	98.1 ± 0.2b	94.0 ± 1.1c	98.6 ± 0.0d	96.5 ± 0.1b	98.7 ± 0.2d	<0.0001
天冬氨酸	81.9 ± 1.4a	97.6 ± 0.4b	97.4 ± 0.0b	98.2 ± 0.3c	93.3 ± 0.9d	98.9 ± 0.1c	96.2 ± 0.2b	98.9 ± 0.1c	<0.0001
胱氨酸	77.2 ± 3.1a	96.0 ± 3.1b	97.4 ± 2.8b	95.1 ± 3.5b	90.1 ± 2.4b	98.1 ± 2.1b	95.4 ± 3.1b	97.8 ± 3.2b	0.0012
谷氨酸	89.8 ± 0.5a	98.2 ± 0.1b	98.3 ± 0.1b	98.8± 0.0bd	93.8 ± 0.6c	99.2 ± 0.0d	96.8 ± 0.1e	99.1 ± 0.0d	<0.0001
甘氨酸	91.4 ± 0.7a	98.3 ± 0.2b	98.4 ± 0.0b	98.6 ± 0.1b	96.5 ± 0.5c	99.0 ± 0.0d	97.7 ± 0.1c	98.9 ± 0.1d	<0.0001
脯氨酸	92.7 ± 0.5a	98.1 ± 0.2b	98.3 ± 0.0b	98.5 ± 0.1b	93.4 ± 0.8a	98.9 ± 0.0b	96.4 ± 0.2c	98.5 ± 0.1b	<0.0001
丝氨酸	85.9 ± 1.7a	97.2 ± 0.8b	97.6 ± 0.6b	97.6 ± 0.5b	91.8 ± 1.4c	98.5 ± 0.5b	95.4 ± 0.2b	98.2 ± 0.3b	<0.0001
酪氨酸	90.1 ± 0.9a	95.0 ± 0.6b	95.9 ± 2.9b	96.0 ± 1.3b	91.0 ± 0.6a	96.1 ± 0.9b	93.4 ± 0.6a	95.6 ± 0.1b	0.0064

来源：Cheng and Hardy, 2002

表5 测试颗粒饲料（或粗屑饲料）持久力指标的筛孔尺寸

颗粒或粗屑大小		要求的筛孔尺寸	
分数 (in)	小数 (cm)	编号 [*]	小数 (cm)
所有粗屑		No. 12	0.1679
颗粒			
3/32	0.2383	No.10	0.1999
1/18	0.3175	No.7	0.2819
9/64	0.3571	No.6	0.3353
5/32	0.3970	No.6	0.3353
3/16	0.4763	No.5	0.3988
13/64	0.5159	No.4	0.4750
1/4	0.6350	No.3 1/2	0.5664
5/16	0.7938	0.263	0.6731
3/8	0.9525	5/16	0.7938
1/2	1.2700	7/16	1.1113
5/8	1.5875	0.530	1.3462
3/4	1.9050	5/8	1.5875
7/8	2.2225	3/4	1.9050
1	2.5400	7/8	2.2225

美国测试和材料协会，ASTM E11-61，用于测试的金属丝筛布规格。

附录A：颗粒持久力指标

1. 设备：测定颗粒或粗屑的持久力，是将试样放进一个防尘筒中以 50rpm 转速翻滚 10 分钟。这装置沿着一根轴旋转，轴垂直于 30.5 cm 的一侧，固定在其中心点。一个 5.1 × 22.9cm 的平板对称地固定在从 22.9cm 的一侧到 30.5 × 30.5cm 一侧的对角线上。可在其一侧设一个防尘的门。尽量减少凸物（如铆钉、螺钉），凸物外形要圆润（见图 1）。

2. 筛理：将样品放在金属丝筛布上过筛测定细粉，筛孔刚小于标定的颗粒直径。表 5 列有对各种直径颗粒和粗屑的推荐筛号。

3. 测试规程：将待测的颗粒或粗屑样品用合适的筛子清理除去细粉。如测试的颗粒直径为 1.27cm 或更大，选出长度在 3.2 ~ 3.8cm 范围的颗粒。将 500g 样品放进装置中翻滚 10 min，取出样品，过筛，计算完整颗粒或粗屑百分率。颗粒（或粗屑）持久力指（PDI）标算式如下：

$$PDI (\%) = \frac{\text{颗粒（或粗屑）翻滚前重量}}{\text{颗粒（或粗屑）翻滚后重量}} \times 100$$

附录 B：淀粉糊化度 (Chiang and Johnson, 1977)

试剂：

1. 联甲苯胺 (o-Toluidine) 试剂：溶解 1.5g 硫脲于 940ml 冰醋酸，加 60ml 联甲苯胺，存于有色玻璃瓶中。

2. 乙酸钠缓冲液：溶解 4.1g 无水乙酸钠于 1L 蒸馏水，用乙酸调 pH 至 4.5。

3. 葡糖淀粉酶溶液：将 2g 根霉葡糖淀粉酶（目录号 No. A-7255，Sigma Chemical Co. 供货）分散于 250ml 乙酸缓冲液，用玻璃棉滤纸（Whatman No. GF/A）迅速过滤，限 2 小时内使用。葡糖淀粉酶的特异活性是在 pH4.5 温度 40 °C 下生成 28.4 μmol 葡萄糖/min/mg 蛋白。

操作规程：

1. 制备淀粉部分糊化的样品。将 20mg 样品分散于 50ml 离心管中的 5ml 蒸馏水中。

2. 制备淀粉完全糊化的样品。将 20mg 样品分散于 50ml 离心管中的 3ml 蒸馏水和 1ml 1N NaOH 中。5 分钟后加 1ml 1N HCl。

3. 葡糖淀粉酶水解和测定葡萄糖。每个离心管加 25ml 葡糖淀粉酶溶液，40 °C 保温 30min。加 2ml 25% 的三氯乙酸钝化葡糖淀粉酶（并使该酶和其它蛋白沉淀），以 16,000 × g 离心 5min。

4. 取 0.5ml 上清液于试管中，加入 4.5ml 联甲苯胺(o-toluidine)试剂，将试管置沸水中 10min，用冷水冷却，加 5ml 冰醋酸，测定在 630nm 的吸收率。

按下式计算淀粉糊化度：

$$Y = 100 * (B - K) / (A - K); \quad K = A * (C - B) / (A - 2B + C);$$

其中，

A = 全糊化淀粉的吸收率；

B = 部分糊化淀粉和经过 30min 酶水解的完整淀粉混合物的吸收率；

C = 部分糊化淀粉和经过 60min 酶水解的完整淀粉混合物的吸收率；

K = 1% 完整淀粉经 30min 水解后的吸收率。这对每种淀粉或特定处理的淀粉是一个

常数，常规分析中只需测定一次。

这规程也可用来计算总淀粉%：用葡萄糖溶液（720 μg/ml）制定标准曲线。按前法第2和第3步骤处理样品，根据标准曲线读取葡萄糖浓度。按下式计算淀粉含量：

$$\text{淀粉总量\%} = \text{葡萄糖} \times 0.9 \times 100 / \text{样品重（干基）}$$

附录 C：水稳定度指标（Cheng 等，2002）

1. 2g 颗粒饲料放进 U. S. #12 不锈钢圆筒测试篮（直径 5cm，高 1.5cm）中，加盖以防滤浸时试样外溢。

2. 3 份颗粒饲料重复样品分别放进 52L 养鱼缸中，在下列水质参数和近似养殖水流条件下分别滤浸 1h、2h、4h（水含盐度 34 ppt，水温 26 °C，气流 180L/h，水流 52L/h）。

3. 滤浸后，将测试篮仔细地浸到蒸馏水中三次以除盐，去掉盖子，将滤浸后的颗粒放烘箱内按预定温度和时间（135°C，4h）烘干。最初的颗粒（未滤浸），按 AOAC 标准方法（AOAC，1990）在 135°C 烘干 2h。

4. 计算滤浸颗粒和最初颗粒的干物重。水稳定度指标为滤浸颗粒干物重与最初颗粒干物重之比乘 100。

附录 D：总 磷

钒钼磷酸法（标准方法 15 版，1981。APHA 等）：

将 0.5g 饲料（0.1g 粪便）在 550 °C 过夜灰化，称取灰分量；加 1ml 浓缩 HCl 和 1ml 浓缩 HNO₃，室温放置 6h；以酚酞作指示剂，用 NaOH 中和样品溶液，定容至 100ml，加 HCl 使溶液呈弱酸性。

试剂：

溶液 A：1.25g 钼酸铵((NH₄)₆MO₇O₂₄·4H₂O)/15ml 蒸馏水；

溶液 B：0.0625 g 偏钒酸铵(NH₄)VO₃；

冷却，加 16.5ml 浓缩 HCl，冷却至室温；

将溶液 A 注入溶液 B，混合，稀释至 50ml。

操作规程：

1ml 样品溶液（0.05-1.0mg P）+ 1ml 钒酸盐钼酸盐试剂；

混合；

读取在 400-490nm 的吸收率（10min - 几天都稳定）

P 浓度	读吸收率所在分光度
1-5ppm	400nm
2-10ppm	420nm
4-18ppm	470nm

$$\text{总 P (\%)} = \frac{\text{溶液 P 浓度} \times \text{稀释系数}}{\text{所用样品量}}$$

附录 E：植酸磷(Latta and Eskin, 1980)

提取：

20ml 2.4%HCl (0.65N) (54ml HCl / L 蒸馏水)；

50ml 离心管，植物材料（1g），室温下摇动 3h；

离心，稀释，洗脱，显色：

1.5ml +0.2ml CHCl_3 置 MC 管中，摇动 5min，以 12000rpm 离心 5 min；

0.5ml (饲料样品 1.0ml) 上清液用蒸馏水稀释至 10ml；

先用 15ml 0.7M NaCl 淋洗阴离子交换柱；

用大约 15ml 蒸馏水再淋洗一遍，废弃洗脱液；

让 10ml 样品溶液通过 0.5g (6 cm 柱内) 阴离子交换柱 (淋洗 3 份样品后废弃离子交换树脂)；

用 15ml 0.1M NaCl (5.85g NaCl/L, 2.925g/500ml) 洗脱，收集 (25ml 洗脱液含有酸溶 P，用其它方法分析)；

换管，加 15ml 0.7M NaCl (40.95 g NaCl/L, 20.475g/500ml) 洗脱，收集 (这一组份含植酸)；

3ml 整分+1ml 威德试剂 (0.03% $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + 0.3% 磺基水杨酸)；混合 (溶液混浊时离心 10min)；读取在 500nm 的吸收率；

标准：5-40 μg 植酸盐/ml 0.7M NaCl；1ml 标准液+0.333ml 威德试剂；混合，离心，读取在 500nm 的吸收率。

所用标准：十二烷基植酸钠 $\text{C}_{12}\text{H}_{21}\text{O}_4\text{P}_6\text{Na}_{12}$, FW 923.8, 纯度 99%，含水 12%。

计算：

$$P(\text{饲料中}\%) = \frac{\text{溶液的植酸盐浓度} \times \text{稀释系数} \times \text{植酸盐含 P 量}}{\text{样品重量}}$$

参考文献

- Ackefors, H. and M. Enell. 1990.** Discharge of nutrients from Swedish fish farming to adjacent sea areas. *Ambio*. 19: 28-35.
- Akiyama, D.M., W.G. Dominy, and A.L. Lawrence. 1992.** Penaeid shrimp nutrition. in: A. Fast and L.J. Lester, eds. *Development in Aquaculture and Fisheries Science*. Vol. 23. *Marine Shrimp Culture: Principles and Practices*. Elsevier Science Publisher. Amsterdam, The Netherlands. pp. 535-568.
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 1990.** Animal Feed. In: K. Helrich, ed. *Official Methods of Analysis*. AOAC, Inc., Arlington, Virginia. P. 69.
- Balazs, G.H., E. Ross, and C.C. Brooks. 1973.** Preliminary studies on the preparation and feeding of crustacean diets. *Aquaculture* 2: 369-377.
- Beveridge, M.C.M. 1984.** Cage and pen fish farming. Carrying capacity models and environmental impact. *FAO Fisheries Technical Paper No.255*. FAO, Rome, Italy.
- Bitar, K. & Reinhold, J. G. (1972)** Phytase and alkaline phosphatase activities in intestinal mucosa of rat, chicken, calf, and man. *Biochim. Biophys. Acta*. 268: 442-452.
- Bortone, E.J., K.C. Behnke, and W.G. Dominy. 1995a.** Effects of mixtures of soybean meal and high protein whole wheat flour and pelleting processing conditions on growth of juvenile marine shrimp (*Penaeus vannamei*) fed isonitrogenous diets. U.S. Wheat Associates, Singapore.
- Bortone, E.J., K.C. Behnke, and W.G. Dominy. 1995b.** Effects of the mixtures of soybean meal, whole wheat flour, and whole wheat flour plus wheat gluten and pelleting processing conditions on the growth of juvenile marine shrimp (*Penaeus vannamei*) fed isonitrogenous diets. U.S. Wheat Associates, Singapore.
- Boyd, C.E. 1990.** Water quality in ponds for aquaculture. Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University, Auburn, AL.

- Cheng, Z.J. 2000.** Effects of poultry by-product and feather meals on biological performance of Pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*). Ph.D dissertation. Kansas State University, Manhattan, Kansas, USA.
- Cheng, Z.J., R.W. Hardy, W.G. Dominy, and K.C. Behnke. 2001a.** Aquafeed Manufacturing Technology. Published by American Soybean Association and United Soybean Board. 26 pages.
- Cheng, Z.J., R.W. Hardy, W.G. Dominy, and K.C. Behnke. 2001b.** Extrusion Technology and its Application in the Feed Industry. Published by American Soybean Association and United Soybean Board. 38 pages.
- Cheng, Z.J., K.C. Behnke, and W.G. Dominy. 2001c.** Pulverizing and/or defatting effects on electrical energy consumption and particle size and moisture levels of poultry by-products. Journal of Applied Aquaculture. 11 (4):67-73.
- Cheng, Z.J., K.C. Behnke, and W.G. Dominy. 2002a.** Effect of moisture content, processing water temperature, and immersion time on water stability of pelleted shrimp diets. Journal of the Applied Aquaculture. 12(2): 79-89.
- Cheng, Z.J., K.C. Behnke, and W.G. Dominy. 2002b.** Effect of feather meal on growth and body composition of the juvenile Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). Journal of the Applied Aquaculture. 12(1):57-70.
- Cheng, Z.J., K.C. Behnke, and W.G. Dominy. 2002c.** Effect of poultry by-product meal as a substitute for fish meal in diets on growth and body composition of the juvenile Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). Journal of the Applied Aquaculture. 12(1):71-83.
- Cheng, Z.J. and R.W. Hardy. 2002d.** Effects of microbial phytase and extrusion processing on apparent digestibility coefficients of nutrients in soybeans for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). In: Final Report for BASF, Canada.
- Cheng, Z.J. and R.W. Hardy. 2002e.** 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*). Aquaculture Nutrition. 8:271-277.
- Chiang, B.Y. and J.A. Johnson. 1977.** Measurement of total and gelatinized starch by glucoamylase and o-Toluidone reagent. Cereal Chem. 54(3): 429-435.
- Combs, B.D., and R.E. Burrows. 1958.** Technical Bulletin. An evaluation of bound diets. Progressive Fish-Culturist 20: 124-128.
- Cuzon, G., M. Hew, D. Cognie, and P. Soletchnik. 1982.** Time lag effect of feeding on growth of juvenile shrimp *Penaeus japonicus* Bate. Aquaculture 29: 33-44.
- Farmanfarmaian, A., T. Lauterio, and M. Ibe. 1982.** Improvement of the stability of commercial feed pellets for the giant shrimp (*Macrobrachium rosenbergii*). Aquaculture 27: 29-41.
- Forster, J.R.M. 1972.** Studies on compounded diets for prawns. Proceedings of the World Mariculture Society 3: 389-402.
- Goldblatt, M.J., D.E. Conklin, and W.D. Brown. 1978.** Nutrient leaching from pelleted rations. Pages 1-11 in Proceedings of the World Symposium on Finfish Nutrition and Feed Technology. Hamburg 20-23 June, 1978.
- Goldblatt, M.J., D.E. Conklin, and W.D. Drown. 1980.** Nutrient leaching from coated crustacean rations. Aquaculture 19: 383-388.
- Hardy, R.W. 1995.** Current Issues in Salmonid Nutrition. In: Nutrition and Utilization Technology in Aquaculture, AOCS Press. Campaign. Illinois. pp 26-35.
- Hashim, R., and N.A.M. Saat. 1992.** The utilization of seaweed meals as binding agents in pelleted feeds for

snakehead (*Channa striatus*) fry and their effects on growth. *Aquaculture* 108: 299-308.

Hepher, B. 1969. The development and manufacture of carp pellet feed in Israel. *European Inland Fisheries Advisory Commission Technical Paper* 9: 43-47.

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

Hongtrakul, K., R.D. Goodband, K.C. Behnke, J.L. Nelssen, M.D. Takach, J.R. Bergstram, W.B. Nessmith, Jr., and I.H. Kim. 1997. Effects of starch gelatinization on weaning pig performance. *Swine Day 1997*. Kansas State University, Manhattan, Kansas, USA. Pp. 79-81.

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

Ketola, H.G. and B.F., Harland. 1993. Influence of phosphorus in rainbow trout diets on phosphorus discharges in effluent water. *Transactions of the American Fisheries Society.* 122: 1120-1126.

Latta, M. and M., Eskin. 1980. A simple and rapid colorimetric method for phytate determination. *J. Agri. Food Chem.* 28: 1313-1315.

Lanari, D., E., D'Agaro. And C. Turri. 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.

Mavromichalis, I., J.D. Hancock, G.A. Kennedy, R.H. Hines, J.M. DeRouchey, B.W. Senne, and S.P. Sorrell. 1998. Effects of enzyme supplementation and particle size of wheat-based diets on nursery and finishing pigs. *Swine Day 1998*. Kansas State University, Manhattan, Kansas, USA. Pp. 239-250.

Maynard, L.A. and J.K., Loosli. 1962. *Animal Nutrition*. McGraw-Hill, New York.

Meyers, S.P., D.P. Butler, and W.H. Hastings. 1972. Alginates as binders for crustacean rations. *Progressive Fish-Culturist* 34: 9-12.

Miller, W.E., T.E., Maloney and J.C., Greene. 1974. Algal productivity in 49 lake waters as determined by algal assays. *Water Res.* 8: 667-679.

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

Obaldo, L.G., W.G. Dominy, J.H. Terpstra, J.F. Cody, and K.C. Behnke. 1998. The impact of ingredient particle size on shrimp feed. *Journal of Applied Aquaculture* 8(4): 55-66.

Ogino, C., T. Takeuchi, H. Takeda and T. Watanabe. 1979. Availability of dietary phosphorus in carp and rainbow trout. *Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish.* 45: 1527-1532.

Palaniswamy, R., and S.A. Ali. 1991. The impact of particle size of ingredients in compound diets on pellet stability and performance in *Penaeus indicus* (H. Milne Edwards). *Journal of Aquaculture in the Tropics* 6:119-127.

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

Raboy, V. 1997. Accumulation and storage of phosphate and minerals. In: Larkins, B.A. & Vasil, I.K. (Eds.), *Cellular and Molecular Biology of Plant Seed Development*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 4: 441-447.

Riche, M. and P.B. Brown. 1996. Availability of phosphorus from feedstuffs fed to rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Aquaculture.* 142: 269-282.

Slinger, S.J., A. Razaque, and C.Y. Cho. 1978. Effect of feed processing and leaching on the losses of certain vitamins in fish diets. Pages 425-433 in *Proceedings of the World Symposium on Finfish Nutrition and Feed Technology*. Hamburg, Germany.

Stark, C.R., K.C. Behnke, J.D. Hancock, and R.H. Hines. 1993. Pellet quality affects growth performance of nursery and finishing pig. *Swine Day 1993*. Kansas State University, Manhattan, Kansas, USA. Pp. 67-70.

- Sugiura, S.H., F.M. Dong, C.K. Rathbone and R.W. Hardy. 1998.** Apparent protein digestibility and mineral availabilities in various feed ingredients for salmonid feeds. *Aquaculture*. 159: 177-202.
- Sugiura, S.H., V. Raboy, K.A. Young, F.M. Dong and R.W. Hardy. 1999.** Availability of phosphorus and trace elements in low-phytate varieties of barley and corn for rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *Aquaculture*. 170: 285-296.
- Taechanuruk, S., and R.R. Stickney. 1982.** Effects of feeding rate and feeding frequency on protein digestibility in the freshwater shrimp (*Macrobrachium rosenbergii*). *Journal of the World Mariculture Society* 13: 63-72.
- Traylor, S.L., J.D. Hancock, K.C. Behnke, R.H. Hines, D.J. Lee, S.L. Johnston and P. Sorrell. 1998.** Expander processing conditions affect nutrient digestibility in finishing pigs fed corn-, sorghum-, wheat-, and wheat midds-based diets. Swine Day 1998. Kansas State University, Manhattan, Kansas, USA. Pp. 228-232.
- Wood, E.M., P.J. Griffin, and S.F. Snieszko. 1954.** Synthetic binding of trout diets. *Progressive Fish-Culturist* 16: 19-24.
- Yamada, S., and Y. Yone. 1985.** Loss of dietary amino acids during mastication by carp. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries* 52(4): 673-676.