

鱼类的痕量矿物质研究进展^{*}

刘镜恪 陈晓琳
(中国科学院海洋研究所)

鱼类生命的全过程均需要矿物质, 这些矿物质主要由无机元素构成。鱼类通过饲料和周围的水体获得矿物质。矿物质参与鱼类细胞和组织的代谢, 并在骨骼的形成、胶体系统的维持、酸碱平衡的调节以及激素和酶等重要的生物化合物中发挥重要作用。如果鱼类缺乏矿物质, 便能够引起生化、结构和功能上的病症。

迄今, 一些痕量矿物质在吸收、生物利用和自身功能等方面的生理作用尚待进一步研究。尽管鱼类对这些痕量矿物质的需求量很低, 但这些矿物质却是鱼类正常生长所必需的(表 1)。如果鱼类过量地消化、吸收了这些矿物质, 可能会产生毒副作用。因此, 鱼类需要通过吸收、储存和排泄使体内各种痕量金属的含量维持一种微妙的平衡。

表 1 鱼类饲料中痕量矿物质的含量范围(干重)

矿物质	需求量/(mg/kg)	矿物质	需求量/(mg/kg)
铁	30~170	铜	1~5
锰	2~20	锌	15~40
钴	0.05~1.0	硒	0.15~0.5
碘	1~4		

鱼类能够较好地利用饲料中的矿物质, 其利用率受到以下几种因素的影响: ①饲料中营养物质的含量与结构形式; ②饲料的粒度和消化率; ③营养物质的相互作用; ④鱼的生理和病理状况及水体中的矿物质含量等。在这些因素中, 与化学状态有关的一些因素颇为重要, 因为鱼类从饲料中摄取的这些元素可以表现出不同的分子形式、化合价和配位体。鱼类胃肠道系统中形成不溶性的和不能吸收的物质既可能阻碍也可能帮助鱼类对这些元素的吸收、运输和代谢。在这些过程中, 其他一些无机元素与这些痕量元素进行竞争, 同时, 环境因素也会影响鱼类对这些痕量矿物质的利用。

鱼类的矿物质营养研究已早有报道, Watanabe 等(1988)、Hilton(1989)和 Lall(1989)等人曾先后发表了有关的综述或评论, 本文仅介绍鱼类的几种痕量矿物质的国外研究概况, 旨在深入开展我国的相关研究。

^{*} 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 4447 号。
中国科学院上海浦东新区高新技术种子资金资助项目 200101 号; 国家自然科学基金资助项目 30170731 号。
收稿日期: 2002 年 11 月 10 日 Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://v

一、材料与方法

1. 铁的作用与利用率

铁在矿物质中积极参与氧化还原反应,其电子的传递与细胞的呼吸作用有关。蛋白质(如鱼血蛋白)、酶(如微粒体的细胞色素和过氧化氢酶)、非鱼血化合物(如铁传递蛋白和铁蛋白)等均含铁。铁传递蛋白是鱼血中铁的主要载体,红细胞中发现有血红蛋白,血浆中发现有铁传递蛋白。

与哺乳动物相比,鱼类体内的铁含量很低(Van et al., 1975)。鱼类体内铁吸收和代谢的有关报道甚少,但其过程与其他脊椎动物基本相同。尽管鱼类可以由鳃膜吸收铁,但主要还是由肠道黏液来吸收。由于铁的缺乏、不足引起美洲红点鲑(Kawatsu, 1972)、(Ikeda et al., 1973a)、真鲷(Sakamoto et al., 1978a)和鲤(Sakamoto et al., 1978b)等的贫血病症。美洲红点鲑体内若缺铁会使血液中红细胞数目和血红蛋白含量降低,从而影响鲑的生长;鲤鱼的贫血症与鲑鱼相同,但生长速度未受到影响。河鲢体内缺铁会导致饲料利用率的降低,血浆中铁含量的下降以及铁传递蛋白的饱和(Gatlin et al., 1986a);鲑鱼体内缺铁会产生微带黄色的白肝(Sakamoto et al., 1978b);虹鳟体内缺铁则会使其受精卵的孵化率降低。

实验证明,鱼类可以通过鳃来吸收铁。鲑鳟鱼类血浆中的铁含量与水体中的铁含量呈正相关。本文作者在试验过程中将饲养鲢鱼的水体中添加硫酸亚铁后,鲢鱼的生长明显得到改善,这表明水体中可溶性的铁具有良好的营养价值(Roeder et al., 1966)。当饲料中的铁含量充足时,鲢鱼通过鳃吸收铁的数量则会下降(Segner et al., 1985)。饲料中无机和有机含铁化合物的比例、鱼类消化道的功能与消化率是影响铁吸收的主要因素。无机铁被还原成亚铁状态并从化合物中释放出来便于鱼类吸收。Sakamoto 等(1979)研究了真鲷对饲料中不同铁盐的吸收,其结果证实,在预防真鲷贫血病上,氯化亚铁和氯化铁比柠檬酸铁更有效。Lim 等(1996, 1997, 2000)报道了饲料中不同的铁化合物、铁化合物的不同含量以及铁化合物与抗坏血酸的关系等对河鲢生长影响的研究。

铁是一种与脂类氧化有关的主要金属。当高度不饱和脂肪酸和氧存在时,亚铁比三价铁可以更有效地催化产生过氧化氢和其他过氧化物。向富含脂类的鱼饲料中添加亚铁可能会影响饲料的稳定性。Desjardins 等(1987)证实,向鳟鱼饲料中添加硫酸亚铁会导致该饲料氧化作用的增强。鱼类铁的代谢与抗坏血酸有关,其代谢过程中的相互作用显著,可能是由于饲料中铁的添加影响了抗坏血酸的稳定性的缘故(Desjardins, 1985)。Andersen 等(1997, 1998)在大西洋鲑对饲料中三种铁化合物的利用率、铁与其他痕量元素的关系以及铁与抗坏血酸的关系等有关研究中也得到证实。

鱼粉、肉粉等饲料的原料中含有丰富的铁,其含量约为 400 ~ 800 mg/kg。油料种子中的铁含量为 100 ~ 200 mg/kg,谷物中铁的含量为 30 ~ 60 mg/kg。鱼类对各种饲料中铁的利用率均取决于铁的结构形式。

2. 铜的作用与利用率

鱼体中许多酶的活性均与铜有关。例如:细胞色素氧化酶、过氧化物歧化酶、赖氨酸

氧化酶、多巴胺羟化酶和酪氨酸酶等。此外,铜蛋白与铜螯合物均有代谢作用。有关鱼类铜代谢方面的研究,报道甚少。Syed 等(1982)的研究表明,鱼类体内铜与相关酶的分布与哺乳动物相似。鱼眼中铜的含量最高,肝、脑和心脏等器官中次之。鱼体血浆中含有一种铜蛋白络合物和血浆铜蓝蛋白。

如果鲤鱼和虹鳟饲料中的铜含量不足,则会导致鱼体相关组织中的铜含量降低(Ogino et al., 1980);若铜含量过高,则会给鱼类生长带来副作用。当虹鳟饲料中的铜含量高达约 600 mg/kg 时,不会带来副作用,但饲料中铜含量 > 730 mg/kg 时,虹鳟的生长速度便会下降并出现厌食现象(Lanno et al., 1985),还会引起鱼鳃的损伤及肝、肾的坏死;亦会抑制河鲀的生长并降低饲料的转换率(Murai et al., 1981)。Gatlin 等(1986b)认为饲料中铜含量不足,会降低河鲀心脏中细胞色素 C 氧化酶及肝脏中铜锌过氧化酶的活性。Berntssen 等(1999)认为饲料中的铜含量对大西洋幼鲑生长、饲料利用率及营养状况等均有影响。

饲料和水体中通常均含有鱼类所需要的铜。铜的需要量在很大程度上取决于动物的生理状态、水体中铜的含量以及铜代谢的拮抗物——锌、钙和钼的含量。由于铜和锌的化学性质相似,它们可能是拮抗的,因此,鱼类在矿物质吸收和金属酶合成的过程中,铜和锌进行竞争。

3. 锰的作用与利用率

锰主要分布在鱼和动物的组织中。线粒体中的锰含量比细胞质和其他的细胞器中的锰含量高。锰是正常的脑功能以及脂代谢、糖代谢所必需的。该矿物质有两种作用:首先作为酶的一种辅助因子形成金属酶复合物;第二,是金属酶整体组成的一部分,能够激活一些特定的和非特定的酶(Clark et al., 1987)。

锰的缺乏会延缓鱼的生长。饲料中的锰含量不足,虹鳟和鲤鱼的生长速度降低(Ogino et al., 1980)。罗非鱼缺锰,会导致摄食量下降、失去平衡、死亡率增高(Ishac et al., 1968)。鱼的骨骼中锰含量的降低与饲料中锰含量的不足有关(Satoh et al., 1983 a, b, c)。Knox 等(1981)发现,虹鳟的锰摄入量不足,其心肌和肝脏内铜、锌过氧化酶和锰过氧化酶的活性降低,而 Gatlin 等(1984b)发现,即使饲料中的锰含量低,鱼肝脏内锰过氧化酶的活性却未受到影响,饲料中的锰含量影响性腺中锰和其他痕量元素的含量。鱼粉饲料中缺锰明显影响鲤鱼性腺中矿物质的组成。投喂缺锰饲料的美洲红点鲑和虹鳟,其受精卵中不仅锰含量低,而且孵化率也低(Lall, 1989)。

鱼类通过水体和胃肠道进行锰的消化吸收。Srivastava 等(1983)证实鱼类从饲料中比从水中可能更好地吸收锰。钙、磷在饲料中含量较高会明显降低鱼类对锰的吸收。

饲料中添加不同的锰盐,鱼类对锰的利用率也会存在差异。如:大西洋鲑对饲料中锰氧化物的利用率很低(Lall, 1989);鲤鱼对饲料中锰硫酸盐和锰氯化物的利用率高于锰碳酸盐(Satoh et al., 1987),若在饲料中添加锰硫酸盐,鲤鱼长势良好,蛋白质的合成会加快,肝内脂肪的合成会减慢(Romanenko, 1984)。Yamamoto 等(1983)研究表明,白鱼粉中的锰含量不能满足虹鳟的需求,因为含量为 55% 的白鱼粉中锰的含量仅为 2 ~ 3 mg/kg,不能达到正常的供给量,只有在锰含量为 10 mg/kg 时,鲤鱼才能生长良好。Satoh 等(1989)还进行了鲤鱼对白鱼粉、褐鱼粉和沙丁鱼粉中锰利用率的比较研究,结果

显示各种不同鱼粉的饲料中, 如果不再补充锰, 鲤鱼的生长速度和饲料效率均受影响; 饲料中补充锰, 鲤鱼的生长速度和饲料效率将得到改善。因此, 在各种鱼粉的饲料中, 锰的添加是必不可少的。

毛鳞鱼粉和鲱鱼粉中含锰量为 4 ~ 12 mg/kg; 一些植物原料如谷物中的含锰量为 8 ~ 50 mg/kg, 玉米中的含锰量为 4 ~ 11 mg/kg, 稻糠、麦麸和玉米等的干馏物是较好的锰源。

4 锌的作用与利用率

锌是鱼类营养中的重要痕量元素, 它参与鱼体中各种代谢过程, 是几种酶特定的辅助因子和 20 种金属酶的一部分。

牙鲆饲料中的锌含量对鱼的增重率、肝脏锌含量、肠黏膜碱性磷酸酶活性等均有影响(魏万权等, 1999)。虹鳟对饲料中锌的需要量一般为 15 ~ 30 mg/kg。虹鳟饲料中锌的含量为 15 ~ 600 mg/kg, 其生长速度和饲料效率未出现差异, 亦未出现其他有害健康的副作用。但若其饲料中锌不足, 则会延缓其生长, 损害其免疫功能(Kiron et al., 1993); 如果饲料中锌含量仅为 1 mg/kg, 虹鳟的生长将会停止。Satoh 等(1983)的研究表明, 在白鱼粉为主要原料的饲料中, 添加 40 mg/kg 的锌, 虹鳟和鲤鱼的生长速度均有提高。饲料中锌不足使蛋白质和糖类的消化率降低, 本文作者推测可能是由于羧肽酶活性下降引起的。同时, 还会影响鲤鱼性腺中的锌含量。此外, 锌缺乏会导致鱼类的眼球晶状体白内障以及鳍和皮肤的糜烂(Hughes, 1985)。饲料中的锌含量不足, 鲶鱼的食欲将会下降, 生长缓慢, 鱼骨中的锌、钙含量以及血清中的锌浓度便会降低(Gatlin et al., 1983)。

鱼类通过胃肠和鳃从饲料和水体中吸收锌。饲料中锌的化学形式、蛋白源以及钙、磷、肌醇六磷酸的含量不同, 鱼类对锌的吸收和利用也会有差异。Ketola (1979)和 Yamamoto等(1983)认为含量为 55% 的白鱼粉饲料中, 锌含量不能满足鲑鱼的需求。只有向饲料中添加硫酸锌或硝酸锌, 才能保证鲑的正常生长。本文作者在实验中分别将硫酸锌、硝酸锌和氯化锌添加到同一虹鳟饲料中, 其添加量均为 20 mg/kg, 总含量均为 60 mg/kg。经过本文作者 40 周的研究结果表明, 投喂添加硫酸锌的饲料, 虹鳟的生长最好; 添加硝酸锌次之, 添加氯化锌效果最差。Spray 等(1988)认为, 通过增加水中的锌含量来弥补鱼类饲料中锌的不足也是可行的。

鱼类对白鱼粉中锌的消化吸收不良是由于白鱼粉中含有大量羟磷灰石(主要成分为磷酸钙)的缘故, 这些羟磷灰石主要来自鱼骨等坚硬组织(Satoh et al., 1987)。因此, 鱼粉为主的饲料中必须添加适量的锌。Gatlin 等(1984a)也指出, 含有 42% 豆粉和 11% 鱼粉的鱼饲料中, 应添加锌至饲料中的锌含量达到 150 mg/kg。白鱼粉中磷酸钙的含量比褐鱼粉和沙丁鱼粉更高, 因而白鱼粉为主的饲料中更需要补充锌(Gatlin, 1984a)。

5 钴的作用与利用率

钴是维生素 B₁₂ 的重要组成成分, 约占其分子量的 4.5%。大多数的动物均需要该元素来合成维生素。钴作为维生素 B₁₂ 的一部分与氮吸收、血红蛋白和肌肉蛋白的合成有关; 此外, 钴还对某些酶有影响。钴被结合到胰岛素中起降低血浆中糖含量的作用(Roginski et al., 1977)。

饲料中的钴能够提高鱼类的生长和血红细胞的数量。鲤鱼和虹鳟的某些研究均证

实这一结论。饲料中添加钴使鲤鱼的生长速度、成活率、受精卵的孵化率、蛋白质的合成等均有提高或改善。胚胎发育阶段虹鳟受精卵中已存在钴的吸收现象。Hertz 等(1989)研究钴对鲤鱼体内糖代谢的影响时认为, 胰岛素中的钴直接影响到糖的利用率, 并与鱼类的蛋白质节约作用有关。过量的钴会导致虹鳟中毒, 表现症状为消化道出血、白血球改变; 而钴的缺乏会导致鲑鱼体内维生素 B₁₂合成的下降。

鱼类通过鳃从水体中吸收钴, 也可以从饲料中吸收钴, 如: 鳟鱼(Phillips et al., 1960)。鱼类对水体中钴的吸收随水温的增高而增大, 随水体中钙含量的降低而增高。美洲红点鲑从饲料中吸收钴后, 这些钴首先被保存在消化道, 在幽门的盲肠和肠道内开始进行代谢。鱼类饲料中钴的最低需要量约为 0.05 mg/kg (Lovell, 1979)。一般饲料中钴的含量范围为 1~6 mg/kg。钴盐的添加一般为氯化钴。饲料中的氯化钴和硝酸钴以及水体中的氯化钴改善了鲤鱼的生长并提高了血红蛋白产物(Castell et al., 1986)。氯化钴的添加还使罗非鱼的生长和蛋白质合成加快(Anadu et al., 1990)。尽管饲料中钴的添加量很低, 但是鱼类仍能够从大量的饲料中对该痕量元素进行吸收。

6 硒的作用与利用率

硒是包括鱼类在内的动物所必需的营养要素。它是谷胱甘肽过氧化酶的一部分。肝脏或血浆中该酶的活性水平显示出动物体对硒的吸收量。谷胱甘肽过氧化酶起着保护细胞和生物膜不被氧化的作用。与维生素 E 结合后的硒是避免肌肉营养不良所必需的。硒化合物还能够减缓一些重金属(如镉和汞)的毒性。

硒的缺乏通常导致鱼类生长速度下降。投喂缺硒饲料引起幼鲑的死亡, 但饲料中添加硒(0.1 mg/kg)和维生素 E(500 IU/kg)后, 防止了死亡的发生(Poston et al., 1976)。本文作者在实验中投喂缺硒饲料 26 周后, 大西洋鲑嗜眠、厌食并死亡。Poston 等(1979)认为投喂硒含量为 0.15 mg/kg 的饲料, 鲑的生长状况良好。与维生素 E 结合后的硒, 防止了大西洋鲑肌肉的营养不良。Bell 等(1987)还用大西洋鲑研究了硒在细胞氧化保护机制中的重要作用。

研究表明, 饲料中缺硒会导致鱼体组织中硒含量和血球容量值降低, 肝中谷胱甘肽过氧化酶的活性下降, 而血浆中谷胱甘肽转移酶的活性却增高。

当饲料中硒含量为 0.15~0.38 mg/kg 时, 虹鳟体内血浆中谷胱甘肽过氧化酶的活性最高(Hilton et al., 1980)。当饲料中硒含量为 0.9 mg/kg、维生素 E 含量为 41 mg/kg 时, 可以完全防止虹鳟对硒的缺乏(Bell et al., 1985)。当饲料中硒含量仅为 0.06 mg/kg 时, 肝脏中谷胱甘肽过氧化酶的活性降低, 如果饲料中缺乏维生素 E, 则降低得更明显。Gatlin 等(1984c)以生长速度和谷胱甘肽过氧化酶的活性为依据, 认为饲料中维生素 E 含量丰富时(30 mg/kg), 饲料中的硒含量约为 0.25 mg/kg。饲料中的硒含量过高会产生副作用, 导致鱼类生长缓慢、饲料效率降低及死亡率升高。当硒含量为 13~15 mg/kg 就会使鱼中毒(Gatlin et al., 1984c), 而长期投喂硒含量为 3 mg/kg 的饲料也会产生副作用(Hilton et al., 1980)。

鱼类从水体和饲料中摄取硒。水体中的硒含量过高(40~130 $\mu\text{g/L}$)对鱼类有害。水体中硒的浓度通常小于 0.1 $\mu\text{g/L}$, 鱼类由鳃吸收硒后, 以无机物的形式储存于除肝脏外的各个组织中。而饲料中的硒, 则以有机物的形式储存于鱼体内(Hodson et al., 1983)。

硒和维生素 E 的协同作用也被有关学者关注。硒通过谷胱甘肽过氧化酶发挥作用,而维生素 E 是一种与生物膜有关的抗氧化剂。这两种营养物质在保护生物膜不被脂类氧化方面作用互补(Combs et al., 1986)。维生素 E 能够防止过氧化物的形成,而硒则可以使已有的过氧化物降解。根据饲料中维生素 E 的含量,饲料中硒的含量一般为 0.2 ~ 0.5 mg/kg。

硒能够与砷、硫、汞、镉等元素作用。Hilton 等(1983)证实虹鳟肝脏中硒和铜含量成正比例关系,这种关系在养殖的和野生的鲑鱼肝脏中也是如此(Poppe et al., 1986)。鱼类肝脏中硒和铜的正比例关系表明这两种矿物质结合在一起形成硒和铜的复合物(Hilton, 1989)。

7. 碘的作用与利用率

碘与甲状腺激素有关。这些甲状腺激素能够调节鱼类体内的代谢活动,并且广泛地影响细胞的氧化、神经肌调控、营养物质的代谢及生长。三碘甲腺氨酸是主要的甲状腺激素并被认为是甲状腺素的前体物,三碘甲腺氨酸和甲状腺素主要由胆汁分泌。

鲑鱼因碘缺乏引起甲状腺肿。肉食性鱼类比杂食性和草食性鱼类更易引起甲状腺肿。Ikeda 等(1973b)发现在碘含量很低的水体中饲养的金鱼生长缓慢。Woodall 等(1964)发现用碘含量为 0.1 mg/kg 的饲料投喂大麻哈鱼,其生长未受到抑制,亦未引起甲状腺肿,但是甲状腺储存的碘含量下降。Agrawal 等(1981)发现,如果饲料中抗坏血酸(Vc)缺乏,鲑鱼甲状腺组织吸收的碘数量便会降低。鱼类通过鳃从水体中吸收碘,吸收速度与水体中的钙含量成反比(Hunn et al., 1966)。

由于海水中碘含量高于淡水,所以淡水鱼类更易出现碘缺乏病症。淡水鱼血浆中碘含量范围为 0.5 ~ 2000 $\mu\text{g/dL}$ (Gregory et al., 1975),该含量与饲料和水体中的碘含量有关,淡水鱼比海水鱼更依赖饲料中的碘,饲料中的碘被吸收后分布于消化道(Gregory et al., 1975)。尽管大多数鱼类对碘的需要量尚未进行研究,但 Lovell (1979)推荐饲料中碘的最低含量为 2.8 mg/kg。鱼龄、生理状况和压力等因素对鱼类碘的需要量有显著影响。海洋动、植物是碘的重要来源,一些海藻中的碘含量高达 0.1%。饲料中的各种组分中的碘含量差别很大,除鱼粉外的动物蛋白碘含量很低,鲱鱼粉和毛鳞鱼粉中的碘含量通常仅有 5 ~ 10 mg/kg,而大西洋白鱼粉中的碘含量高达 60 ~ 90 mg/kg,陆生植物蛋白的碘含量则很低。

8. 铬的作用与利用率

铬是糖代谢和脂代谢过程中不可缺少的物质,并且是胰岛素活性的辅助因子。家禽和哺乳动物中铬在糖代谢中的作用已被证实。

Hertz 等(1989)研究了饲料中的铬对鲤鱼糖代谢的影响,其铬盐能改善鲤鱼对糖类的利用,并抑制了糖质新生。投喂含糖的饲料,罗非鱼的增重率和肝糖源含量均有提高(Shiau et al., 1993)。

铬的生物利用率取决于铬形成配位化合物和螯合物的能力,铬作为生物活性分子的一部分并以无机三价铬的形式发挥其作用。

二、结 论

通过以上阐述, 可得出以下结论: 铁、铜、锰、锌、钴、硒、碘和铬等痕量矿物质是维持鱼类正常代谢不可缺少的物质。除锰、锌外, 迄今可供参考的文献尚不够完整、系统。鱼类对这些痕量矿物质的吸收和生物利用率以及这些痕量矿物质的功能作用应在今后做进一步深入研究。

参 考 文 献

- 魏万权、李爱杰、李德尚, 1999, 饲料中添加锌对牙鲆生长和生化指标的影响, 青岛海洋大学学报, 29(1): 60~66.
- Agrawal N. K. and Mahajan, C. L., 1981, Effect of ascorbic acid deficiency on the uptake of iodine by thyroid and non-thyroid tissues of an air-breathing freshwater fish *Channa punctatus* Bloch, *J. Fish Biol.*, 18: 411~416.
- Anadu, D. I., Anozie O. C. and Anthony, A. D., 1990, Growth responses of *Tilapia zillii* fed diets containing various levels of ascorbic acid and cobalt chloride, *Aquaculture*, 88: 329~336.
- Andersen, F., Lorentzen, M., Waagbø R., et al., 1997, Bioavailability and interactions with other micronutrients of three dietary iron sources in Atlantic salmon, *Salmo salar*, smolts., *Aquacult. Nutr.*, 3: 239~246.
- Andersen, F., Lysen, B., Maage A., et al., 1998, Interaction between two dietary levels of iron and two forms of ascorbic acid and the effect on growth, antioxidant status and some non-specific immune response parameters in Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts, *Aquaculture* 61, 437~451.
- Bell, J. G., Cowey, C. B., Adron J. W., et al., 1985, Some effects of vitamin E and selenium deprivation on tissue enzyme levels and indices of tissue peroxidation in rainbow trout (*Salmo gairdneri*), *Br. J. Nutr.*, 53: 149~157.
- Bell, J. G., Cowey, C. B., Adron J. W., et al., 1987, Some effects of selenium deficiency on enzyme activities and indices of tissue peroxidation in Atlantic salmon parr (*Salmo salar*), *Aquaculture*, 65: 43~54.
- Bemtssen, M. H. G., Lundebye A. K., Maage, A., 1999, Effect of elevated dietary copper concentrations on growth, feed utilisation and nutritional status of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fry, *Aquaculture*, 174, 167~181.
- Castell J. D., Conklin, D. E., Craigie J. S., et al., 1986, In: "Realism in Aquaculture: Achievements, Constraints, Perspectives" (Bilo, M., Rosenthal H. and Sindermann, C. eds.), European Aquaculture Society, Belgium, 251~308.
- Chesters J. K., 1991, Trace element-gene interactions with particular reference to zinc, *Proc. Nutr. Soc.*, 50: 123~129.
- Clark, J., MacDonald, N. L. and Stark, J. R., 1987, Leucine aminopeptidase in the digestive tract of Dover sole *Solea solea* (L.), *Aquaculture*, 61: 231~239.
- Combs G. F. and Combs S. B., 1986, Biochemical functions of selenium. In: "The Role of Selenium in Nutrition", Academic Press, Toronto, 206~265.
- DeBoeck, G., Vlaeminck, A., Blust, R., 1997, Effects of sublethal copper exposure on copper accumulation, food consumption, growth, energy stores, and nucleic acid content in common carp, *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 33: 415~422.
- Desjardins, L. M., 1985, The effect of iron supplementation on diet rancidity and on the growth and physiological response of rainbow trout. M. Sc. Thesis, The University of Guelph, Ontario, 174.
- Desjardins, L. M., Hicks, B. and Hilton, J. W., 1987, Iron catalysed oxidation of trout diets and its effect on the growth and physiological response of rainbow trout, *Fish Physiol. Biochem.*, 3: 173~182.
- Gatlin, III, D. M. and Wilson, R. P., 1983, Dietary zinc requirement of fingerling channel catfish, *J. Nutr.*, 113: 630~635.
- Gatlin, III, D. M. and Wilson, R. P., 1984a, Zinc supplementation of practical channel catfish diets, *Aquaculture*, 41,

31~36

- Gatlin, III D. M. and Wilson, R. P., 1984b, Studies on the manganese requirement of fingerling channel catfish, *Aquaculture*, 41: 85~92.
- Gatlin, III D. M. and Wilson, R. P., 1984c, Dietary selenium requirement of fingerling channel catfish, *J. Nutr.*, 114: 627~633.
- Gatlin, III D. M. and Wilson, R. P., 1986a, Characterization of iron deficiency and the dietary iron requirement of fingerling channel catfish, *Aquaculture*, 52: 191~198.
- Gatlin, III D. M. and Wilson, R. P., 1986b, Dietary copper requirement of fingerling channel catfish, *Aquaculture*, 54: 277~285.
- Gregory, L. A. and Eales, J. G., 1975, Factors contributing to high levels of plasma iodide in brook trout, *Salvelinus fontinalis* (Mitchill), *Can. J. Zool.*, 53: 267~277.
- Hertz, Y., Madar, Z., Hepper, B., et al., 1989, Glucose metabolism in the common carp (*Cyprinus carpio* L.); the effects of cobalt and chromium, *Aquaculture*, 76: 255~267.
- Hilton, J. W., Hodson, P. V. and Slinger, S. J., 1980, The requirement and toxicity of selenium in rainbow trout (*Salmo gairdneri*), *J. Nutr.*, 110: 2527~2535.
- Hilton, J. W., 1989, The interaction of vitamins, minerals and diet composition in the diet of fish, *Aquaculture*, 79: 223~244.
- Hilton, J. W. and Hodson, P. V., 1983, Effect of increased dietary carbohydrate on selenium metabolism and toxicity in rainbow trout (*Salmo gairdneri*), *J. Nutr.*, 113: 1241~1248.
- Hodson, P. V. and Hilton, J. W., 1983, The nutritional requirements and toxicity to fish of dietary and waterborne selenium, *Ecol. Bull.*, 35: 335~340.
- Hughes, S. G., 1985, Nutritional eye diseases in salmonids: a review, *Prog. Fish Cult.*, 47: 81~85.
- Hunn, J. B. and Frømm, P. O., 1966, In vivo uptake of radioiodide by rainbow trout, *J. Water Pollut. Contr. Fed.*, 38: 1981~1985.
- Ikeda, Y., Ozaki, H. and Vematsu, K., 1973a, Effect of enriched diet with iron in culture of yellowtail, *J. Tokyo Univ. Fish.*, 59: 91~99.
- Ikeda, Y., Ozaki, H. and Yasuda, H., 1973b, Effects of potassium iodide on growth of body and scale in goldfish, *J. Tokyo Univ. Fish.*, 59: 333~342.
- Ishaq, M. M. and Dollar, A. M., 1968, Studies on manganese uptake in *Tilapia mossambica* and *Salmo gairdneri*. I. Growth of *Tilapia mossambica* in response to manganese, *Hydrobiologia*, 31: 572~584.
- Kawatsu, H., 1972, Studies on the anemia of fish. V. Dietary iron deficient anemia in brook trout, *Salvelinus fontinalis*, *Bull. Freshwater Fish. Res. Lab.*, 22: 59~67.
- Ketola, H. G., 1979, Influence of dietary zinc on cataracts in rainbow trout (*Salmo gairdneri*), *J. Nutr.*, 109: 965~969.
- Kiron, V., Gunji, A., Okamoto, N., Satoh, S., et al., 1993, Dietary nutrient dependent variations on natural killer activity of the leucocytes of rainbow trout, *Fish Pathol.*, 28: 71~76.
- Knox, D., Cowey, C. B. and Adron, J. W., 1981, The effect of low dietary manganese intake on rainbow trout (*Salmo gairdneri*), *Br. J. Nutr.*, 46: 495~501.
- Lall, S. P., 1989, The minerals. In: J. E. Halver (Editor). *Fish Nutrition*, 2nd edn. Academic Press, New York, 219~257.
- Lanno, R. P., Slinger, S. J. and Hilton, J. W., 1985, Maximum tolerable and toxicity levels of dietary copper in rainbow trout *Salmo gairdneri* Richardson, *Aquaculture*, 49: 257~268.
- Lim, C., Klesius, P. H., 1997, Responses of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) fed iron deficient and replete diets to *Edwardsiella ictaluri* challenge, *Aquaculture*, 157: 83~89.
- Lim, C., Klesius, P. H., Li, M. H., et al., 2000, Interaction between dietary levels of iron and vitamin C on growth

- hematology, immune response and resistance of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) to *Edwardsiella ictaluri* challenge. *Aquaculture*, 185: 313~327.
- Lim, C., Sealey, W. M., Klesius, P. H., 1996, Iron methionine and iron sulfate as sources of dietary iron for channel catfish *Ictalurus punctatus*. *J. World Aquacult. Soc.*, 27: 290~296.
- Lovell, R. T., 1979, Formulating diets for aquaculture species. *Feedstuffs*, 51: 29~32.
- Lorentzen, M., Maage, A., Julshamn, K., 1998, Supplementing copper to a fish meal based diet fed to Atlantic salmon parr affects liver copper and selenium concentrations. *Aquacult. Nutr.*, 4: 67~77.
- Murai, T., Andrews, J. W. and Smith, R. G. Jr., 1981, Effects of dietary copper on channel catfish. *Aquaculture*, 22: 353~357.
- Ogino, C. and Yang, G.-Y., 1980, Requirements of carp and rainbow trout for dietary manganese and copper. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 46: 455~458.
- Paripatananont, T., Lovell, R. T., 1997, Comparative net absorption of chelated and inorganic trace mineral in channel catfish *Ictalurus punctatus* diets. *J. World Aquacult. Soc.*, 28: 62~67.
- Phillips, A. M., Podilak, H. A., Livingston, D. L., et al., 1960, Metabolism of trace levels of dietary cobalt by brook trout. *Fish. Res. Bull. N. Y.*, 23: 36~46.
- Poppe, T. T., Hastein, T., Froeslie, A., et al., 1986, Nutritional aspects of haemorrhagic syndrome ('Hitra Disease') in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Dis Aquat. Organisms*, 1: 155~162.
- Poston, H. A. and Combs, G. F., 1979, Interrelationships between requirements for dietary selenium, vitamin E, and L-ascorbic acid by Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed a semipurified diet. *Fish Health News*, 8(4): 5~7.
- Poston, H. A., Combs, G. F. and Leibovitz, L., 1976, Vitamin E and selenium interrelations in the diet of Atlantic salmon (*Salmo salar*): gross histological and biochemical signs. *J. Nutr.*, 106: 892~904.
- Roeder, M. and Roeder, R. H., 1966, Effect of iron on the growth rate of fishes. *J. Nutr.*, 90: 86~90.
- Roginski, E. E. and Mertz, W., 1977, A biphasic response of rats to cobalt. *J. Nutr.*, 107: 1537~1542.
- Romanenko, V. D., 1984, Metabolic aspects of warmwater culture of the carp, *Cyprinus carpio* L. *Aquaculture*, 38: 307~314.
- Sakamoto, S. and Yone, Y., 1978a, Requirement of red seabream for dietary iron-II. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 44: 223~225.
- Sakamoto, S. and Yone, Y., 1978b, Iron deficiency symptoms of carp. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 44: 1157~1160.
- Sakamoto, S. and Yone, Y., 1979, Availabilities of three iron compounds as dietary iron sources for red seabream. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 45: 231~235.
- Sato, S., Yamamoto, H., Takeuchi, T., et al., 1983a, Effects on growth and mineral composition of rainbow trout on deletion of trace elements or magnesium from fish meal diet. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 49: 425~429.
- Sato, S., Yamamoto, H., Takeuchi, T., et al., 1983b, Effects on growth and mineral composition of carp on deletion of trace elements or magnesium from fish meal diet. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 49: 431~435.
- Sato, S., Takeuchi, T., Nabe, Y., et al., 1983c, Effects of deletion of several trace elements from fish meal diets on growth and mineral composition of rainbow trout fingerlings. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 49: 1909~1916.
- Sato, S., Tabata, K., Izumi, K., et al., 1987, Effect of dietary tricalcium phosphate on availability of zinc to rainbow trout. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 53: 1199~1205.
- Sato, S., Izumi, K., Takeuchi, T., et al., 1989, Availability to carp of manganese contained in various types of fish meals. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 55: 313~319.
- Segner, H. and Storch, V., 1985, Influence of water-borne iron on the live of *Poecilia reticulata* (Peters 1859). *Z. Angew. Ichthyol.*, 1: 39~47.
- Shiau, S. Y. and Lin, S.-F., 1993, Effect of supplemental dietary chromium and vanadium on the utilization of different carbohydrates in tilapia *Oreochromis niloticus* × *O. aureus*. *Aquaculture*, 110: 321~330.
- Spray, D. J., Hodson, P. V. and Wood, C. M., 1988, Relative contributions of dietary and waterborne zinc in the

- rainbow trout, *Salmo gairdneri*. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 45: 32~41.
- Srivastava A. K. and Agrawal S. J., 1983, Changes induced by manganese in fish testis. *Experientia*, 39: 1309~1310.
- Sugiura S. H. G., Dong, F. M., Rathbone, C. K., et al., 1998, Apparent protein digestibility and mineral availability, in various feed ingredients for salmonid feeds. *Aquaculture*, 159: 177~202.
- Syed, M. A. and Coombs T. L., 1982, Copper metabolism in the plaice *Pleuronectes platessa* (L.). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 63: 281~286.
- Van Dijk, J. P., Lagerwerf, A. J., van Eijk, H. G., et al., 1975, Iron metabolism in the tench (*Tinca tinca* L.). I. Studies by means of intravascular administration of ^{59}Fe (III) bound to plasma. *J. Comp. Physiol.*, 99: 321~330.
- Watanabe T., Satoh, S. and Takeuchi, T., 1988, Availability of minerals in fishmeal to fish. *Asian Fish. Sci.*, 1: 175~195.
- Woodall A. N. and La Roche, G., 1964, Nutrition of salmonid fishes. XI. Iodine requirements of chinook salmon. *J. Nutr.*, 82: 475~482.
- Yamamoto, H., Satoh, S., Takeuchi, T., et al., 1983, Effects on rainbow trout of deletion of manganese or trace elements from fish meal diet. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 49: 287~293.

REVIEW ON THE TRACE MINERALS IN FISH NUTRITION^{*}

LIU Jingke, CHEN Xiaolin

(*Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences*)

Abstract

This paper deals with the trace minerals in fish nutrition. Iron, copper, manganese, zinc and selenium as components of body fluids, cofactors in enzymatic reactions, and structural units of non-enzymatic macromolecules, are essential trace minerals in fish nutrition. The importance of trace minerals as essential ingredients in diets, although in small quantities, is also evident in fish.

^{*} Contribution No. 4447 from the Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences.