

# 水产动物体色色素组分及着色剂研究进展

刘金海 王安利 王维娜 柳峰松

(河北大学生命科学学院 保定 071002)

**摘要:** 综述了近几年来水产动物着色剂的研究成果,指出了水产动物着色的关键是选择合理的养殖条件和优良的增色饵料。增色饵料的研究和开发急待解决的问题是真正弄清水产动物体内色素的代谢途径,明确代谢过程中的调控因子和调控点。本文将为水产动物增色饵料的开发和利用提供理论依据。

**关键词:** 水产动物; 色素组分; 代谢途径; 着色剂

**中图分类号:** S963.73<sup>+</sup>5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263(2002)03-92-06

## Progress of Study on the Component of Pigment and Painting Substance of Aquatic Animals

LIU Jin-Hai WANG An-Li WANG Wei-Na LIU Feng-Song

(The College of Life Science, Hebei University Baoding 071002, China)

**Abstract:** This paper reviewed the achievements of present study on aquatic animals' colorants. It is indicated that reasonable rearing condition and valuable foods are crucial to the pigmentation of aquatic animals. The pivotal problems are to find out pigments' metabolizing ways in animals' bodies and identify the control factors and sites in this process. This paper will provide academic basis for exploitation and using of the aquatic animals' pigmentation-enhancing foods.

**Key words:** Aquatic animals; Pigment component; Metabolism path; Painting substance

随着经济的发展和水平的提高,人们对高档水产动物的需求也在日益增长。受自然条件的限制和人为因素的影响,其捕获量却在急剧下降。为了解决供需矛盾,水产养殖业应运而生,但人工养殖的水产动物,其肉质、肉色、体色和风味却远不及纯天然的野生品种,所以研究其体色色素组成及其如何着色就非常重要。本文综述了近年来水产动物体色色素组成、常用着色剂及其着色机理的研究现状,以期促进水产动物着色的研究进程。

### 1 水产动物色素组成

存在于水产动物体表和肌肉的色素,从化学结构分类,大致可分为类胡萝卜素群、胆汁色素群、 $\alpha$ -萘醌系色素群、黑色素、蝶啶系色素群和其它色素。真鲷、鲑鱼、锦鲤、金鱼及蟹、对虾等甲壳类的体色和肉色的红

色系色素以及鳊鱼的表皮色,主要都是来自类胡萝卜素群的色素<sup>[1]</sup>。目前已知结构的类胡萝卜素有 600 多种,它们是由 8 个类异戊二烯单位组成的一类碳氢化合物及其氧化衍生物。基本结构是番茄红素,其它类胡萝卜素是由其氧化、氢化、脱氢、环化以及碳架重排、降解而衍生的。一般类胡萝卜素是  $C_{40}$  分子,但也存在高类胡萝卜素( $C_{45}$  和  $C_{50}$ )和降解的类胡萝卜素(如  $C_{30}$ )。类胡萝卜素是一类广泛存在于动物体内的色素,在鱼类主要储藏在其皮肤、鱼鳞、肌肉等组织中。类胡萝卜素可分为两类:一类是碳氢型,只由 C、H 组成,称为胡萝卜素;另一类是氧化型,由 C、H、O 组成,称为叶黄素。 $\beta$ -胡萝卜素(即维生素 A 原)是胡萝卜素的代表;黄体素

第一作者介绍 刘金海,男,35岁,硕士研究生;研究方向:水生动物营养及生态生理。

收稿日期:2001-08-10,修回日期:2002-01-20

和虾青素则是叶黄素的主要代表<sup>[2]</sup>。

在水产动物中常见的类胡萝卜素有 $\beta$ -胡萝卜素、黄体素、玉米黄质、金枪鱼黄质和虾青素等。鱼贝类体色之红色系色素主要是虾青素,鲷鱼表皮的色素主要成分金枪鱼黄质。天然真鲷表皮的类胡萝卜素分布:虾青素占60%、金枪鱼黄质占20%、黄体素占15%、玉米黄质占4%、 $\alpha$ -胡萝卜素和角红素分别占2%~4%左右,还有其它微量的类胡萝卜素。锄齿鲷的表皮中,虾青素占80%、金枪鱼黄质占15%、腓尼黄质占2%,角红素、玉米黄质、 $\alpha$ -玉米黄质各占1%左右,黄体素也有少量分布。在金鲷的表皮中,虾青素占75%、金枪鱼黄质占20%、角红素占3%、黄体素占2%左右,还有其它微量的类胡萝卜素。金鱼和锦鲤等,由于虾青素、玉米黄质(在体内合成为虾青素)等色素源的存在,而使其呈现红色很强的体表颜色,由于黄体素在体内的合成作用而使体表呈橙色。天然鲑鱼类的肉色色素以虾青素为主,还含有角红素、黄体素等。蟹背甲除了含有甲壳质、无机盐和蛋白质外,还含有端基为红酮类的胡萝卜素烯类色素,如虾青素和 $\beta$ -胡萝卜素等。

## 2 研究水产动物色素的一般方法

**2.1 色素提取** 一般先将动物组织匀浆(匀浆时加入一定量的无水硫酸钠),再采用有机溶剂(丙酮或丙酮和石油醚或丙酮和甲醇等)用索氏抽提器抽提或用环流器与烧瓶组合成煮沸抽提装置抽提或用吸管吸出,然后离心,其色素存在于上清液中。

**2.2 色素分离与纯化** 一般采用纸层析、薄层层析、柱层析、高效液相色谱和气相色谱等方法。就纸层析来说,若用丙酮提取色素,那么提取液经浓缩后点样于滤纸上,然后用四氯化碳在玻璃器皿中展层即可;就薄层层析来说,应先用硅胶G制薄层板,然后点样(用经浓缩的色素丙酮提取液或色素石油醚提取液),再用展层剂(石油醚:丙酮:异丙醇 68:28:4 或石油醚:丙酮:正丙醇 90:10:0.45)展层即可;柱层析则一般用蔗糖作吸附剂装柱,用石油醚或汽油:苯为10:1或1:2的混合液进行洗脱。液相和气相色谱则一般用于进一步定性和定量测定。

## 3 色素在水产动物体内的代谢途径

色素在水产动物体内的代谢途径,目前还不十分清楚,且主要集中在对类胡萝卜素的研究上,其它色素还少有研究。Hate等曾提出由玉米黄素合成虾青素的

代谢途径假说:玉米黄素 $\rightarrow\beta$ -胡萝卜素三醇 $\rightarrow$ 4-氧代玉米黄素 $\rightarrow$ 虾青素。Tanaka等<sup>[3]</sup>、Goodwin<sup>[4]</sup>、Davis<sup>[5]</sup>及Matsuno<sup>[6]</sup>曾进一步认为类胡萝卜素在日本对虾体内有两种代谢途径,即 $\beta$ -胡萝卜素 $\rightarrow$ 异黄素 $\rightarrow$ 海胆酮 $\rightarrow$ 角黄素 $\rightarrow$ 红黄素 $\rightarrow$ 虾青素(Astaxanthin);玉米黄质 $\rightarrow$ 4-酮玉米黄质 $\rightarrow$ 虾青素。各种色素在水产动物体内的代谢途径随动物种类的不同而不同,有关色素在水产动物体内的代谢途径和代谢途径中的调控点及调控因子,还有待于进一步深入研究。

## 4 水产动物着色剂研究进展

对水产动物着色剂的研究,总的来说是国外起步早而国内起步晚。对经济动物研究报道多,对观赏动物尤其是观赏鱼研究报道少。高档的观赏鱼多是从国外进口,且养殖之后体色极易褪去而失去其观赏价值。目前,国内对进口观赏鱼的着色和体色保持还相当困难,有必要对水产动物着色剂进行深入研究。

### 4.1 天然着色剂

**4.1.1 藻类** 蓝藻和绿藻对鱼虾均具有良好的增色效果,对虾体内虾青素的增加最有效<sup>[7,8]</sup>。高脂肪饲料有利于虹鳟鱼体肌肉色素沉积,小球藻是类胡萝卜素色素的有效来源,其效果好于合成色素<sup>[9]</sup>。用绿藻对裂喉鲷进行投喂试验,研究绿藻对裂喉鲷肌肉色素的影响,经过四周投喂后,进行物理测色,结果表明,裂喉鲷肌肉色素的增加引起了颜色增加,但色彩和亮度有所减低<sup>[10]</sup>。用含3%螺旋藻的饲料喂养斑节对虾,结果发现对虾头胸甲中的类胡萝卜素含量显著增加,但却未测出玉米黄质,螺旋藻中的主要类胡萝卜素被斑节对虾迅速代谢转化成了虾黄质。据此发现证实,养殖斑节对虾在捕获上市一个月前投喂含螺旋藻3%的饵料是提高对虾色素含量的有效方法<sup>[11]</sup>。在日本,利用螺旋藻作为锦鲤和金鱼的增色剂,已有长久的历史。用螺旋藻喂养观赏鱼,不论是红色素的鱼(如鲤鱼、金鱼、红鳃和新月鱼等)还是非红色素的鱼,体色会同样变得鲜艳美丽,且生长繁殖能力明显增加<sup>[12]</sup>。据现有资料分析表明,螺旋藻、小球藻和雨生球藻粉都是改善鱼虾体色极好的色素源,但目前应用较多的主要是螺旋藻。在红鲤饲料中添加螺旋藻,螺旋藻中的玉米黄素对鲤鱼的增色有作用,而叶黄素无作用。在香鱼饲料中添加3%~6%的螺旋藻,10周后香鱼体色改善十分明显。在饲料中添加5%或10%的螺旋藻粉,对比用沙丁鱼投喂黄带鲈,83天后,投喂含螺旋藻的试验组,其皮肤色

素含量显著高于对照组,且外观明亮,黄绿带鲜明,体色有明显改善。用藻粉、 $\beta$ -胡萝卜素和虾青素饲养日本对虾,结果表明,添加藻粉和添加虾青素的效果相当,体色最佳<sup>[2]</sup>。虞泽鹏<sup>[13]</sup>指出:日本和南朝鲜在鱼虾等水生动物饵料中添加胶化海带粉既有营养又有防溃散作用,特别是在矿物质和维生素缺乏的水中效果尤为明显。添加适量可提高鱼类生产力和饲料利用率,改善鱼体肤色,促进脂质代谢,节约蛋白质。

**4.1.2 植物及其提取物** 含有类胡萝卜素的植物,如胡萝卜、苜蓿、黄玉米、南瓜、松针粉、金盏草、万寿菊等,还有黄色和红色水果及其它深色植物,均能使水产动物增色。Tunison 等、Bss、Bawemfeind、Ellis 和 VRC 曾讨论了饲料色素、红辣椒、胡椒、谷朊粉、蟹弃物、虾弃物以及合成角黄素对鲑鳟鱼的影响。日粮用 5% 的苜蓿粉可达到水产动物的增色效果。在饲料中添加松针粉或侧柏叶粉 3% ~ 5%,水产动物也可获得良好的着色效果。

**辣椒色素:** 红辣椒粉每千克含类胡萝卜素 275 ~ 1 650 mg,含玉米黄素丰富,美国建明公司生产的红艳艳(kem GLO)就是从中提取的红色类胡萝卜素,将它与金闪闪配合成橙红色混合物,可用于鲑鳟鱼及虾的增色<sup>[14]</sup>。研究发现金鱼的辣椒红含量与辣椒色素投喂量及日光照成正比增加,又发现被鱼体吸收的辣椒红大部分经氧化代谢转化成 4-酮辣椒红加以积累,说明辣椒色素对金鱼显色有效<sup>[15]</sup>。

**茜草色素:** Canthaxanthin 对鲑鱼、鳟鱼、鲤鱼、金鱼、鲷和鲈鱼的着色均可使用,每吨饲料添加 50 g 饲养虹鳟效果显著。金鱼或锦鲤的体色改善以玉米黄质较佳。鳟鱼(Yellow Tail)以 Ethyl  $\beta$  A Po8<sup>1</sup> Carotenolate 较佳,cantharanthin 及 astaxanthin 多用于鲑鱼的体表、肌肉和卵着色,后者更可用于金鱼或锦鲤鳃蜡体表的红色色源,叶黄素则用于香鱼体表的黄色色源<sup>[16]</sup>。

**类胡萝卜素:** 万寿菊每千克花瓣粉含类胡萝卜素 2.35 mg,一般用量为饲料的 0.3%,美国建明公司生产的金闪闪就是从中提取的黄色类胡萝卜素<sup>[14]</sup>。在日本,北海道养殖场利用金盏草(*Adoni sacuwaia*)花瓣提取的金黄色类胡萝卜素作着色剂(不可用花瓣直接添加),以 1% 以下的比例添加到饲料中喂养虹鳟,一个月左右,虹鳟的表皮鳞甲则变成黄色,颜色极为迷人,相当好看。此法不仅会改良虹鳟的肉质,而且会增加其营养成分,使虹鳟肉质更鲜嫩可口。据说此法同样可以将普通的鱼变为观赏鱼,因此被人们视为当代养鱼

的美容技术<sup>[17]</sup>。类胡萝卜素在花玛丽鱼饲料中的最适添加量应为 400 mg/kg。花玛丽鱼从饲料中吸收的色素除少部分作为营养物质转化为维生素 A 外,其余部分均沉积在鱼体的体表、肌肉和性腺等处。增加肌肉中类胡萝卜素含量,使其颜色加深。同鱼类一样,在花玛丽的生长过程中,类胡萝卜素也能促使性腺发育。在雌鱼的卵巢中沉积,促进卵黄的成熟,加深卵黄颜色。在性成熟的雄鱼体表沉积形成婚姻色,从而改善其观赏体色<sup>[18]</sup>。

#### 4.1.3 动物

**4.1.3.1 低等动物及其废弃物** 血红虫、水蚯蚓、红色水蚤和磷虾等能使鱼的体色更加艳丽<sup>[10]</sup>。用生鲜饵料饲养真鲷时,虾类所占的比例大体为 10% ~ 40%,一般从鱼体重 400 g 左右的春季开始使用,着色效果明显<sup>[19]</sup>。用含有冰冻糠虾幼体的日粮饲喂观赏鱼,随日粮类胡萝卜素含量的增加鱼体皮肤的红色成比例的加深<sup>[8]</sup>。虾、蟹、牡蛎和昆虫这些动物甲壳中含有虾黄素,可作为虾、蟹、鱼等水产动物的增色剂<sup>[14]</sup>。虾壳、虾肉粉碎或捣烂后喂养金鱼,也可以起到增色效果,尤其是对红色、黄色和紫色的金鱼,增色效果更佳。水蚤也可以使红色金鱼的体色更加艳丽<sup>[20]</sup>。我国利用废弃的虾头和虾壳加工成虾壳粉,在鱼虾饲料中添加 1% ~ 3% 对改善鱼虾体色也有一定的作用<sup>[2]</sup>。

**4.1.3.2 低等动物提取物** 虾青素和虾红素是从低等动物中提取出来的天然色素。在水产动物饲料中添加,可以改变水产动物的体色。

虾青素(astaxanthin)又名虾黄质,是一种 3,3'-二羟基-4,4'-二酮基- $\beta$ , $\beta'$ -胡萝卜素,其分子式为  $C_{40}H_{52}O_4$ ,分子质量为 596.86,是一种萜烯类不饱和化合物,呈粉红色,是 600 多种类胡萝卜素中的一种。虾青素易溶于氯仿、丙酮、苯和二硫化碳等有机溶剂,易于氧化,氧化后变为虾红素(astacin)。在饲料中添加 40.70 或 100 mg/kg 的虾青素,虹鳟、大鳞大麻哈鱼和大西洋鲑的色素沉积速度及部位随鱼种类的不同而不同,但体色的加深和色素含量的增加却是毋庸置疑的<sup>[21]</sup>。在鲷上市前 20 天,投喂曲酸和虾青素的混合物(比例为每千克鱼体重每天 10 ~ 100 mg 曲酸和 0.3 mg 虾青素)会使人工养殖的鲷体色与野生鲷具有同样鲜艳的色彩<sup>[22]</sup>。用含 36.9 或 35.4 mg 全-E-虾青素/kg 或全-E 和 Z-虾青素混合(分别为 64% 和 35%)的两种颗粒饲料投喂饲养在淡水中的虹鳟(体重 0.4 kg),经过 31 天,鱼肉中虾青素的浓度从最初的 1.7 mg/kg 提高到 6 ~ 7 mg/kg。69 天后,投喂

全-E-虾青素的鱼肉中类胡萝卜素含量高于投喂虾青素异构体混合物的一组(分别为 10.0 和 8.6 mg/kg)。实验结束时,投喂全-E-虾青素一组的体色明显比较红,表现消化率明显较高(79%对 64%)。这表明 Z-虾青素异构体被应用于鱼肉着色的比不及全-E-虾青素<sup>[23]</sup>。在日本对虾饲料中添加 0.1%的虾青素对改善对虾体色效果最佳。而且成活率与色素浓度呈正相关。在两种温度下(8℃、12℃)给平均 150 g 重的北极红点鲑(*Salvelinus alpinus*)投喂含 0~192 mg 虾黄素/kg 干饲料的 6 种饲料。到长至平均体重 320 g (12℃时需 102 d, 8℃时需 126 d)后宰杀,评价鱼肉色素的形成。结果虾黄素与鱼肉的红色度呈正相关,当饵料中虾黄素的含量为 70 mg/kg 时,鱼体色素沉积量随时间推移而呈现平稳状态。与颈及脊柱部位相比,鱼尾部的色素形成更为密集,各种温度下鱼肉颜色与特定生长率呈正相关。8℃比 12℃条件下生长的鲑其色素形成明显<sup>[24]</sup>。虹鳟对虾黄素的着色比角黄素快,其固位系数高 1.3 倍,投喂 100 mg/kg 的虾黄素或角黄素给虹鳟,结果投喂虾黄素的虹鳟肌肉中类胡萝卜素的浓度较高,刺激金鱼最佳体色时虾黄素添加量为 36~37 mg/kg。实验结束 4 周后,金鱼体色保持稳定。因此,在无藻类的水体中饲养金鱼,饲料中添加虾黄质是获得鲜艳体色的适宜方法。投喂添加虾黄质饲料的金鱼,其成活率显著高于不添加虾黄质饲料的金鱼,饲料中添加虾黄质对鱼体重无显著影响<sup>[25]</sup>。在斑节对虾饲料中添加 50 mg/kg 虾黄质(洛什公司),对虾的类胡萝卜素含量提高 318%,70%~90%的类胡萝卜素以虾黄质的形式存在。虾黄质的沉淀在甲壳中高于肌肉中,两个星期后,沉积物在肌肉中达到稳定。同时在甲壳中的沉积也在稳定增加<sup>[26]</sup>。研究表明,虾黄素在饲料中的适宜添加量应为 20~40 mg/kg,用 9~11 周时间进行投喂体色改变可望获得满意效果<sup>[27]</sup>。

虾红素(astacin)是以其烯醇型的虾青素与蛋白质的结合物的形态广泛存在于甲壳类壳内。此外,作为一种酯类的形态也存在于某些鱼皮中。虾红素是虾青素与蛋白质分离后经氧化而成的<sup>[28]</sup>。虾红素是最近人们正广泛研究的红色系列着色剂。用虾红素喂养虹鳟,可以得到红色鳟鱼。用叶黄素喂养虹鳟,则可以得到黄色鳟鱼。同理,虾蟹饲料中亦应使用红色色素源<sup>[16]</sup>。

**4.1.4 微生物** 微生物中的光合细菌,法夫酵母和红法夫酵母等也是水生动物很好的天然着色剂。将红法夫酵母添加到鲑鱼和鲟鱼的饲料中,结果虾青素在其

皮肤和肌肉中大量积累,而使鲑鳟鱼体色呈现红色<sup>[29]</sup>。用光合细菌饲养金鱼,可以使红色素的出现加快,金鱼的体色更鲜艳<sup>[30]</sup>。研究表明,法夫酵母能显著提高罗氏沼虾的增重率和存活率,增重率提高 14.48%,存活率提高 21.66%,并能改善罗氏沼虾的体色,虾壳中类胡萝卜素提高 40.40%,使其看上去更健康更富有营养<sup>[31]</sup>。

## 4.2 商品着色剂

**4.2.1 从天然色素中提炼的着色剂** 目前,从天然色素源中提取的着色剂在水产动物着色中发挥着巨大的作用。瑞士罗氏公司生产的加丽素红、加丽素黄,美国建明公司的金闪闪、红艳艳,德国巴斯夫公司的露康定,杭州民生添加剂厂生产的肤黄素等产品都是从天然色素源中提取出的着色剂,它们都具有良好的增色效果<sup>[14]</sup>。微生物法夫酵母能生产十几种类胡萝卜素,主要是虾青素和 $\beta$ -胡萝卜素,而野生菌中虾青素的含量竟占 40%~95%。目前国外学者在保加利亚酸奶中分离出一种深红法夫酵母,与红法夫酵母相比,其虾青素产量要高 80 倍,而且营养要求较低,生产速度较快,从而使虾青素的生产有望达到商品化,并有助于水产动物之增色。

**4.2.2 化学合成法生产的着色剂** 化学合成法生产的着色剂有含 40 个碳原子的胡萝卜素和番茄红素,30 个碳原子左右的 $\beta$ -阿扑-8'-胡萝卜素醛( $C_{33}H_{40}O$ )或 $\beta$ -阿扑-8-胡萝卜素酸乙酯( $C_{32}H_{44}O$ )、柠檬黄质( $C_{33}H_{44}O$ ),瑞士罗氏公司的加丽素粉红(carophyllpink 含虾青素 5%~10%)等。将其添加到鱼饲料中,均有改善体色的作用。

**4.2.3 激素类着色剂** 甲基睾酮是一种人工合成的雄性激素,在一定剂量下可抑制垂体前叶促性腺激素分泌,促进蛋白质合成代谢,它本身不能合成 $\beta$ -胡萝卜素,也不能促使其它物质合成 $\beta$ -胡萝卜素,因而甲基睾酮不能直接增加鱼体中类胡萝卜素含量。但它能使处于一定发育阶段的鱼出现性逆转,由雌鱼变成雄鱼。采用雄性激素可使观赏鱼的体色更鲜艳,其实质是雄性化形成婚姻色的缘故。周兴华等 2000 年报道,饲料里添加 10  $\mu\text{g}/\text{mg}$  的甲基睾酮能使 3 月龄的红剑尾鱼全雄化,且群体的体色得到加深<sup>[32]</sup>。

## 5 结语

对水产动物着色产生影响的因素是多方面的:一是取决于水产动物本身的遗传因素;二是取决于水产动物所处的环境;三是取决于喂养水产动物所用的饵

料;四是取决于人为注射的色素或激素等。对水产动物着色的研究,主要是通过投喂含色素或激素的饵料或通过环境因子的改变来影响水产动物的体色和肉色。然后再利用分光光度法测水产动物色素提取液的OD值,以确定其对水产动物着色的影响。目前,对水产动物着色机理的研究还很肤浅,有的甚至还处于假说阶段,没有真正搞清色素在体内的代谢途径,也没有真正搞清色素在水产动物体内代谢、转化和沉积这一系列过程中的调控点和调控因子。所以,未来对水产动物着色的研究应集中于代谢途径和调控因子,只有这样水产动物着色的研究才会上一个新台阶。

### 参 考 文 献

- [1] 丘生译. 改善养殖动物的体色和肉色的组成物. 特许公报, 5-328909.
- [2] 李志琼, 汪开斌, 杜宗君. 类胡萝卜素对鱼虾体色改善的研究. 饲料研究, 2001, 1: 15-18.
- [3] Tanaka Y, Matsuguchi H, Katayama T *et al.* The biosynthesis of astaxanthin—ⅩⅧ. The metabolism of carotenoids in the prawn *Penaeus japonicus* Bate. *Bull Jap Soc Sci Fish*, 1996, 42: 197-202.
- [4] Goodwin T W. The Biochemistry of the Carotenoids. London: Chapman and Hall, 1985. 64-96.
- [5] Davis B H. Carotenoid metabolism in animals: A biochemist's view. *Pure Appl Chem*, 1985, 57: 679-684.
- [6] Matsuno T S, Hirao. Marine carotenoids. In: Ackman R G ed. Marine Biogenic Lipids, Fats and Oils. Florida: CRC Press, 1989. 251-388.
- [7] 林海. 鱼虾饲料手册. 北京: 中国农业大学出版社, 1999. 138.
- [8] 林仕梅, 罗莉, 叶元土. 水产品增色剂. 饲料研究, 1996, 10: 22-23.
- [9] Gouveia L, Choubert G, Gomes E *et al.* Use of *Chlorella vulgaris* as a carotenoid source for rainbow trout: effect of dietary lipid content on pigmentation, digestibility and retention in the muscle tissue. *Aquaculture International*, 1998, 6(4): 269-279.
- [10] Choubert G, Heinrich O. Carotenoid pigments of the green alga *Haematococcus pluvialis*: assay on rainbow trout *Onchorhynchus mykiss*, pigmentation in comparison with synthetic astaxanthin and cantaxanthin. *Aquac*, 1993, 112(2/3): 217-226.
- [11] Liao W L, Nur-E-Borhan S, Okada T *et al.* Pigmentation of cultured black tiger prawn by feeding with a Spirulina-supplemented diet. *Bull Jap Soc Sci Fish*, 1993, 59(1): 165-169.
- [12] 邱德依. 螺旋藻在饲料中的应用. 饲料研究, 2001, 1: 15-18.
- [13] 虞泽鹏, 吴信法. 海带在饲料中的开发利用. 饲料研究, 1997, 7: 16-17.
- [14] 叶成远, 张惠云. 增色剂的应用和研究进展. 饲料博览, 1999, 11(2): 29-30.
- [15] 津岛已幸, 根本秀忠, 松野隆男. キンギョにおけるトウカヨミ色素の色揚げ効果. 日水志, 1998, 64(5): 940-942.
- [16] 洪平. 饲料原理要览. 北京: 海洋出版社, 1993. 275-278.
- [17] 张肇富. 人工改变虹鳟鱼的颜色. 饲料研究, 1997, 7: 16-17.
- [18] 向泉, 曾学润, 李晋平等. 类胡萝卜素对花玛丽鱼体色影响的最适量研究. 北京水产, 2000(1): 52-53.
- [19] 浜口胜则. マダイの色揚げ. 养殖, 1995, 32(8): 86-87.
- [20] 叶健. 农养金鱼 100 问. 福州: 福建科学技术出版社, 2000. 86-87.
- [21] March B E, MacMillan C. Muscle pigmentation and plasma concentrations of astaxanthin in rainbow trout, Chinook salmon, and Atlantic salmon in response to different dietary levels of astaxanthin. *Prog Fish-Cult*, 1996, 58(3): 178-186.
- [22] 马场贵司, 朝仓征雄. 养殖マダイ体色改善法. 特许公报, -平4-67942.
- [23] Bjerkgeng B, Ling M, Lagocki S *et al.* Bioavailability of all-E-astaxanthin and Z-astaxanthin isomers in rainbow trout (*Onchorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 1997, 157: 63-82.
- [24] Olsen R E, Mortensen A. The influence of dietary astaxanthin and temperature on flesh colour in Arctic charr *Salvelinus alpinus* L. *Aquaculture Research*, 1997, 28: 51-58.
- [25] Paripatananont T, Tangtrongpairaj J, Sailasuta A *et al.* Effect of astaxanthin on the pigmentation of goldfish *Carassius auratus*. *World Aquac Soc*, 1999, 30(4): 454-460.
- [26] Menasveta P, Worawattanamateekul W, Latscha T *et al.* Correction of giant giger prawn (*Penaeus monodon* Fabricius) coloration by astaxanthin. *Aquacultural Engineering*, 1993, 12: 203-213.
- [27] 松野隆男. アスタキサンチンによるアユの体色改善. 水产増殖, 1994, 42(1): 101-106.
- [28] 山田常雄, 前川文夫, 江上不二夫等. 生物学词典. 北京: 科学出版社, 1997. 963.
- [29] 王进波. 虾青素的开发与应用. 饲料研究, 2000, 8: 15-17.
- [30] 陈正宇, 李冬华, 刘敏光. 光合细菌养鱼效果初探. 珠江水产, 1991, (17): 104-109.
- [31] 金征宇, 过世东, 吕玉华. 饲料中添加富含虾青素的法夫酵母对罗氏沼虾的体色及生长状况的影响. 饲料工业, 1999(10): 29-31.
- [32] 周兴华, 向泉, 王进文. 甲基睾酮对珍珠玛丽红剑尾鱼性逆转及体色影响的初步研究. 水产科技情报, 2000, 27(3): 99-101.