

鱼饲料着色剂类胡萝卜素研究进展

朱艺峰¹ 麦康森²

(1. 宁波大学生命科学与生物工程学院, 315211; 2. 青岛海洋大学水产学院, 266003)

A REVIEW OF CAROTENOID OF PIGMENTATION ADDITIVES IN FISH FEEDS

ZHU Yi-Feng¹ and MAI Kang-Sen²

(1. Faculty of Life Science and Biotechnology, Ningbo University, 315211; 2. Fisheries College, Qingdao Ocean University, 266003)

关键词: 鱼; 饲料; 着色剂; 类胡萝卜素

Key words: Fish; Feed; Pigmentation additive; Carotenoid

中图分类号: S963.73+5 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2003)02-0196-005

随着人工养殖业的迅猛发展, 环境的变迁, 食物链的改变, 使鱼类体色发生不同程度的改变。尤其在鲑科鱼类, 体色变淡、变灰现象已严重影响养鱼业的经济效益^[1]。20多年来研究表明, 影响鱼类体色的因素较多, 如鱼大小、性成熟、饲料脂肪、遗传因子和饲料类胡萝卜素等, 其中饲料类胡萝卜素控制着鱼类的着色强度^[2]。因此, 在饲料中添加类胡萝卜素作为着色剂, 对养殖鱼类体色进行调控, 已引起研究工作者的广泛重视。

1 饲料类胡萝卜素的影响

类胡萝卜素是生物界中分布最广, 也是最重要的色素, 但鱼跟其他脊椎动物一样, 不能合成类胡萝卜素^[1,3-5]。类胡萝卜素对维持鱼类肌肉、鳍条、皮肤等组织的特征颜色起着重大作用, 鲑鳟鱼类黄色、桔黄色、粉红色和深红色的体色由类胡萝卜素沉积引起^[6]。

1.1 人工合成色素的影响

为获得良好的着色, 人工合成色素虾青素(Astaxanthin)、角黄素(Canthaxanthin)对不同鱼类的着色效果进行了大量探索, 绝大部分研究显示, 投喂合成

的虾青素、角黄素饲料, 鲑鳟鱼类肌肉类胡萝卜素含量得到明显增加, 但以虾青素效果最佳, 角黄素次之^[7-16]。虾青素在鱼类中是最常见的类胡萝卜素, 也是鱼类生存和生长所必需的, 养殖鱼类如不能获得足够数量的虾青素, 鱼体肌肉颜色就会变灰, 当虾青素加入到饲料中, 着色明显得以改善。

广泛的化学分析显示, 当饲料类胡萝卜素含量增加时, 肌肉中类胡萝卜素含量随之增加。虹鳟(*Salmo gairdneri*)肌肉中虾青素沉积量随饲料虾青素含量的增加而显著增加; Christiansen^[13]对鲑(*Salmo salar*)进行11周试验后甚至发现, 当投喂含虾青素0—317mg/kg饲料时, 鲑对虾青素的利用似乎不受饲料中添加含量的限制。

但Torrissen曾指出, 当饲料虾青素含量增加时, 虹鳟对虾青素沉积效率开始降低。Bjerkeng等^[18]也发现, 鳟鱼(*Oncorhynchus mykiss*)随虾青素、角黄素含量增加时肌肉及皮肤中的类胡萝卜素含量也增加, 但剂量反应(Dose response)越低。Hatlen等^[19]对3个不同年龄组北极红点鲑(*Salvelinus alpinus*)试验13周后发现, 投喂每公斤饲料中含虾青素114mg与投含63mg饲料相比, 鱼类肌肉和皮肤中类胡萝卜素浓

度显著增加, 但 25 周后无差异, 但从 63mg/kg 饲料增至 114mg/kg 饲料时, 肌肉着色效率 (Flesh pigmentation efficiency) 下降。这些结论与 Choubert 等和 Smith 等^[20]得到的饲料虾青素含量越高, 虾青素保留系数 (Retention coefficient) 越低, 以及 Storebakken 等得到的一个低饲料类胡萝卜素含量, 高保留率 (Retentionratio) 趋势结论相一致。

肌肉着色强度测试仪器 (Tristimulus colorimeter) 分析也证实了肌肉中类胡萝卜素含量与着色强度的关系。肌肉类胡萝卜素增加, 肌肉亮度 (L^*) 减少, 但肌肉红色强度 (a^*)、黄色强度 (b^*) 增加^[21]。Smith 等^[20]对银大麻哈鱼 (*Oncorhynchus kisutch*) 研究中也发现, 肌肉 a^* (Y_1)、 b^* (Y_2) 与肌肉虾青素浓度 (X) 分别满足下列两个回归方程, 并建议用 a^* 值作为肌肉类胡萝卜素应达到一定含量的标准:

$$Y_1 = 22.1504(1 - e^{-0.1890X}), r^2 = 0.9953$$

$$Y_2 = 21.7806(1 - e^{-0.5544X}), r^2 = 0.9105$$

显然, 肌肉类胡萝卜素浓度越大, 着色强度越强; 同时, a^* 、 b^* 值具有极限, 这也间接证明了饲料虾青素含量越高, 肌肉色素保留效率将下降。

1.2 天然源类胡萝卜素的影响

在配合饲料中已普遍使用合成的虾青素及角黄素作为着色剂, 但已导致配合饲料价格提高 10%—15%^[20]。因此, 使用天然源类胡萝卜素作为鱼类着色剂, 一直是研究工作者感兴趣的课题。业已证实, 部分天然源类胡萝卜素可作为饲料类胡萝卜素源来代替合成色素 (表 1)。

2 饲料脂肪的影响

由于类胡萝卜素是亲脂性的, 许多研究者均想通过提高饲料中脂肪的含量, 以促使提高肌肉脂肪含量来富集类胡萝卜素, 但已有的研究数据显示, 饲料脂肪、肌肉脂肪含量与鱼的着色效果之间的关系是有矛盾的, 甚至是相悖的。

饲料脂肪的增加, 虹鳟肌肉虾青素沉积也显著增加^[2]; 鳟鱼对角黄素的表观消化率也增加, 其表观消化率与饲料脂肪含量 (F) 关系式可表达为: $ADC = 0.869F - 2.038$ ($r^2 = 0.83$)。Wada 等根据组织学观察结果, 还认为饲料脂肪的质量对色素的沉积也有一定的影响, 五条 (*Seriola quinqueradiata*) 嘴、眼框及腹部黄颜色失色是由于大量脂肪过氧化物引起。Torrisen 等通过虾青素、角黄素与 α -生育酚、视黄醛比较后的相似性, 建议把这两种色素列入脂溶性维

生素。

但根据 Spinelli 等^[36]实验, 通过对每公斤肌肉中含类胡萝卜素分别小于 1.5mg 及大于 3.5mg 的两组银大麻哈鱼进行肌肉脂肪分析, 结果脂肪含量均在 0.8%—1.9% 之间, 未出现明显的差异, 证明了肌肉中脂肪含量与肌肉的类胡萝卜素含量没有相关性。March 等对银大麻哈鱼的研究也支持这一观点。

部分研究甚至在一个试验中得出矛盾的结论。Christiansen 等对体重为 17g 的 1 龄北极红点鲑研究中发现, 肌肉组织中角黄素沉积与饲料脂肪含量有正相关性, 但在 125g 的 2 龄鱼中却未发现正相关性。Nickell 等研究也发现了这一矛盾现象, 当投喂粗脂肪含量为 8.2%—26.7% 饲料时, 鳟鱼肌肉虾青素保留系数也分别达到 11.6%—14.9%, 这预示了饲料脂肪可促进虾青素的利用率; 但投喂含 8.2% 及 17.7% 脂肪饲料组时, 肌肉虾青素浓度与肌肉中脂肪含量却显著负相关。

对上述的矛盾结论, 不同研究者试图作出合理解释, 但迄今为止, 饲料脂肪含量、肌肉脂肪含量与肌肉类胡萝卜素浓度间的关系仍不太清楚, 由于实验以及计算方法的不同, 直接根据数值比较是困难的。鲑科鱼类虾青素的沉积就是虾青素结合到非特定疏水性的白肌肉里, 但白肌纤维的数量与大小在不同鱼类的轴上肌是不同的, 这可导致虾青素结合地点及数量的变化, 可解释为不管饲料脂肪含量如何, 在不同鱼类肌肉中由于对虾青素亲和力不同, 导致肌肉虾青素含量不同。即使在同类鱼肌肉中, 对虾青素的亲和力也有一定限制性或具有一定的饱和度。这些结合能力和肌肉着色关系很可能是由遗传预先决定的^[16]。

3 消化吸收和代谢的影响

类胡萝卜素的有效消化必须考虑提供好的色素源, 即使相同的着色剂原料, 若处理方法不同, 其消化率也不相同。Choubert 等对虹鳟研究时发现, 虾粉中近 90% 色素被排到粪便中, 这意味着类胡萝卜素的有效沉积的主要障碍在于消化源; 虹鳟对虾粉、虾下脚料中虾青素的表观消化率为 45%, 而下脚料经青贮后可达 71%。

但类胡萝卜素含量增加, 表观消化率呈下降趋势。Torrisen 等对鳟鱼角黄素消化率试验时, 得到如下结论, 即增加饲料角黄素含量 (C_a), 鳟鱼的表观

表 1 不同天然源类胡萝卜素在不同鱼中的着色效果
Tab.1 Pigmentation effects on various natural carotenoids sources for fishes

天然源 Natural source	鱼 Fish	处理与效果 ^b Treatment and effect	资料来源 Source
海鞘 (<i>Halocynthia roretzi</i>)	鳙鱼 (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	添加大于 1600mg 丙酮提取物, 6 周后背部、尾部肌肉及皮肤红色增强, 最佳添加量为 1600mg, 最佳着色期 8 周	[24,25]
辣椒红素 (<i>Capsantine</i>)	日本鲫鱼 (<i>Carassius auratus</i>)	着色效果随饲料中含量增加而增强	[26]
小球藻 (<i>Chlorella vulgaris</i>)	鳙鱼 (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	经 3—6 周后肌肉着色显著, 与虾青素及角黄素相比着色相似, 在吸收及肌肉中色素分布也没有不同	[15]
酵母 (<i>Phaffia rhalogzyma</i>)	鳙鱼 (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	使用研磨、酶处理、雾化干燥、提取类胡萝卜素方法处理, 均产生极好的肤色和肌肉着色。以研磨效果最佳	[1, 17, 27, 28]
	虹鳟 (<i>Salmo gairdneri</i>)	经酶完全消化, 42d 后肌肉中类胡萝卜素含量达 11. 9mg, 体色变粉红色	[29]
螺旋藻 (<i>Spirulin algae</i>)	尼罗罗非鱼 (<i>Oreochromis niloticus</i>)	从桔黄色变为红色	[30]
	锦鲤 (<i>Crucian carp</i>)	饲料中添加 5%—20% 干藻粉, 60d 后鳞片黑、红色素含量增加, 体色艳丽	[31]
	虹鳟	添加 2. 5%—20%, 56d 后显示黄棕色, 皮肤类胡萝卜素为着色前的 11 倍	[32]
万寿菊花瓣粉 (<i>Marigold petal meal</i>)	尼罗罗非鱼 (<i>Oreochromis niloticus</i>)	体色桔黄色变为金火焰色	[30]
姜黄 (<i>Tumeric</i>)	尼罗罗非鱼	着色不明显	[30]
虾副产品 ^a (<i>Shrimp byproduct</i>)	尼罗罗非鱼	体色桔黄色变为火焰色	[30]
	虹鳟	分别添加含虾青素均为 4. 8—4. 9mg 的三种色素, 使用青贮料的肌肉虾青素沉积量显著高于虾粉及虾下脚料, 虾粉与虾下脚料效果相似。添加 30% 虾粉可使皮肤、肌肉呈红色	[33,34]
花 (<i>Adonis aestivalis flower</i>)	虹鳟	投花瓣组, 2 周后出现死亡。花瓣提取色素 100mg, 经 3 个月饲养, 无死亡且出现显著的粉红色皮肤	[35]
红蟹色素油 (<i>Plauroncodes planipes pigment oil</i>)	银大麻哈鱼 (<i>Oncorhynchus kisutch</i>)	投含 30, 60, 90mg 类胡萝卜素, 120d 后每公斤肌肉类胡萝卜素含量达 3. 5mg 以上的鱼数, 分别占鱼总数的 10%、35% 和 40%	[36]
磷虾色素油 (<i>Eupasia superba pignent oil</i>)	五条 (<i>Seriola quinqueradiata</i>)	投 108mg 类胡萝卜素/100g 油, 皮肤有效着色	[37]
	真鲷 (<i>Pagrus major</i>)	投 0. 12—12. 8mg 虾青素/ 100g 饲料, 8 周后可使皮肤类胡萝卜素含量达到 0. 46—1. 72mg/100g 皮肤	[38]
	银大麻哈鱼	投 80mg 或 72mg 虾青素, 4 周后体重 80g 鱼肌肉含类胡萝卜素 0. 2mg, 180g 鱼含 1. 7mg 类胡萝卜素	

注: ^a包括虾头粉、虾粉、虾下脚料青贮料、虾下脚料。Containing shrimp head meal, shrimp meal, shrimp waste, shrimp waste silage
^b 该列中未加说明时, mg 为占每公斤饲料 mg 量; % 为占饲料百分比。No detailed notes in this column, mg as mg/ kg diet; % as % diet

消化率(ADC, Apparent digestibility coefficient) 就会下降, 可用下式表达: $ADC = -0.214C_a + 30.822, r^2 = 0.962$ 。值得注意的是消化率高, 未必产生高的沉积。如 Foss 等对虹鳟和鳟(*Salmo trutta*) 试验时曾发现, 当分别投喂每公斤饲料各含 30mg 虾青素、角黄

素, 及虾青素棕榈酸酯与角黄素两种饲料混合着色剂时, 虽然所测得的虾青素表观消化率大于角黄素, 角黄素大于虾青素棕榈酸酯, 但经 5、10、22 周后肌肉虾青素和角黄素含量分析发现, 肌肉中两种色素沉积的量并无显著差异, 这种高消化率未产生高沉积的矛盾

结果,是由于虾青素在肠部或粪便中被降解所致。这与 Storebakken 等在鲑鱼试验中的解释相吻合。

几乎所有的研究显示, 鲑科鱼类都能不同程度地吸收类胡萝卜素。鱼类着色能力差, 色素在体内被代谢也是重要的一个因素, 但具体的代谢途径仍未有很好地研究。Torrissen 实验指出, 虹鳟从肠部能吸收色素, 肌肉里虾青素的耗尽, 与沉积在肌肉里虾青素的代谢作用有关。Kiessling 等在鲑鱼研究中显示, 血液虾青素浓度与饲料虾青素水平高度相关 ($r = 0.995$), 但与肠道里的总类胡萝卜素含量没有很大相关性; 当停止投喂虾青素饲料, 改投基础饲料一段时间后, 鲑鱼血液虾青素消除速度比仍投虾青素饲料, 但处于饥饿状态的鱼来的更快, 这很可能是饲料中虾青素留在饥饿鱼类的消化道内作为血液虾青素的储存器, 直至肠道虾青素变空后才会快速消除。但最直接的证明就是 March 等通过口服 $500\mu\text{g}$ 虾青素时发现, 24h 后虹鳟、银大麻哈鱼及大鳞大麻哈鱼 (*Oncorhynchus tshawytscha*) 的血浆虾青素浓度达到最大值 ($1.2 - 7.1\mu\text{g}/\text{mL}$), 随后逐渐减少, 至第 4d 血浆中虾青素浓度几乎降为 0, 从而证实了虹鳟可以吸收虾青素; 而当饲料中添加三碘甲腺原氨酸 (Triiodothyronine, T3) 又可显著减少肌肉和血浆中虾青素含量, 这证实了添加 T3 可促进虾青素的代谢, 据些推断, 鱼类着色能力差很可能是虾青素被代谢为无色的衍生物。

4 其他因素的影响

已有数据显示鱼类有效着色与体重或年龄有关。北极红点鲑体重达到 17g 时, 才能在肌肉里沉积角黄素^[9]。银大麻哈鱼投喂添加磷虾油饲料, 一个月后体重 80g 鱼肌肉很少着色, 而 180g 鱼却明显的着色。March 等还指出银大麻哈鱼肌肉着色强度与体重存在线性相关。Hatlen 等对 3 个不同年龄组北极红点鲑试验时发现, 1 龄鱼比 2, 3 龄鱼在肌肉中的类胡萝卜素含量始终最低, 而 3 龄鱼皮肤中、鳍条中显著高于其他组。

也有研究显示, 肌肉着色程度是由遗传决定的。McCallum 等对大鳞大麻哈鱼着色程度和肌肉虾青素含量关系实验时, 投等量虾青素饲料, 不同品系及相同品系间着色有很大的不同, 认为着色是由一部分基因控制。Torrissen 等对鲑鱼进行一年解剖中发现, 肌肉类胡萝卜素含量受到遗传影响。

不同鱼类对色素的沉积能力及在鱼体内的分布也不同。北极红点鲑比鲑鱼、虹鳟更能沉积色素, 即

是相同鱼类, 小鱼比大鱼沉积色素也相对来得少, 不同部位色素沉积也有明显的不同, 北极红点鲑尾部比背部能多沉积 50% 的角黄素。这与 McCallum 等及 Nickell 等分别在大鳞大麻哈鱼及鳟鱼报道的肌肉不平均着色相一致。

除上述因素外, 仍有其他因素制约着鱼类的着色。养殖周期、鱼类生长、地理位置以及饲料的干湿性均影响鱼类有效着色。含虾青素饲料与不含虾青素饲料进行轮流投喂, 比每餐投喂含虾青素饲料, 其虾青素保留值也要高。

综上所述, 类胡萝卜素对维持不同鱼类的特征色起着重要的作用。为维持或增强鱼类体色、改善鱼类健康, 必须在饲料中添加类胡萝卜素, 尤其是虾青素。Smith 等认为在银大麻哈鱼的整个生产周期 (28 周), 从 50g 体重开始, 投喂含 $15\text{mg}/\text{kg}$ 虾青素饲料是需要的。而根据 Christiansen 实验结果, 在鲑鱼饲料中添加 $5.3\text{mg}/\text{kg}$ 的虾青素就可获得良好的生长, 低于 $1\text{mg}/\text{kg}$ 死亡率较高。

研究还发现类胡萝卜素在其他方面也起着很大的作用。如酵母 (*Phaffia rhodozyma*) 的虾青素, 除作为着色剂外, 投喂这种酵母后, 虹鳟肝体细胞指数、鱼血清谷氨酸草酰乙酸转氨酶活性及血清脂肪过氧化物的平均数也较低, 这预示可促进肝功能, 增强抗氧化的防御潜力。Segner 等投虾青素饲料后对鱼进行了组织学研究, 发现虾青素有改善肝功能和促进鱼类中间代谢的作用。

参考文献:

- [1] Binkowski F P, Sedmak J J, Jolly S O. An evaluation of Phaffia yeast as a pigment source for salmonids[J]. *Aquacult Mag*, 1993, **19**: 54—59
- [2] Torrissen O J. Pigmentation of salmonids: factors affecting carotenoid deposition in rainbow trout (*Salmo gairdneri*) [J]. *Aquaculture*, 1985, **46**: 133—142
- [3] Torrissen O J. Pigmentation of salmonids: interactions of astaxanthin and canthaxanthin on pigment deposition in rainbow trout[J]. *Aquaculture*, 1989, **79**: 363—374
- [4] Torrissen O J, Christiansen R. Requirements for carotenoids in fish diets[J]. *J Appl Ichthyol*, 1995, **11**: 225—230
- [5] Gahaudan J. Dietary astaxanthin improves production yield in shrimp farming[J]. *Fish Chimes*, 1996, **16**: 37—39
- [6] Scalia S, Isaksen M, Francis G W. Carotenoids of the Arctic charr, *Salvelinus alpinus* (L) [J]. *J. Fish Biol*, 1989, **34**: 969—970
- [7] Storebakken T, Foss P, Huse I, et al. Carotenoids in diets for salmonids. III. Utilization of canthaxanthin from dry and wet diets by Atlantic salmon, rainbow trout and sea trout[J]. *Aquaculture*, 1986, **51**: 245—255

- [8] Foss P, Storebakken T, Austreng E, et al. Carotenoids in diets for salmonids. V. Pigmentation of rainbow trout and sea Trout with astaxanthin and astaxanthin dipalmitate in comparison with canthaxanthin[J]. *Aquaculture*, 1987, **65**: 293—305
- [9] Christiansen J S, Wallace J C. Deposition of canthaxanthin and muscle lipid in two size groups of Arctic charr, *Salvelinus alpinus* (L) [J]. *Aquaculture*, 1988, **69**: 69—78
- [10] Choubert G, Storebakken T. Dose response to astaxanthin and carthaxanthin pigmentation of rainbow trout fed various dietary carotenoid concentrations[J]. *Aquaculture*, 1989, **81**: 69—77
- [11] Storebakken T, Choubert G. Flesh pigmentation of rainbow trout fed astaxanthin or canthaxanthin at different feeding rates in freshwater and saltwater[J]. *Aquaculture*, 1991, **95**: 289—295
- [12] Scott T M, Rasco B A, Hardy R W. Stability of krill meal, astaxanthin and canthaxanthin color in cultured rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) filets during frozen storage and cooking[J]. *J. Aquat Food Prod Technol.* 1994, **3**: 53—64
- [13] Christiansen. Growth and survival of Atlantic salmon, *Salmo salar* L fed different dietary levels of astaxanthin. First feeding fry[J]. *Aquacult Nutr*, 1995, **1**: 189—198
- [14] Kiessling A, Dosanjh B, Higgs D, et al. Dorsal aorta cannulation: A method to monitor changes in blood levels of astaxanthin in voluntarily feeding Atlantic salmon, *Salmo salar* L[J]. *Aquacult Nutr*, 1995, **1**: 43—50
- [15] Gouveia L, Gomes E, Empis J. Potential use of a microalga (*Chlorella vulgaris*) in the pigmentation of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) muscle[J]. *Z Lebensm Unters Forsch*, 1996, **202**: 75—79
- [16] Nickell D C, Bromage N R. The effect of dietary lipid level on variation of flesh pigmentation in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquaculture*, 1998, **161**: 237—251
- [17] Johnson E A. A Pigment source in salmonid feed[J]. *Feed Manage*, 1989, **40**: 18—21
- [18] Bjerkeng B, Storebakken T, Liaaen Jensen S. Response to carotenoids by rainbow trout in the sea: resorption and metabolism of dietary astaxanthin and canthaxanthin[J]. *Aquaculture*, 1990, **91**: 153—162
- [19] Hatlen B, Aas G H, Jorgensen E H, et al. Pigmentation of 1, 2, 3 year old Arctic charr (*Salvelinus alpinus*) fed two different dietary astaxanthin concentrations[J]. *Aquaculture*, 1995, **138**: 303—312
- [20] Smith B E, Hardy R W, Torrisen O J. Synthetic astaxanthin deposition in parr size coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) [J]. *Aquaculture*, 1992, **104**: 105—119
- [21] Skrede G, Storebakken T. Instrumental colour analysis of farmed and wild Atlantic salmon when raw, baked and smoked[J]. *Aquaculture*, 1986, **53**: 279—286
- [22] Foss P, Storebakken T, Schiedt K, et al. Carotenoids in diets for salmonids I. Pigmentation of rainbow trout with the individual optical isomers of astaxanthin in comparison with canthaxanthin[J]. *Aquaculture*, 1984, **41**: 213—226
- [23] Metusalach, Synowiecki J, Brown J, et al. Deposition and metabolism of dietary canthaxanthin in different organs of Arctic charr (*Salvelinus alpinus* L) [J]. *Aquaculture*, 1996, **142**: 99—106
- [24] Lee K H, Kang S J, Choi Y J, et al. Utilization of ascidian (*Halocynthia roretzi*) tunic. 2. Optimum level of carotenoid extracts from ascidian tunic for the pigmentation of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* [J]. *Bull Korean Fish Soc*, 1994, **27**: 240—246
- [25] Lee K H, Kang S J, Choi B D, et al. Utilization of ascidian (*Halocynthia roretzi*) tunic. 1. Effect of ascidian tunic extracts on pigmentation and growth of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Bull Korean Fish Soc*, 1994, **27**: 232—239
- [26] Romero L L A, Frago C M, Auro de O A, et al. The effect on pigments of cantaxanthine and capsanthine in the Japanese carp (*Carassius auratus*) [J]. *Veterinaria Mex*, 1992, **23**: 67—68
- [27] Gentles A, Haard N F. Pigmentation of rainbow trout with enzyme treated and spray dried *Phaffia rhodozyma* [J]. *Prog Fish Cult*, 1991, **53**: 1—6
- [28] Nakano T, Tosa M, Takeuchi M. Improvement of biochemical features in fish health by red yeast and synthetic ataxanthin [J]. *J. Agric Food Chem*, 1995, **43**: 1570—1573
- [29] Johnson E A, Villa T G, Lewis M J. *Phaffia rhodozyma* as an astaxanthin source in salmonid diets[J]. *Aquaculture*, 1980, **20**: 123—134
- [30] Boonyaratpalin M, Unpraseth N. Effects of pigments from different sources on colour changes and growth of red *Oreochromis niloticus* [J]. *Aquaculture*, 1989, **79**: 375—380
- [31] HE P M, ZHANG Y J, HE W H. Effect of the spirulina feed on the growth and body color of crucian carp[J]. *Journal of Fisheries of china*, 1999, **23**(2): 162—168. [何培民, 张饮江, 何文辉. 螺旋藻对锦鲤生长和体色的影响[J]. 水产学报. 1999, **23**(2): 162—168]
- [32] Choubert G. Tentative utilization of spirulin algae as a source of carotenoid pigments for rainbow trout[J]. *Aquaculture*, 1979, **18**: 135—143
- [33] Torrisen O, Tidemann E, Hansen F, et al. Ensiling in acid A method to stabilize astaxanthin in shrimp processing by products and improve uptake of this pigment by rainbow trout (*Salmo gairdneri*) [J]. *Aquaculture*, 1981, **26**: 77—83
- [34] Choubert G, Luquet P. Utilization of shrimp meal for rainbow trout (*Salmo gairdneri* Rich) pigmentation. Influence of fat content of the diet[J]. *Aquaculture*, 1983, **32**: 19—26
- [35] Kamata T, Neamtu G, Tanaka Y, et al. Utilization of *Adonis aestivalis* as a dietary pigment source for rainbow trout *Salmo gairdneri* [J]. *Nippon Suisan Gakkaishi Bull Jap Soc Sci Fish*, 1990, **56**: 783—788
- [36] Spinelli J, Mahnken C. Carotenoid deposition in per-reared salmonids fed diets containing oil extracts of red crab (*Pleuroncodes planipes*) [J]. *Aquaculture*, 1978, **13**: 213—223
- [37] Fujita T, Satake M, Hikichi S, et al. Pigmentation of cultured yellowtail with krill oil[J]. *Bull Jap Soc Sci Fish*, 1983, **49**(10): 1595—1600
- [38] Fujita T, Satake M, Watanabe T, et al. Pigmentation of cultured Red sea bream with astaxanthin diester purified from krill oil[J]. *Bull Jap Soc Sci Fish*, 1983, **49**(10): 1855—1861