

综述

doi: 10.7541/2016.84

饲料油脂氧化对养殖鱼类生长及健康的危害

陈拥军^{1,2} 林仕梅¹ 罗莉¹ 李云¹

(1. 西南大学动物科技学院, 水产科学重庆市市级重点实验室, 重庆 400715; 2. 西南大学生命科学学院, 淡水鱼类资源与生殖发育教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 水产养殖成功与否, 除取决于遗传、环境及养殖管理外, 还与水产饲料的质量(营养素含量、营养素平衡和原料品质)息息相关。与畜禽饲料相比, 水产饲料的一大典型特征为富含多不饱和脂肪酸(PUFAs)。在饲料生产加工、储存和运输过程中, 饲料中的PUFAs极易发生自由基链式反应, 产生一系列有害的氧化产物。摄食氧化油脂后, 养殖鱼类的摄食、生长性能、营养物质消化吸收、骨骼发育、肌肉品质和体表色素沉积等均会遭受不利影响, 鱼类的生产性能和健康状态面临严峻威胁。文章总结了饲料油脂氧化对养殖鱼类生长性能及健康状态的危害, 概述了油脂氧化产物的产生过程, 剖析了脂肪氧化产物对动物组织细胞的危害机理, 指出了现有研究所忽略的问题, 并对未来相关研究提出了展望。

关键词: 饲料; 脂肪氧化; 鱼类; 生长; 健康危害

中图分类号: S965.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2016)03-0624-10

油脂在水产动物中的作用具有“二重性”: 一方面, 油脂具有能量供给与储存、提供必需脂肪酸、促进脂溶性维生素的吸收与转运等重要生理功能^[1]; 另一方面, 油脂中多不饱和脂肪酸(PUFAs)的非共轭双键极不稳定, 在热、光、氧、金属离子等的诱导下, 容易发生脂质过氧化反应, 产生一系列有害的初级和次级氧化产物^[2]。

现有研究数据表明, 饲料中脂质过氧化会削弱油脂的营养价值^[3, 4]。摄食氧化油脂后, 养殖鱼类摄食量下降^[5, 6], 生长受阻, 营养素消化吸收率降低, 饲料利用效率下降^[7-9]。摄食氧化油脂还会危害鱼类的生长发育, 导致骨骼畸形^[3, 4]、肝组织变性^[10]、肌肉萎缩^[11]、贫血和溶血^[12]等一系列病理症状。

油脂氧化对鱼类的危害程度受鱼种、生长阶段、油脂种类、诱导油脂氧化的方式、饲料组成、试验周期等因素影响^[12-14], 然而至今仍无文献予以分析总结。因此, 本文概述了油脂氧化产物的

产生过程以及这些氧化产物对动物组织细胞的危害机理, 详细总结了摄食氧化油脂对鱼类生长及健康的危害, 以为为养殖鱼类的病症诊断和饲料配制提供参考。

1 油脂的氧化酸败

1.1 油脂氧化与氧化产物

PUFAs中位于非共轭顺式双键间的亚甲基很不稳定, 极易失去氢原子而形成以碳原子为中心的自由基(R·)^[15]。R·与分子氧(O₂)作用形成过氧自由基(ROO·), 这种氧化反应的发生较为缓慢, 取决于底物浓度。若ROO·的过氧自由基位于碳链双键的末端, 它将被还原成结构最简单的初级氧化产物(氢过氧化物ROOH)^[16]。若ROO·的过氧自由基位于顺式双键之间的亚甲基上, 则会发生分子内环化, 形成环状化合物。在O₂参与下, 环状化合物被继续氧化生成环状的ROOH。当不存在金属离子时, ROOH相对稳定; 但存在金属离子时, ROOH易被氧

收稿日期: 2015-11-03; 修订日期: 2016-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(31502181); 中国博士后科学基金面上资助(2015M582505); 重庆市项目博士后(Xm2015045)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (31502181); China Postdoctoral Science Foundation (2015M582505); Chongqing Postdoctoral Science Special Foundation (Xm2015045)]

通信作者: 陈拥军(1986—), 男, 博士, 讲师; 研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail: joy616722@hotmail.com

化成烷氧自由基, 并诱发变构、重排、环化、裂解断裂等反应, 形成一系列结构复杂的氧化产物^[17]。与结构复杂且不稳定的初级氧化产物相比, 油脂的次级氧化产物分子量小且较稳定, 主要包括以下三类: 酮醛(如丙二醛, MDA), 羟基醛(如4-羟基-壬烯醛, 4-HNE)以及2-稀醛^[18]。

1.2 影响油脂氧化及氧化产物的因素

一般来讲, 富含PUFAs的油脂(如鱼油、亚麻籽油、菜油、葵花籽油等)比饱和度高的油脂(如猪油)更易氧化。当饲料(油脂)暴露在高温、潮湿、阳光暴晒的环境中或存在变价金属离子(Fe、Cu、Cr、Mn等)时, 会加速PUFAs的氧化变质^[17]。

油脂氧化产物的组成同样会受到油脂种类影响, 如4-HNE主要来源于n-6 PUFAs的氧化分解, 而MDA则主要来自n-3 PUFAs的氧化分解^[19]。另外, 油脂氧化产物的组成还会受到氧化诱导因子的影响, 如分子氧诱导的氧化以初级氧化产物为主, 而高温诱导的氧化则以次级氧化产物为主^[13, 20]。

1.3 评定油脂氧化酸败的指标

油脂氧化酸败后, 其物理性状和化学性状均会发生改变。葵花籽油历经氧化酸败后, 其呈色中黄色和红色增强^[13]; 而鱼油氧化变质后, 其呈色中黄色所占比例增加, 鱼腥味减弱^[10]。评定油脂氧化酸败的常见指标有过氧化值(POV)、酸价(AV)、碘价(IV)、硫代巴比妥酸值(TBARS)、*p*-茴香胺值(*p*-AnV)、共轭二烯值(E232)、共轭三烯值(E268)和极性化合物含量(TPC)等^[3, 13, 21]。其中, POV和AV反映了油脂初级氧化产物的含量, TBARS和*p*-AnV分别反映油脂次级氧化产物中醛基和酮基化合物的含量, IV、E232和E268均反映了油脂的不饱和程度。一般来讲, 油脂氧化酸败后, 除IV值升高外, 上述其他评价指标的数值均会下降。任何一个评判指标都有其优势和局限性, 通常要结合多个指标来判定某种油脂的新鲜度和酸败状况^[22]。

2 饲料油脂氧化对养殖鱼类健康的危害

2.1 油脂氧化削弱饲料的营养价值

脂肪酸氧化酸败会改变油脂的脂肪酸组成, 降低油脂中还还原性维生素的含量, 进而削弱饲料的营养价值。Fontagné等^[3]发现: 与添加8%新鲜鱼油相比, 添加8%氧化鱼油后, 饲料的饱和脂肪酸含量增加了39.4%, 而维生素A和n-3 PUFAs含量分别下降了97.1%和49.1%。n-3 PUFAs中, 二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA)的含量分别下降了64.7%和70%^[3]。Lewis-McCrea和Lall^[4]报道, 饲料

中新鲜鱼油被氧化后(POV: 93.4 meq/kg), 其n-3 PUFAs的含量(尤其是EPA的含量)明显下降。

2.2 饲料油脂氧化导致鱼类生长性能下降

一般来讲, 饲料油脂氧化酸败会导致养殖鱼类采食量下降。但是, 不同鱼种对氧化油脂的辨别能力不尽相同: 饲料中油脂氧化会降低大西洋鲑(*Salmo salar*)^[8, 23]和奥尼罗非鱼(*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*)^[5]的摄食量, 却不影响大西洋庸鲈(*Hippoglossus hippoglossus*)^[24]、海鲷(*Sparus aurata*)^[24]和牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)^[25]的摄食。即便同一鱼种, 不同研究的结论也不一致。Smith^[26]报道, 虹鳟(*Salmo gairdneri*)摄食酸败油脂后采食量下降, 但后续研究却报道虹鳟的摄食量不受饲料油脂氧化影响^[27]。Gao等^[6]报道饲料中添加氧化鱼油会导致花鲈(*Lateolabrax japonicus*)的摄食量下降, 但王珺等^[28]报道, 饲料中鱼油氧化反而会促进花鲈摄食。同样, Chen等^[10]报道, 饲料中添加氧化鱼油促进了大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)摄食, 而在后续研究中却发现饲料中鱼油氧化并不影响大口黑鲈摄食^[29]。不同鱼种甚至同一鱼种的试验结果相互矛盾, 原因可能与不同研究中的鱼体生理状况、生长阶段、试验周期、油脂的氧化酸败程度、养殖环境及饲料组成不同有关^[12-14]。

除了影响鱼类摄食, 饲料中油脂氧化还会削弱营养素的消化吸收率, 进而降低饲料效率和生长性能。长吻鲢(*Leiocassis longirostris*)摄食氧化鱼油后, 饲料干物质、蛋白质和脂肪的表现消化率不受影响, 但能量的表现消化率下降^[9]; 斑点叉尾鲷(*Ictalurus punctatus*)摄食氧化鱼油后, 饲料干物质、蛋白和能量的表现消化率均下降^[30]。鲤鱼(*Cyprinus carpio*)摄食氧化豆油后其饲料效率下降, 生长受阻^[31], 类似研究结果在非洲鲶(*Clarias gariepinus*)^[7]、奥尼罗非鱼^[5]、大西洋鲑^[8]、草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)^[32]和团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)^[33]中也有所报道。

如前所述, 油脂氧化会削弱饲料的营养价值, 势必会导致鱼类出现必需脂肪酸(如EPA、DHA)和维生素(如维生素A、维生素E)缺乏症, 危害鱼类的生长发育和存活。Lewis-McCrea和Lall^[4]采用含不同氧化度鱼油(POV: 7.5和15 meq/kg)的饲料饲喂大西洋庸鲈14周后, 新鲜鱼油组、POV7.5组和POV15组脊柱侧凸症的发生率分别为4.3%、29.1%和30.1%, 脊柱前弯症的发生率分别为0、19.2%和13.0%。Fontagné等^[3]采用含POV为245 meq/kg的氧化鱼油饲料, 饲喂西伯利亚鲟(*Acipenser*

baeri) 稚鱼27d后, 死亡率高达61%, 脊柱畸形率达25%。此外, 饲料油脂氧化还会导致许多其他鱼种的存活率下降^[3, 10, 11, 24, 34—37]。

总的来讲, 饲料油脂氧化可通过对摄食量、饲料(原料)的消化率和鱼类生长发育产生负面影响, 导致鱼类生产性能下降。现有研究结果显示, 饲料中油脂氧化会削弱绝大多数试验鱼种的生长性能(表1), 但也有少数鱼种如海鲈(*Dicentrarchus labrax*)^[12]和海鲷^[24]的生长不受影响, 甚至部分鱼种更偏爱摄食氧化油脂, 导致其生长性能反而优于新鲜油脂组^[10, 28]。但是, 这种由于“偏爱摄食氧化油脂而促进生长”的现象, 很可能随着试验周期的延长而消失, 最终导致生长受阻。在实际生产中, 相比油脂氧化导致摄食量下降的鱼类, 更应注重对酸败油脂有良好摄食的鱼类, 因为它们会摄入更多的油脂氧化产物, 其生长发育、健康及存活将面临更大的威胁。

2.3 饲料油脂氧化导致鱼类抗氧化防御崩溃

目前, 有关油脂氧化对鱼类组织器官抗氧化防御影响的研究, 主要集中于肝脏、肌肉和血液。摄食氧化油脂后, 绝大多数鱼类会出现组织氧化应激, 表现为血浆、肝脏和肌肉的MDA含量上升(表1)。体内MDA的积累是来自于肠道对次级氧化产物的吸收^[38], 还是来自次级氧化产物的毒副作用导致的内源性MDA积累, 或这两方面都存在, 目前仍无定论^[39]。另外, MDA不仅仅是PUFAs过氧化的分解产物, 还是前列腺素和凝血噁烷合成代谢的副产物之一^[40]。目前, 摄食氧化油脂是否会影响鱼类的前列腺素和凝血噁烷的合成代谢, 而导致MDA积累还未有研究涉及。

Tocher等^[24]比较了大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)、大西洋庸鲽和海鲷的抗氧化防御体系对饲料中鱼油氧化的响应, 结果发现: 大西洋庸鲽的抗氧化防御不受氧化鱼油添加影响, 而海鲷和大菱鲆肝脏的过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)、谷胱甘肽硫转移酶(GST)和谷胱甘肽还原酶(GR)活性增加。摄食氧化油脂会导致组织或血清抗氧化酶活性增加这一研究结果还在奥尼罗非鱼^[5]、大口黑鲈^[10]、虹鳟^[14]、花鲈^[28]、大黄鱼(*Pseudosciaena crocea*)^[41]和黄鲷鱼(*Seriola quinqueradiata*)^[42]中有所报道。但是, 鲤鱼摄食含POV为264 meq/kg的氧化鱼油后, 其肝脏的SOD和GPX活性下降^[11]。一般来讲, 摄食氧化油脂后, 氧化产物起初会刺激鱼类组织细胞的抗氧化防御, 表现为维生素E和还原性谷胱甘肽(GSH)的消耗^[10]、抗氧化酶基因表达上调及抗氧化

酶活性上升^[14]。然而, 遭受持续压倒性的氧化应激后, 鱼类组织细胞的抗氧化防御将不堪重负, 表现为还原性物质的枯竭和抗氧化酶活性的下降。

鱼类摄食氧化油脂后, 其胃肠道是最先接触氧化产物的组织, 但关于油脂氧化对鱼类胃肠道结构、抗氧化防御、消化酶活性及肠道微生物群落变化的研究仍然十分缺乏。直到最近, 才有少量报道初步评估了氧化油脂对鲤鱼肠黏膜结构、肠道炎症反应和微生物群落结构的影响^[43]以及MDA对草鱼肠上皮细胞的生长、形态和亚显微结构的影响^[44]。叶元土等^[45]比较灌喂新鲜鱼油和氧化鱼油的草鱼肠黏膜的转录组数据后发现, 氧化鱼油组草鱼肠黏膜细胞的胆固醇和胆汁酸的合成代谢通路相关基因上调。

一方面, 鱼类摄食氧化油脂后, 其胃肠道的结构、抗氧化防御和微生物菌群的变化仍需进一步探讨; 另一方面, 鱼类胃肠道对油脂氧化产物的吸收、转运及代谢也亟需开展研究。只有明晰了油脂氧化产物在鱼体组织细胞的代谢动向, 才有可能阐明氧化产物对鱼类组织细胞的结构、抗氧化防御和营养素利用的危害机制。

2.4 饲料油脂氧化导致鱼类组织病变

摄食氧化油脂会引起虹鳟^[27]和黄鲷鱼^[42]肌肉组织变性、萎缩、肌纤维坏死。鲤鱼摄食酸败油脂后, 体色变黑, 眼球凹陷, 肌肉营养不良, 并出现典型的瘦背症^[11]。摄食酸败油脂会导致斑点叉尾鲷出现以瘦背病、渗出性素质和脱色素三种症状为特征的综合症^[46]。

作为机体的脂肪代谢中心和解毒中心, 肝脏极易遭受脂肪氧化带来的氧化损伤。任泽林等^[47]采用含POV分别为59、119、160、189、332和368 meq/kg的氧化鱼油饲料, 饲喂60 g的鲤鱼9周, 结果发现, POV59试验组肝体比(HSI)、肾体比(KSI)和脾体比(SSI)增加, 随着鱼油POV的上升这种趋势受到抑制。Sakaguchi和Hamaguchi^[48]报道, 黄鲷鱼摄食氧化油脂后, 在前66d肝脏以增生为主, 而后氧化产物对肝脏的破坏作用超过增生作用, 肝组织出现萎缩。斑点叉尾鲷摄食氧化鱼油86d后, HSI显著下降^[30]。饲料油脂氧化导致的养殖鱼类肝脏肿大或萎缩往往伴随着肝细胞脂滴积累和空泡化^[10], 肝细胞膜流动性下降^[29], 蜡样物质积累^[48]。除肝组织外, 摄食氧化油脂还会导致鱼类肾脏、胰腺、心脏等组织产生明显病变^[11]。

此外, 血细胞对脂肪氧化带来的氧化应激亦特别敏感。摄食酸败油脂往往会导致养殖鱼类出现贫血和(或)溶血症状。海鲈摄食氧化油脂后, 血液

的血细胞压积(HCT)降低, 红细胞数目下降, 血细胞 渗透脆性(EOF)上升^[12]; 大口黑鲈摄食酸败鱼油后,

表 1 摄食氧化油脂对养殖鱼类生长和生理病理特征的影响

Tab. 1 Effects of dietary oil oxidation on the growth, physiological and pathological features of fish

鱼种 Fish species	拉丁名 Latin name	初始体重 IBW (g)	实验周期 Duration (d)	脂肪源 Oil source	氧化方式 Oxidizing agent	病理生理症状 Pathophysiological response	文献 Reference
奥尼罗非鱼	<i>Oreochromis niloticus</i> × <i>O. aureus</i>	0.41	50	鱼油: 豆油=1:1	室温曝气	生长↓, 摄食量↓, 饲料效率↓, 肝脏抗氧化酶活性↑, 肌肉 n-3 PUFAs↓	[5]
斑点叉尾鲷	<i>Ictalurus punctatus</i>	4.08	86	鱼油	60℃充气、搅拌	生长↓, 死亡率↑, 饲料效率↓, 干物质、蛋白和能量消化率↓, 肝组织和肾组织变性(线粒体空泡化)	[30]
斑点叉尾鲷	<i>I. punctatus</i>	14	112	鱼油	100℃充气	生长↓, 贫血, 肌肉营养不良, 脂肪肝	[46]
草鱼	<i>Ctenopharyngodon idella</i>	74.82	72	鱼油	80℃、Fe ³⁺ 、Cu ²⁺ 、H ₂ O ₂ 、H ₂ O	生长↓, 饲料效率↓, 肌肉PUFAs↓	[32]
大黄鱼	<i>Pseudosciaena crocea</i>	7.82	70	鱼油	50℃充气、搅拌	生长↓, 摄食量↓, 血清抗氧化酶活性↑, 血清MDA↑	[28, 41]
大口黑鲈	<i>Micropterus salmoides</i>	5.12; 6.35	84	鱼油	50℃充气	死亡率↑, 鳍条基部充血, 贫血, 肝组织变性, 肝脏抗氧化酶活性↑, 血浆、肝脏和肌肉维生素E↓, 肝细胞膜流动性↓, 血浆和肌肉MDA↑	[10, 29]
大菱鲆	<i>Scophthalmus maximus</i>	0.95	600	鱼油	50℃充气	生长↓, 死亡率↑, 肝脏抗氧化酶活性↑, 肝脏MDA↑	[24]
大菱鲆	<i>S. maximus</i>	85	270	/	/	死亡率↑, 头肾吞噬细胞吞噬活性↓	[34]
大西洋鲑	<i>Salmo salar</i>	266	52	鱼油或菜油	40℃充气	生长↓	[23]
大西洋鲑	<i>S. salar</i>	837	9	鱼油	室温充气、搅拌	血浆、后肠、肝脏和肌肉MDA↑	[39]
大西洋鲑	<i>S. salar</i>	64.7	126	鱼油	Fe ³⁺ (1 g/kg)	生长↓, 饲料效率↓, 摄食量↓, 溶血, 肌肉维生素E↓, 肌肉EPA和DHA↓	[8]
大西洋鳕	<i>Gadus morhua</i>	54.9	63	鱼油	55—60℃充气	溶血, 肝脏维生素E↓, 肝脏MDA↑, 肌肉EPA和DHA↓	[36]
大西洋庸鲽	<i>Hippoglossus hippoglossus</i>	4.5	98	鱼油	50℃充气、搅拌	脊柱畸形, 肝脏MDA↑, 脊椎骨灰分↓, 肌肉n-6 PUFAs↓	[4]
大西洋庸鲽	<i>H. hippoglossus</i>	0.31	600	鱼油	50℃充气	生长↓, 死亡率↑, 肝脏MDA↑	[24]
非洲鲶	<i>Clarias gariepinus</i>	15	56	鱼油: 玉米油=1:1	22℃充气	生长↓, 饲料效率↓, 贫血, 血浆维生素E↓	[7]
海鲷	<i>Sparus aurata</i>	1.52	600	鱼油	50℃充气	肝脏抗氧化酶活性↑	[24]
海鲈	<i>Dicentrarchus labrax</i>	78; 250	161	鱼油	室温充气	骨骼畸形, 贫血, 溶血, 肝脏和肌肉MDA↑	[12]
黑鲷	<i>Acanthopagrus schlegelii</i>	18.5	63	鱼油	50℃充气	生长↓, 死亡率↑, 肝脏维生素E↓, 肝脏MDA↑	[37]
虹鳟	<i>Salmo gairdneri</i>	2.0	168	鱼油	室温充气	死亡率↑, 溶血, 血浆和肝脏维生素E↓	[27]
虹鳟	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	0.06; 1.5	28	鱼油	50℃充气	生长↓, 肝脏抗氧化酶活性↑, 全鱼维生素E↓, 全鱼MDA↑	[14]
花鲈	<i>Lateolabrax japonicus</i>	1.7	50	鱼油	70℃充气	生长↓, 摄食量↓, 死亡率↑, 肌肉 n-3 PUFAs↓	[6]
花鲈	<i>Lateolabrax japonicus</i>	8.01	84	鱼油	50℃充气、搅拌	生长↓, 摄食量↑, 死亡率↑, 血清抗氧化酶活性↑, 肝脏MDA↑	[28]
黄尾鲷	<i>Seriola quinqueradiata</i>	166	30	鱼油	50℃充气	肝脏抗氧化酶活性↑, 肝脏维生素E↓, 肝脏MDA↑	[42]
鲤鱼	<i>Cyprinus carpio</i>	60	112	鱼油	室外暴晒	生长↓, 死亡率↑, 贫血, 渗出性素质, 肌肉营养不良, 肝脏和肾脏变性, 肝脏抗氧化酶活性↓, 血浆维生素E↓, 血浆MDA↑	[11]
鲤鱼	<i>C. carpio</i>	6.22	56	豆油	37℃搅拌、Fe ³⁺ 、Cu ²⁺ 、H ₂ O ₂	生长↓, 肠道炎症与变性	[43]
团头鲂	<i>Megalobrama amblycephala</i>	31	56	豆油	80℃、Fe ³⁺ 、Cu ²⁺ 、H ₂ O ₂ 、H ₂ O	生长↓, 饲料效率↓, 贫血, 肝脏抗氧化酶活性↓, 肝组织变性	[33]
瓦氏黄颡鱼	<i>Pelteobagrus vachelli</i>	1.47	56	鱼油	50℃充气、搅拌	生长↓, 背部皮肤亮度↓	[53]
西伯利亚鲟	<i>Acipenser baeri</i>	0.03	28	鱼油	50℃充气	生长↓, 死亡率↑, 脊柱畸形, 全鱼MDA↑	[3]
牙鲆	<i>Paralichthys olivaceus</i>	1.1	60	鱼油	70℃充气	肝脏维生素C和维生素E↓, 肝脏MDA↑	[25]
长吻鲢	<i>Leiocassis longirostris</i>	13.1	61	鱼油	50℃充气、搅拌	能量消化率↓, 尾鳍黑色素含量↓	[9]
真鲷	<i>Pagrus major</i>	4.89	35	鱼油	/	生长↓, 死亡率↑, 肝脏MDA↑	[35]
真鲷	<i>P. major</i>	3.4	50	鱼油	70℃充气	肝脏维生素E↓, 心脏维生素C↓, 肝脏MDA↑, 肌肉EPA和DHA↓	[51]

注: “d”表示“天”; “↑”表示“上升”; “↓”表示“下降”; “IBW”为“initial body weight”; “/”表示“未提供”

全血血红蛋白含量虽不受影响,但HCT降低^[10];摄食氧化油脂后,大西洋鳕(*Gadus morhua*)全血的HCT不受影响,但其EOF增加^[36]。饲料油脂氧化除直接危害血细胞的功能外,还可通过加速鱼体内的维生素E消耗,间接导致贫血或溶血症状^[10]。当维生素E缺乏时,大西洋鳕全血的血红蛋白含量降低,红细胞体积变小,红细胞数量下降,未成熟红细胞的比例增加^[49]。

2.5 饲料油脂氧化导致鱼类肌肉品质下降

摄食氧化油脂后,养殖鱼类的肌肉品质如脂肪酸组成、维生素E含量、风味、保质期等均可能遭受不利影响。摄食氧化鱼油后,大西洋庸鲽肌肉的C16:0和C18:0含量上升,饱和脂肪酸含量升高,PUFAs含量下降,以EPA的含量下降最为明显^[4]。大西洋鳕摄食酸败鱼油后,其肌肉的EPA和DHA含量下降^[36]。将肌肉总脂分离成中性和极性脂肪后,含量下降最为明显的是中性脂肪的EPA^[50]。类似地,饲料油脂氧化还会导致许多其他鱼类肌肉的亚麻酸、EPA和DHA等n-3 PUFAs的含量下降^[5,6,8,51]。另外,摄食氧化油脂还会导致大西洋庸鲽肌肉的n-6 PUFAs含量下降^[4]。鲤鱼摄食氧化油脂后,肌肉的维生素E含量下降,下降程度与鱼油的过氧化程度呈现正相关关系;肌肉的挥发性盐基氮(VBN)含量虽不受影响,但肌肉的渗出性损失增加^[52]。

饲料油脂氧化导致鱼类肌肉脂肪酸组成改变,可能原因如下:一是脂质过氧化改变了油脂的营养组成,饲料油脂的脂肪酸组成反映了肌肉的脂肪酸组成^[3];二是油脂氧化可能降低了PUFAs的吸收效率^[35];三是油脂氧化产物MDA被机体吸收,或油脂氧化诱导氧化应激导致鱼体内源性MDA生成,MDA攻击细胞膜的PUFAs,PUFAs发生脂质过氧化而分解,含量下降。

除改变肌肉的脂肪酸组成外,摄食酸败油脂还会改变鱼体其他组织如肝脏的脂肪酸组成^[6,51]。此外,摄食氧化油脂还会导致鱼体皮肤黑色素含量下降^[9]以及背部皮肤亮度下降^[53]。在生产实践中,部分养殖鱼类的体色乃至肌肉颜色发生变化已在我国多地发生,饲料油脂氧化极可能是重要原因。但是,油脂氧化产物通过何种途径调节细胞色素积累仍不清楚,有待进一步研究。

3 油脂氧化产物对养殖鱼类健康的危害机制

3.1 氧化产物影响组织细胞的生长与存活

与初级氧化产物相比,油脂的次级氧化产物分

子量小、稳定、毒副作用大。作为油脂次级氧化产物的典型代表,MDA和4-HNE均具备高度的反应活性。在动物体内,即便在非常低的浓度下,它们也能修饰巯基基团、氨基酸残基(尤其是半胱氨酸、组氨酸、赖氨酸残基)、核酸碱基、及磷脂含氮功能基团,进而消耗机体的还原性物质,影响细胞膜结构的完整性,造成蛋白质功能失活,导致染色体畸变和基因毒性^[16,19]。

在哺乳动物中,对4-HNE危害机制的研究要比MDA的研究更为透彻。越来越多的证据显示:作为氧化应激的媒介,4-HNE与一系列炎症反应相关的人类疾病如动脉粥样硬化、老年痴呆症、帕金森病等的发生密切相关。一般来讲,低浓度的4-HNE会诱导组织细胞增殖,而高浓度的4-HNE会导致细胞凋亡。分子机制上,4-HNE主要通过影响NF- κ B、AP-1、Nrf2等转录因子的表达,激活或抑制酪氨酸激酶受体(RTKs)、丝裂原活化蛋白激酶(MAPK: JNK、p38、ERKs)、丝氨酸/苏氨酸激酶(Akt)、蛋白激酶C(PKC)等信号途径,调节细胞的炎症反应、脱毒反应和蛋白质周转过程,诱导细胞走向增殖或凋亡^[19,54](图1)。

近年来,关于MDA对哺乳动物细胞损伤机制的研究亦逐渐受到重视。研究表明,MDA能激活p38 MAPK信号途径而导致大鼠心室肌细胞收缩障碍^[55];MDA通过调节cAMP/PKA信号途径导致大鼠海马神经元的Ca²⁺内稳态,导致Ca²⁺过量涌入而影响其正常功能^[56];MDA能激活JNK和ERKs信号途径而导致大鼠脑皮质神经元坏死或走向凋亡^[57]。MDA是否能调节RTKs和Akt信号途径而影响哺乳

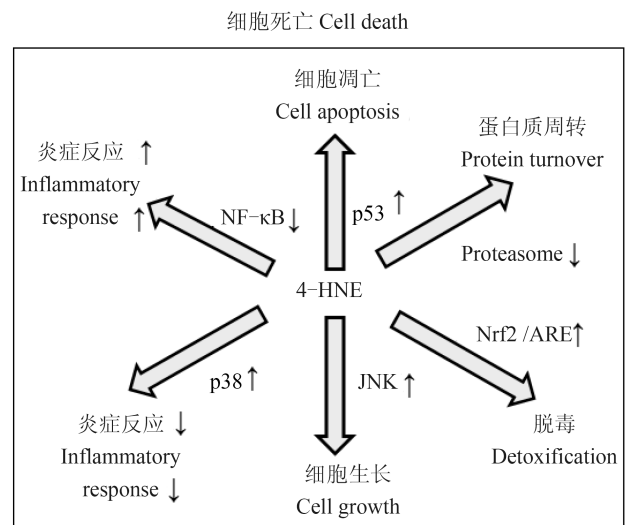


图1 4-HNE引发的生物学效应^[19]

Fig. 1 Biological effects of 4-HNE

动物细胞的正常功能, 还有待进一步验证。考虑到MDA和4-HNE性质的相似性, 它们很可能具备类似的细胞毒理作用机制。在哺乳动物中, 4-HNE和MDA造成的氧化损伤与疾病发生的联系已是现代医学研究的热门领域之一^[54, 58]。

在鱼类中, 针对油脂氧化产物对鱼类组织细胞毒理作用分子机制的研究仍十分缺乏。近几年, 国内学者在草鱼中开展了一些开拓性的工作, 研究目标主要集中于肠道组织^[44, 59]。姚仕彬等^[44]报道, 当培养基中MDA浓度超过1.23 $\mu\text{mol/L}$ 时, 草鱼肠黏膜细胞的生长和存活便会受到抑制, 细胞(器)膜结构遭到破坏, 暗示MDA处理能诱导草鱼肠细胞走向凋亡。同样, 在培养基中添加氧化豆油水溶物后, 草鱼肠细胞的生长、存活与细胞形态的变化结果与MDA处理的结果类似^[59]。考虑到鱼类(尤其是肉食性鱼类)对脂肪的利用能力较强, 在长期的进化过程中, 鱼类对脂肪氧化产物的耐受程度可能比哺乳动物高, 但这仍待进一步验证。

3.2 氧化产物导致抗氧化防御体系崩溃

鱼类具备完善的抗氧化系统, 能抵御机体正常新陈代谢过程所产生的自由基和活性氧。动物体的抗氧化防御体系包含3个层次: 一是内源性抗氧化酶系, 如CAT、SOD、GPX、GST和GR; 二是内源性还原性物质, 如还原性谷胱甘肽(GSH)、NADH、NADPH、巯基机团等; 三是外源摄取的还原性物质如维生素E、维生素C、类胡萝卜素等^[60, 61]。鱼类摄食氧化油脂后, 各种氧化产物首先进入胃肠道, 对胃肠道的抗氧化防御体系构成直接威胁。研究表明, 大鼠摄食亚油酸或甘油三酯氢过氧化物后, 在到达肠道之前, 这些初级氧化产物已被转变成醛类化合物; 仅当大鼠摄入大量的初级氧化产物, 才能在其肠道检测到少量的氢过氧化物^[62, 63]。在鱼类胃肠道中, 是否存在与大鼠一样强健的抗氧化还原体系还不得而知。油脂氧化产物被鱼体细胞吸收后, 细胞处于氧化应激状态, 胞膜磷脂双分子层的维生素E会首先被利用, 以阻断脂质过氧化反应^[64]。由于维生素C能节约维生素的E使用^[65], 细胞内的维生素C也会逐渐被消耗。然后, 细胞内抗氧化酶活性增加, 以消除脂质过氧化所产生的超氧自由基和 H_2O_2 , 细胞内的GSH也同时会被消耗(GPX反应所需)。由于GSH的再生需要NADPH的参与, 细胞内的NADPH亦会被消耗。最终, 细胞内的还原性物质消耗殆尽, 抗氧化体系崩溃, 抗氧化酶活性下降。

4 研究展望

现有研究大多采用加热通气的方式来制备氧化油脂, 这种氧化方式是否能够代表生产实践中多因素(水分、空气、光照、温度交替)诱导的油脂氧化过程, 氧化产物的组成有何差别? 大部分研究所使用的商品油脂, 可能已经添加了相当量的抗氧化剂, 而只有少数报道测定了油脂中抗氧化剂的含量, 如此可能部分掩盖了油脂氧化对鱼类造成的危害。随着时间推移, 饲料油脂氧化的负面影响将会在更多鱼种中得以评定, 评估时需注意以上两方面的因素。另外, 现有研究集中于饲料油脂氧化对养殖鱼类早期生长发育的负面影响, 对亲鱼的繁殖性能乃至子代F1的健康状况少有涉及, 将来需要加强这一方面的研究工作, 以期指导生产实践。

部分研究表明, 饲料油脂氧化会导致摄食量下降、骨骼畸形及死亡率增加, 但是其潜在分子机制仍然未知。是否饲料油脂氧化会影响鱼类大脑中的摄食信号感知, 进而调控摄食? 是否摄食氧化油脂会影响鱼类对钙磷的吸收、沉积和排泄, 而导致成骨细胞与破骨细胞生长紊乱? 摄食氧化油脂如何参与鱼类的免疫调节, 而影响鱼类抗病力? 油脂氧化何以调节细胞的色素积累? 这些问题都亟待解决, 需将营养学、毒理学和分析化学研究方法结合起来, 运用现代分子细胞生物学技术, 予以解答, 并指导实际生产。

参考文献:

- [1] Glencross B D. Exploring the nutritional demand for essential fatty acids by aquaculture species [J]. *Reviews in Aquaculture*, 2009, **1**(2): 71—124
- [2] Frankel E N. *Lipid Oxidation* [M]. Dundee: the Oily Press Ltd. 1998, 13—22
- [3] Fontagné S, Bazin D, Brèque J, *et al.* Effects of dietary oxidized lipid and vitamin A on the early development and antioxidant status of Siberian sturgeon (*Acipenser baeri*) larvae [J]. *Aquaculture*, 2006, **257**(1): 400—411
- [4] Lewis-McCrea L M, Lall S P. Effects of moderately oxidized dietary lipid and the role of vitamin E on the development of skeletal abnormalities in juvenile Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*) [J]. *Aquaculture*, 2007, **262**(1): 142—155
- [5] Huang K, Ruan D J, Zhan G, *et al.* Effects of oxidized oils on the growth and antioxidant activities of juvenile tilapia [J]. *Freshwater Fisheries*, 2006, **36**(6): 21—24 [黄凯, 阮栋俭, 战歌, 等. 氧化油脂对奥尼罗非鱼生长和抗氧化性能的影响. 淡水渔业, 2006, **36**(6): 21—24]
- [6] Gao J, Koshio S, Ishikawa M, *et al.* Effects of dietary

- palm oil supplements with oxidized and non-oxidized fish oil on growth performances and fatty acid compositions of juvenile Japanese sea bass, *Lateolabrax japonicas* [J]. *Aquaculture*, 2012, **324**: 97—103
- [7] Baker R T M, Davies S J. Oxidative nutritional stress associated with feeding rancid oils to African catfish, *Clarias gariepinus* (Burchell) and the protective role of α -tocopherol [J]. *Aquaculture Research*, 1996, **27**(10): 795—803
- [8] Sutton J, Balfry S, Higgs D, *et al.* Impact of iron-catalyzed dietary lipid peroxidation on growth performance, general health and flesh proximate and fatty acid composition of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) reared in seawater [J]. *Aquaculture*, 2006, **257**(1): 534—557
- [9] Dong X, Lei W, Zhu X, *et al.* Effects of dietary oxidized fish oil on growth performance and skin colour of Chinese longsnout catfish (*Leiocassis longirostris* Günther) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2011, **17**(4): e861-e868
- [10] Chen Y J, Liu Y J, Yang H J, *et al.* Effect of dietary oxidized fish oil on growth performance, body composition, antioxidant defense mechanism and liver histology of juvenile largemouth bass *Micropterus salmoides* [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2012, **18**(3): 321—331
- [11] Ye S G. Pathological study on the carp fed oxidized fish oil and the protective effect of vitamin E [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University. 2002 [叶仕根. 氧化鱼油对鲤鱼危害的病理学及VE的保护作用研究. 雅安: 四川农业大学. 2002]
- [12] Messenger J L, Stephan G, Quentel C, *et al.* Effects of dietary oxidized fish oil and antioxidant deficiency on histopathology, haematology, tissue and plasma biochemistry of sea bass *Dicentrarchus labrax* [J]. *Aquatic Living Resources*, 1992, **5**(3): 205—214
- [13] Tabatabaei N, Jamalian J, Owji A A, *et al.* Effects of dietary selenium supplementation on serum and liver selenium, serum malondialdehyde and liver glutathione peroxidase activity in rats consuming thermally oxidized sunflower oil [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2008, **46**(11): 3501—3505
- [14] Fontagné-Dicharry S, Lataillade E, Surget A, *et al.* Antioxidant defense system is altered by dietary oxidized lipid in first-feeding rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquaculture*, 2014, **424**: 220—227
- [15] Porter N A. Mechanisms for the autoxidation of poly-unsaturated lipids [J]. *Accounts of Chemical Research*, 1986, **19**: 262—268
- [16] Marnett L J. Lipid peroxidation-DNA damage by malondialdehyde [J]. *Mutation Research*, 1999, **424**(1): 83—95
- [17] Dix T A, Aikens J. Mechanisms and biological relevance of lipid peroxidation initiation [J]. *Chemical Research in Toxicology*, 1993, **6**(1): 2—18
- [18] Ralf R H. Leukocytes and oxidative stress: dilemma for sperm function and male fertility [J]. *Asian Journal of Andrology*, 2011, **13**(1): 43—52
- [19] Uchida R. 4-Hydroxy-2-nonenal: a product and mediator of oxidative stress [J]. *Progress in Lipid Research*, 2003, **42**(4): 318—343
- [20] Eder K, Keller U, Hirche F, *et al.* Thermally oxidized dietary fats increase the susceptibility of rat LDL lipid peroxidation but not their uptake by macrophages [J]. *Journal of Nutrition*, 2003, **133**: 2830—2837
- [21] Fritsch C W. Measurements of frying fat deterioration: a brief review [J]. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 1981, **58**: 272—274
- [22] Al-Kahtani H A. Survey of quality of used frying oils from restaurants [J]. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 1991, **68**(11): 857—862
- [23] Koshio S, Ackman R G, Lall S P. Effects of oxidized herring and canola oils in diets on growth, survival, and flavor of Atlantic salmon, *Salmo salar* [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1994, **42**(5): 1164—1169
- [24] Tocher D R, Mourente G, Eecken A V D, *et al.* Comparative study of antioxidant defense mechanisms in marine fish fed variable levels of oxidized oil and vitamin E [J]. *Aquaculture International*, 2003, **11**(1—2): 195—216
- [25] Gao J, Koshio S, Ishikawa M, *et al.* Interactive effects of vitamin C and E supplementation on growth performance, fatty acid composition and reduction of oxidative stress in juvenile Japanese flounder *Paralichthys olivaceus* fed dietary oxidized fish oil [J]. *Aquaculture*, 2014, **422**: 84—90
- [26] Smith C E. The prevention of liver lipid degeneration (ceroidosis) and microcytic anaemia in rainbow trout *Salmo gairdneri* Richardson fed rancid diets: a preliminary report [J]. *Journal of Fish Diseases*, 1979, **2**(5): 429—437
- [27] Hung S S O, Cho C Y, Slinger S J. Effect of oxidized fish oil, DL- α -tocopheryl acetate and ethoxyquin supplementation on the vitamin E nutrition of rainbow trout (*Salmo gairdneri*) fed practical diets [J]. *Journal of Nutrition*, 1981, **111**: 648—654
- [28] Wang J. Effects of ethoxyquin, oxidized fish oil and chromium polynicotinate on the growth performance and their (or metabolites) residues in tissues of large yellow croaker *Pseudosciaena crocea* and Japanese seabass *Lateolabrax japonicas* [D]. Qingdao: Ocean University of China. 2010 [王珺. 乙氧基喹啉, 氧化鱼油和烟酸铬对大黄鱼与鲈鱼生长性能的影响及其(或代谢物)在鱼体组织中残留的研究. 青岛: 中国海洋大学. 2010]
- [29] Chen Y J, Liu Y J, Tian L X, *et al.* Effect of dietary vitamin E and selenium supplementation on growth, body composition, and antioxidant defense mechanism in juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoide*) fed oxidized fish oil [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2013, **39**(3): 593—604

- [30] Dong G F, Huang F, Zhu X M, *et al.* Nutriphysiological and cytological responses of juvenile channel catfish (*Ictalurus punctatus*) to dietary oxidized fish oil [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2012, **18**(6): 673—684
- [31] Liu W, Zhang G L, Chen H Y. Effects of adding oxidative oil in diet on lipid peroxidation and hematological values for common carps [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 1997, **4**(1): 94—96 [刘伟, 张桂兰, 陈海燕. 饲料添加氧化油脂对鲤鱼体内脂质过氧化及血液指标的影响. 中国水产科学, 1997, **4**(1): 94—96]
- [32] Chen K Q, Ye Y T, Cai C F, *et al.* Effects of dietary oxidized fish oil on growth and muscle fatty acid composition of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2015, **27**(6): 1698—1708 [陈科全, 叶元土, 蔡春芳, 等. 饲料中氧化鱼油对草鱼生长及肌肉脂肪酸组成的影响. 动物营养学报, 2015, **27**(6): 1698—1708]
- [33] Wang Y Q. Protection of Silymarine to liver injury of *Megalobrama amblycephala* induced by oxidized oil [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University. 2012 [王永庆. 水飞蓟素对团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)氧化油脂肝损伤的保护作用. 上海: 上海海洋大学. 2012]
- [34] Obach A, Laurencin F B. Effects of dietary oxidized fish oil and deficiency of anti-oxidants on the immune response of turbot, *Scophthalmus maximus* [J]. *Aquaculture*, 1992, **107**(2): 221—228
- [35] Gao C R, Lei J L. Effects of oxidized fish oils in diets on the growth, survival and fatty acid composition of juvenile red seabream *Pagrus major* [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 1999, **8**(2): 124—130 [高淳仁, 雷霖. 饲料中氧化鱼油对真鲷幼鱼生长、存活及脂肪酸组成的影响. 上海水产大学学报, 1999, **8**(2): 124—130]
- [36] Zhong Y, Lall S P, Shahidi F. Effects of dietary oxidized oil and vitamin E on the growth, blood parameters and body composition of juvenile Atlantic cod *Gadus morhua* (Linnaeus 1758) [J]. *Aquaculture Research*, 2008, **39**(15): 1647—1657
- [37] Peng S M, Chen L Q, Ye J Y, *et al.* Effects of dietary oxidized fish oil on growth performance of juvenile black seabream *Acanthopagrus schlegeli* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2007, **31**(sup.): 109—115 [彭士明, 陈立侨, 叶金云, 等. 饲料中添加氧化鱼油对黑鲷幼鱼生长的影响. 水产学报, 2007, **31**(增刊): 109—115]
- [38] Engberg R M, Lauridsen C, Jensen S K, *et al.* Inclusion of oxidized vegetable oil in broiler diets and its influence on nutrient balance and on the anti-oxidative status of broilers [J]. *Poultry Science*, 1996, **75**(8): 1003—1011
- [39] Hamre K, Kolas K, Sandnes K, *Et Al.* Feed intake and absorption of lipid oxidation products in Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed diets coated with oxidized fish oil [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2001, **25**(3): 209—219
- [40] Diczfalusy U, Falardeau P, Hammarstrom S. Conversion of prostaglandin endoperoxides to C₁₇-hydroxy acids catalyzed by human platelet thromboxane synthase [J]. *Febs Letters*, 1977, **84**(2): 271—274
- [41] Tang X, Wang J, Xu H G, *et al.* Effects of oxidized fish oil and vitamin E supplementation on activities of SOD and CAT in large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea* R.) [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, **40**(sup.): 55—58 [唐筱, 王珺, 徐后国, 等. 氧化鱼油和维生素E对大黄鱼SOD和CAT酶活性的影响. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, **40**(增刊): 55—58]
- [42] Sakai T, Murata H, Yamauchi K, *et al.* Effects of dietary lipid peroxides content on in vivo lipid peroxidation, α -tocopherol content, and superoxide dismutase and glutathione peroxidase activities in the liver of yellowtail [J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1992, **58**(8): 1483—1486
- [43] Liu W, Yang Y, Zhang J, *et al.* Effects of dietary microencapsulated sodium butyrate on growth, intestinal mucosal morphology, immune response and adhesive bacteria in juvenile common carp (*Cyprinus carpio*) pre-fed with or without oxidized oil [J]. *British Journal of Nutrition*, 2014, **112**(1): 15—29
- [44] Yao S B, Ye Y T, Cai C F, *et al.* Damage of mda on intestinal epithelial cells in vitro of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2014, **39**(1): 133—141 [姚仕彬, 叶元土, 蔡春芳, 等. 丙二醛对离体草鱼肠道黏膜细胞的损伤作用. 水生生物学报, 2014, **39**(1): 133—141]
- [45] Ye Y T, Cai C F, Xu F, *et al.* Feeding grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) with oxidized fish oil up-regulates the gene expression in the cholesterol and bile acid synthesis pathway in intestinal mucosa [J]. *Acta Zoonutrientia Sinica*, 2015, **39**(1): 90—100 [叶元土, 蔡春芳, 许凡, 等. 灌喂氧化鱼油使草鱼肠道黏膜胆固醇胆汁酸合成基因通路表达上调. 水生生物学报, 2015, **39**(1): 90—100]
- [46] Murai T, Andrews J W. Interactions of dietary α -tocopherol, oxidized menhaden oil and ethoxyquin on channel catfish (*Ictalurus punctatus*) [J]. *Journal of Nutrition*, 1974, **104**(11): 1416—1431
- [47] Ren Z L, Zeng H, Huo Q G, *et al.* Effects of oxidized fish oil on the anti-oxidative function and histological structure of carp hepatopancreas [J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2000, **15**(4): 235—243 [任泽林, 曾虹, 霍启光, 等. 氧化鱼油对鲤肝胰脏抗氧化机能及其组织结构的影响. 大连水产学院学报, 2000, **15**(4): 235—243]
- [48] Sakaguchi H, Hamaguchi A. Influence of oxidized oil and vitamin E on the culture of yellowtail [J]. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 1969, **35**(12): 1207—1214
- [49] Hamre K, Hjeltnes B, Kryvi H, *et al.* Decreased concentration of hemoglobin, accumulation of lipid oxidation products and unchanged skeletal muscle in Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed low dietary vitamin E [J]. *Fish*

- Physiology and Biochemistry*, 1994, **12**(5): 421—429
- [50] Zhong Y, Lall S P, Shahidi F. Effects of oxidized dietary oil and vitamin E supplementation on lipid profile and oxidation of muscle and liver of juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, **55**(15): 6379—6386
- [51] Gao J, Koshio S, Ishikawa M, *et al.* Effect of dietary oxidized fish oil and vitamin C supplementation on growth performance and reduction of oxidative stress in Red Sea Bream *Pagrus major* [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2013a, **19**(1): 35—44
- [52] Ren Z L, Chen Y L, Huo Q G. Effects of oxidized fish oil on the muscle quality of *Cyprinus carpio* [J]. *China Feed*, 2004, **19**: 37—40 [任泽林, 陈义林, 霍启光. 氧化鱼油对鲤鱼(*Cyprinus carpio*)肉质的影响. 饲料广角, 2004, **19**: 37—40]
- [53] Xue J P. Effects of melamine, oxidized fish oil and lipid on growth and skin colour of darkbarbel catfish [D]. Qingdao: Ocean University of China. 2011 [薛继鹏. 三聚氰胺, 氧化鱼油和脂肪对瓦氏黄颡鱼生长和体色的影响. 青岛: 中国海洋大学. 2011]
- [54] Poli G, Schaur R J, Siems W G. 4-Hydroxynonenal: A membrane lipid oxidation product of medicinal interest [J]. *Medicinal Research Reviews*, 2008, **28**(4): 569—631
- [55] Folden D V, Gupta A, Sharma A C, *et al.* Malondialdehyde inhibits cardiac contractile function in ventricular myocytes via a p38 mitogen-activated protein kinase-dependent mechanism [J]. *British Journal of Pharmacology*, 2003, **139**: 1310—1316
- [56] Cai J, Chen J, He H, *et al.* Carbonyl stress: malondialdehyde induces damage on rat hippocampal neurons by disturbance of Ca²⁺ homeostasis [J]. *Cell Biology and Toxicology*, 2009, **25**: 435—445
- [57] Cheng J, Wang F, Yu D F, *et al.* The cytotoxic mechanism of malondialdehyde and protective effect of carnosine via protein cross-linking/mitochondrial dysfunction/reactive oxygen species/MAPK pathway in neurons [J]. *European Journal of Pharmacology*, 2011, **650**(1): 184—194
- [58] Nair U, Bartsch H, Nair J. Lipid peroxidation-induced DNA damage in cancer-prone inflammatory diseases: a review of published adduct types and levels in humans [J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2007, **43**(8): 1109—1120
- [59] Yao S B, Ye Y T, Cai C F, *et al.* The water soluble matter from oxidized soybean oil damages dissociated intestinal epithelial cells of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2014, **38**(4): 689—698 [姚仕彬, 叶元土, 蔡春芳, 等. 氧化豆油水溶物对离体草鱼肠道黏膜细胞的损伤作用. 水生生物学报, 2014, **38**(4): 689—698]
- [60] Winston G W, Di Giulio R T. Prooxidant and antioxidant mechanisms in aquatic organisms [J]. *Aquatic Toxicology*, 1991, **19**(2): 137—161
- [61] Halliwell B, Gutteridge J M C. Lipid Peroxidation: a Radical Chain Reaction [M]. In: B Halliwell, J M C Gutteridge (Eds.), *Free Radicals in Biology and Medicine*. Oxford: Clarendon Press. 1996, 4—18
- [62] Kanazawa K, Ashida H. Catabolic fate of trilineoylglycerol hydroperoxides in rat gastrointestines [J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1998a, **1393**(2): 336—348
- [63] Kanazawa K, Ashida H. Dietary hydroperoxides of linoleic acid decompose to aldehydes before being absorbed into the body [J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1998b, **1393**(2): 349—361
- [64] Waldeck A R, Stocker R. Radical-initiated lipid peroxidation in low density lipoproteins: insights obtained from kinetic modeling [J]. *Chemical Research in Toxicology*, 1996, **9**(6): 954—964
- [65] Lee K J, Dabrowski K. Interaction between vitamins C and E affects their tissue concentrations, growth, lipid oxidation, and deficiency symptoms in yellow perch (*Perca flavescens*) [J]. *British Journal of Nutrition*, 2003, **89**(5): 589—596

DETRIMENTAL EFFECTS OF DIETARY OIL OXIDATION ON GROWTH AND HEALTH STATUS OF FISH

CHEN Yong-Jun^{1,2}, LIN Shi-Mei¹, LUO Li¹ and LI Yun¹

(1. *Key Laboratory of Aquatic Science of Chongqing, College of Animal Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China*; 2. *Key Laboratory of Freshwater Fish Resources and Reproductive Development (Ministry of Education), School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China*)

Abstract: The fish production is not only regulated by the genetic background, aquaculture environment and feeding management, but also mediated by the quality of aquatic feeds such as the quality and quantity of each ingredients. One key characteristic of aquatic feed was riched in poly-unsaturated fatty acids (PUFAs) compared with livestock and poultry feeds. During the production processing, storage and transportation processes, PUFAs in the feed easily produce free radical chain reactions and release series of harmful oxidative products, which might impact food intake, growth performance, nutrient absorption, skeletal development, flesh quality, and skin pigmentation of fish, posing a big threat to their health and production. The current review summarize the deleterious effects of dietary lipid peroxidation on the growth and health status of fish based on the data that are available regarding the physio-pathological responses to dietary oil oxidation in different fish species. It also discuss the processes of oxidative products released from PUFAs peroxidation and toxicological mechanisms of the oxidative products to cellular components in animals, highlight ignore-dissues by the existing researches, and provide future research perspectives.

Key words: Detrimental effects; Oxidized oil; Fish; Growth; Health status