

文章编号: 1000-0615(2017)01-0088-11

DOI: 10.11964/jfc.20160510412

## 生态浮床对养殖水产品中重金属含量和肌肉品质的影响

翟哲, 冯建祥, 高珊珊, 陈婧芳, 黄建荣, 黎祖福\*

(中山大学生命科学学院, 广东广州 510275)

**摘要:** 为比较铺设海马齿生态浮床的鱼、贝混养池塘(实验塘)和鱼、贝单一养殖池塘(对照塘)的养殖质量, 实验采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定黄鳍鲷、尼罗罗非鱼、鲮3种鱼的鳃、内脏和肌肉及近江牡蛎、泥蚶两种贝类软体部分的Ni、Cu、Zn、Cd和Pb 5种重金属含量, 并进行食用安全性评价; 同时, 测定了两种模式下养殖的黄鳍鲷与尼罗罗非鱼肌肉中氨基酸和脂肪酸组成及一般营养成分, 以进行肌肉品质评价。结果显示, 实验塘中各种水产品食用部分的重金属含量均未超过国家水产品相关限量标准; 对照塘中近江牡蛎软体部分中Cu和Cd的含量分别为57.113 mg/kg wet wt.和1.163 mg/kg wet wt., 泥蚶软体部分中Cd含量达到1.231 mg/kg wet wt., 均超过了限量标准。黄鳍鲷、尼罗罗非鱼、鲮3种鱼类肌肉的安全性评价结果显示, 两组鱼肉的摄入均不会对人体健康造成潜在威胁。实验塘黄鳍鲷肌肉中的鲜味氨基酸含量显著高于对照塘, 而实验塘尼罗罗非鱼肌肉中氨基酸总量TAA、必需氨基酸总量EAA、鲜味氨基酸含量DAA均显著高于对照塘( $P<0.05$ ); 实验塘两种鱼肌肉中粗蛋白和多不饱和脂肪酸含量较高, 饱和脂肪酸含量低( $P<0.05$ )。研究表明, 实验塘鱼体肌肉的营养价值高于对照塘, 且肉质更加鲜美。

**关键词:** 养殖模式; 重金属; 肌肉品质; 安全性评价

**中图分类号:** X 835; S 917.4

**文献标志码:** A

我国传统水产养殖模式普遍存在高密度养殖、饵料投喂量大、池塘水质恶化、病害频发等诸多弊端。养殖废水的直接排放会导致污染扩散、水环境恶化、水域富营养化等一系列问题<sup>[1]</sup>。因此, 推行清洁生产、开发新型的生态养殖模式以减少养殖污染, 提高水产品质量尤为必要。生态浮床系统在养殖池塘水环境修复方面具有广泛的应用前景。浮床系统主要通过以下方面发挥其修复作用<sup>[2-3]</sup>: 浮床植物的存在减小了水中的风浪扰动, 利于悬浮颗粒沉淀的去除; 水生植物通过吸收水体中的氮、磷满足自身生长的需要; 通过植株枝条和根系的气体传输和释放作用, 增加水体中的溶解氧, 为水体中降解污染物质的微生物提供所需的氧; 浮床植物的根系对微生物有吸附固着作用, 并通过

植物和微生物的协同作用来达到净化水质的目的, 其吸附固着的反硝化细菌、硝化细菌、亚硝化细菌和一些真菌可以将植物不可直接利用的氮、磷转化为可吸收的状态, 加速了氮、磷不同形式的转化, 从而进一步提高浮床的净水能力; 浮床植物还能通过释放化感物质抑藻, 促进氮细菌和嗜磷菌的生长, 有效降低水体中的营养负荷。此外, 植物浮床可有效移除水体中的铜和锌等重金属离子<sup>[4-7]</sup>。

本研究中新型立体生态养殖池塘内铺设的海马齿(*Sesuvium portulacastrum*)生态浮床, 具有生物修复作用, 并通过放养适合中上层生活的鱼和适合底层生活的贝类, 构建了多营养层次的立体综合海水养殖系统。相比传统养殖模式, 该养殖系统的构建会在一定程度上提升养殖对

收稿日期: 2016-05-23 修回日期: 2016-07-27

资助项目: 广东省科技计划项目(2015B020235006); 国家海洋局海洋公益性行业科研专项(201305021); 2011/2012年中央分成海域使用金支出项目(环保类); 澳门科技基金项目(045/2010/A)

通信作者: 黎祖福, E-mail: lsslzf@mail.sysu.edu.cn

象的食用安全性和品质。测定水产品中重金属含量对评价其食用安全具有重要的参考价值, 鱼肌肉营养成分和感官特性则可用于评价鱼类的肌肉品质<sup>[8-9]</sup>。本实验通过测定两种不同模式养殖池塘内水产品中重金属含量及肌肉的一般营养成分、氨基酸和脂肪酸的组成及含量来研究海马齿生态浮床对养殖水产品安全性和品质的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验样地和材料

本实验采样点位于广东省阳江市实验基地, 选取一个铺设有海马齿浮床的鱼、贝混养池塘(6.67 hm<sup>2</sup>)作为实验塘, 单一养殖池塘作为对照塘。实验塘和对照塘均在2015年5月份投放养殖品种, 包括黄鳍鲷(*Sparus latus*)、尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)、鲮(*Mugil cephalus*)、近江牡蛎(*Crassostrea rivularis*)、泥蚶(*Tegillarca granosa*)。于2016年1月16日采集样品, 每个池塘每种鱼随机采集6尾, 每种贝类随机采集30个, 采集的样品保存于冰盒中带回实验室, 测定各项形态学指标, 在-20℃下冷冻保存。

采集到的两个组黄鳍鲷其全长16~18 cm, 体质量45.5~48.0 g; 尼罗罗非鱼全长25.5~27.0 cm, 体质量395~425 g; 鲮全长21.5~23.0 cm, 体质量114~120 g; 泥蚶壳长33.6~34.0 mm, 壳高27.8~27.9 mm, 壳宽23.5~24.0 mm, 鲜重15.5~16.5 g; 近江牡蛎壳长42.5~44.0 mm, 壳高81.7~82.5 mm, 软体部鲜重6.3~6.5 g。

### 1.2 水产品中重金属含量的测定

先将样品解冻, 鱼类样品使用不锈钢器具解剖, 分离出背部肌肉、鳃和内脏, 贝类样品分离出软体部分。样品干燥: 半开称量瓶磨口盖放入烘箱中, 2 h后取出至干燥器中冷却30 min, 加盖用天平称重; 取5~10 g样品放入称量瓶, 加盖再称重(±0.5 mg); 然后将称量瓶半开盖放入80℃烘箱中, 24 h后取出, 在干燥器中冷却30 min, 加盖称重; 重复操作, 直至前后两次烘干重量差小于总重量的0.5%<sup>[10]</sup>。干样用研钵研磨至粉末状, 全部过80~100目尼龙筛。用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)对各个样品中的Ni、Cu、Zn、Cd、Pb含量进行3次测定。

### 1.3 鱼类肌肉品质分析

**基本营养成分分析** 水分测定: 105℃烘箱恒温干燥法; 灰分测定: 马弗炉650℃高温灼烧法; 粗蛋白测定: 全自动凯式定氮法; 粗脂肪测定: 索氏抽提法。

**肌肉氨基酸的测定** 按照国家标准(GB/T 5009.124-2003)测定氨基酸组成及含量。准确称取各组尼罗罗非鱼和黄鳍鲷肌肉50 g, 送至广东省食品工业研究所, 由日立L-8800型全自动氨基酸分析仪进行检测。

**肌肉脂肪酸的测定** 脂肪酸的测定参照GB/T 17377-2008的标准。准确称取各组尼罗罗非鱼和黄鳍鲷肌肉50 g, 送至广东省食品工业研究所, 使用岛津GC-2010 Plus型气相色谱仪, 采用Sigma公司提供的标准脂肪酸进行定性分析以鉴定脂肪酸的组成, 再按照峰面积归一化法计算出脂肪酸的组成及其相对含量。

### 1.4 评价方法

**安全性评价** 目前已经有几种方法被用来评价鱼体中重金属给人体健康带来的潜在风险。大多数研究学者采用由美国环保署于2000年制定的目标危险系数法(target hazard quotients, THQ)来进行健康风险评价<sup>[11-13]</sup>。

$$HQ = \frac{EF \cdot ED \cdot FIR \cdot C}{RFD \cdot WAB \cdot TA}$$

式中, *EF*为人摄食含重金属食物的频率(day/week); *ED*为人平均寿命70年; *FIR*为鱼肉摄入量(160 g/day/person); *C*为鱼体肌肉重金属浓度(μg/g); *RFD*是由食品添加剂联合专家委员会(JECFA)在2003年发布的有关金属的参考量(μg/kg body wt./day); *WAB*为人体平均体质量64 kg; *TA*为非致癌性暴露平均时间。因此, 上述公式可简化:  $HQ = \frac{EF \cdot C}{RFD} \times 2.5$

**氨基酸和脂肪酸评价** 根据FAO/WHO 1973年建议的氨基酸评分标准模式和全鸡蛋蛋白质的氨基酸模式, 氨基酸评分(AAS)、化学评分(CS)和必需氨基酸指数(EAAI)分别由如下的公式求得<sup>[14]</sup>:

$$AAS = \frac{\text{待评价蛋白质中某种必需氨基酸含量}}{\text{FAO评分模式中某种必需氨基酸含量}}$$

$$CS = \frac{\text{待评价蛋白质中某种必需氨基酸含量}}{\text{鸡蛋蛋白质中某种必需氨基酸含量}}$$

$$EAAI = \sqrt[n]{\frac{\text{苏氨酸}a}{\text{苏氨酸}b} \times 100 \times \frac{\text{缬氨酸}a}{\text{缬氨酸}b} \times \dots \times 100 \times \frac{\text{脯氨酸}a}{\text{脯氨酸}b} \times 100}$$

氨基酸含量(mg/gN) =

$$\frac{\text{样品中某一氨基酸含量\% (鲜样)}}{\text{样品中粗蛋白含量\% (鲜样)}} \times 6.25 \times 1000$$

式中,  $n$ 为比较的氨基酸数,  $a$ 为实验蛋白质的氨基酸(mg/gN),  $b$ 为鸡蛋蛋白质的氨基酸(mg/gN)。

脂肪酸评价主要从多不饱和脂肪酸的比例及DHA、EPA等的比例等方面来分析。

## 1.5 数据分析

所有数据采用统计软件SPSS 19.0进行分析处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 鱼类和贝类体内重金属的含量

Ni、Zn、Cd和Pb在黄鳍鲷不同组织中的含量高低为: 鳃>内脏>肌肉; Cu的含量高低为:

内脏>鳃>肌肉。Ni在尼罗罗非鱼不同组织中均未检出; Cu、Zn和Cd在尼罗罗非鱼不同组织中检出的含量高低为: 内脏>鳃>肌肉; Pb的检出量高低顺序为鳃>内脏>肌肉。Ni、Cu、Zn和Cd在鲮不同组织中检出量大小为: 内脏>鳃>肌肉; Pb的含量大小为鳃>内脏>肌肉(表1)。

两种养殖模式水产品可食用部分重金属含量比较结果(表2)显示: 实验塘黄鳍鲷肌肉中Cu、Cd和Pb含量显著低于对照塘( $P<0.05$ ), 两组样品中Zn含量则无显著性差异, 而实验塘样品中未检出Ni; 对照塘尼罗罗非鱼肌肉中Cu和Pb含量均显著高于实验塘( $P<0.05$ ), Cd含量则显著低于实验塘( $P<0.05$ ), 两组样品中均未检出Ni; 实验塘中鲮肌肉的Cu和Cd含量显著低于对照塘( $P<0.05$ ), Zn含量则显著高于对照塘( $P<0.05$ ), 实验塘样品鲮肌肉中未检出Ni; 实验塘泥蚶可食用

表1 三种鱼不同组织中重金属含量

Tab. 1 Concentrations of five heavy metals in different tissues of fishes

种类 species	采样点 sampling site	组织 organs	重金属含量/(mg/kg湿重) concentrations of heavy metals				
			Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
黄鳍鲷 <i>S. latus</i>	实验塘 testing pond	肌肉 muscle	ND	0.302±0.077 <sup>b</sup>	4.915±0.329 <sup>c</sup>	0.022±0.009 <sup>b</sup>	0.015±0.021 <sup>b</sup>
		鳃 gills	0.071±0.010	0.385±0.023 <sup>b</sup>	31.055±1.207 <sup>a</sup>	0.034±0.002 <sup>a</sup>	0.065±0.005 <sup>a</sup>
		内脏 viscera	0.030±0.005	0.780±0.318 <sup>a</sup>	16.046±0.771 <sup>b</sup>	0.030±0.002 <sup>ab</sup>	0.051±0.013 <sup>a</sup>
	对照塘 control pond	肌肉 muscle	0.183±0.014	0.901±0.065 <sup>b</sup>	4.508±0.143 <sup>b</sup>	0.091±0.048	0.041±0.017 <sup>c</sup>
		鳃 gills	0.216±0.021	1.022±0.037 <sup>b</sup>	33.471±1.760 <sup>a</sup>	0.129±0.025	0.399±0.045 <sup>a</sup>
		内脏 viscera	0.185±0.080	2.604±0.146 <sup>a</sup>	29.180±5.617 <sup>a</sup>	0.095±0.005	0.269±0.022 <sup>b</sup>
尼罗罗非鱼 <i>O. niloticus</i>	实验塘 testing pond	肌肉 muscle	ND	0.181±0.006 <sup>b</sup>	4.249±0.294 <sup>c</sup>	0.043±0.006 <sup>b</sup>	0.014±0.015 <sup>c</sup>
		鳃 gills	ND	0.458±0.107 <sup>b</sup>	10.682±0.594 <sup>b</sup>	0.094±0.044 <sup>ab</sup>	0.093±0.006 <sup>a</sup>
		内脏 viscera	ND	18.453±4.112 <sup>a</sup>	16.206±0.663 <sup>a</sup>	0.134±0.018 <sup>a</sup>	0.049±0.025 <sup>b</sup>
	对照塘 control pond	肌肉 muscle	ND	0.414±0.099 <sup>b</sup>	4.321±0.381 <sup>c</sup>	0.023±0.018 <sup>b</sup>	0.117±0.003 <sup>c</sup>
		鳃 gills	ND	0.622±0.123 <sup>b</sup>	11.997±0.477 <sup>b</sup>	0.082±0.005 <sup>b</sup>	0.976±0.119 <sup>b</sup>
		内脏 viscera	0.606±0.041	72.536±5.031 <sup>a</sup>	23.052±2.635 <sup>a</sup>	0.756±0.073 <sup>a</sup>	2.021±0.070 <sup>a</sup>
鲮 <i>M. cephalus</i>	实验塘 testing pond	肌肉 muscle	ND	0.199±0.002 <sup>c</sup>	2.656±0.068 <sup>b</sup>	0.016±0.001 <sup>b</sup>	0.036±0.028 <sup>b</sup>
		鳃 gills	0.555±0.016	1.207±0.024 <sup>b</sup>	3.053±0.209 <sup>ab</sup>	0.072±0.033 <sup>b</sup>	0.189±0.008 <sup>a</sup>
		内脏 viscera	ND	2.342±0.711 <sup>a</sup>	3.380±0.304 <sup>a</sup>	0.231±0.051 <sup>a</sup>	0.042±0.030 <sup>b</sup>
	对照塘 control pond	肌肉 muscle	0.310±0.028 <sup>b</sup>	2.019±0.060 <sup>b</sup>	2.235±0.027 <sup>c</sup>	0.040±0.005 <sup>b</sup>	0.020±0.005 <sup>c</sup>
		鳃 gills	0.671±0.044 <sup>a</sup>	3.201±1.010 <sup>b</sup>	13.589±1.348 <sup>b</sup>	0.227±0.002 <sup>b</sup>	0.431±0.033 <sup>a</sup>
		内脏 viscera	0.724±0.064 <sup>a</sup>	84.503±3.099 <sup>a</sup>	32.297±5.238 <sup>a</sup>	0.969±0.274 <sup>a</sup>	0.222±0.082 <sup>b</sup>

注: ND表示未检出; 字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。下同

Notes: ND means negative; values with different small letter superscripts mean significant differences ( $P<0.05$ ). The same below

表 2 两种养殖模式下同种水产品可食用部分同一重金属含量比较

Tab. 2 Concentrations of five heavy metals in edible part from different samples

种类 species	采样点 sampling site		重金属含量/(mg/kg湿重) concentrations of heavy metals				
			Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
黄鳍鲷 <i>S. latus</i>	实验塘	testing pond	ND	0.302±0.077 <sup>b</sup>	4.915±0.329	0.022±0.009 <sup>b</sup>	0.015±0.021 <sup>b</sup>
	对照塘	control pond	0.183±0.01	0.901±0.065 <sup>a</sup>	4.508±0.143	0.091±0.048 <sup>a</sup>	0.041±0.017 <sup>a</sup>
尼罗罗非鱼 <i>O. niloticus</i>	实验塘	testing pond	ND	0.181±0.006 <sup>b</sup>	4.249±0.294	0.043±0.006 <sup>a</sup>	0.014±0.015 <sup>b</sup>
	对照塘	control pond	ND	0.414±0.099 <sup>a</sup>	4.321±0.381	0.023±0.018 <sup>b</sup>	0.117±0.003 <sup>a</sup>
鲮 <i>M. cephalus</i>	实验塘	testing pond	ND	0.199±0.002 <sup>b</sup>	2.656±0.068 <sup>a</sup>	0.016±0.001 <sup>b</sup>	0.036±0.028
	对照塘	control pond	0.310±0.02	2.019±0.060 <sup>a</sup>	2.235±0.027 <sup>b</sup>	0.040±0.005 <sup>a</sup>	0.020±0.005
泥蚶 <i>T. granosa</i>	实验塘	testing pond	0.041±0.03	0.615±0.018 <sup>b</sup>	9.525±0.080 <sup>b</sup>	0.653±0.034 <sup>b</sup>	0.085±0.007
	对照塘	control pond	ND	0.839±0.093 <sup>a</sup>	11.179±0.377 <sup>a</sup>	1.231±0.027 <sup>a</sup>	0.093±0.006
近江牡蛎 <i>C. rivularis</i>	实验塘	testing pond	0.163±0.00 <sup>b</sup>	2.089±0.442 <sup>b</sup>	9.652±0.232 <sup>b</sup>	0.115±0.014 <sup>b</sup>	0.042±0.003 <sup>b</sup>
	对照塘	control pond	0.260±0.00 <sup>a</sup>	57.113±1.904 <sup>a</sup>	65.559±2.314 <sup>a</sup>	1.163±0.008 <sup>a</sup>	0.246±0.013 <sup>a</sup>
鱼类 fish	-	-	-	50 <sup>2</sup>	-	0.1 <sup>1,2</sup>	0.5 <sup>1,2</sup>
贝类 shellfish	-	-	-	50 <sup>2</sup>	-	1.0 <sup>2</sup>	1.0 <sup>2</sup>

注: 1. GB 2762-2012 《食品中污染物限量标准》; 2. NY 5073-2006 《无公害食品水产品中有毒有害物质限量标准》

Notes: Superscript number 1 is GB 2762-2005; superscript number 2 is NY 5073-2006

软体组织中Cu、Zn和Cd含量均显著低于对照塘; 对照塘近江牡蛎可食用部分中5种重金属的含量均显著高于实验塘。

将所采集水产品可食用部分的重金属含量与国家食品中重金属限量标准作比较后可知(表2): 对照池塘中近江牡蛎可食用部分Cu和Cd及泥蚶软体部中Cd超过国家限量标准。

## 2.2 三种鱼类肌肉的食用安全性评价

摄食频率保持在一周3~7次时, 实验塘黄鳍鲷肌肉中4种金属(Ni除外)的危险系数HQ的范围分别是: Cu 0.008~0.019, Zn 0.018~0.041, Cd 0.047~0.110, Pb 0.008~0.019; 对照塘黄鳍鲷肌肉中5种金属的危险系数HQ的范围分别是: Ni 0.01~0.023, Cu 0.024~0.056, Zn 0.016~0.038, Cd 0.195~0.455, Pb 0.022~0.051。实验塘尼罗罗非鱼肌肉中4种金属(Ni除外)的危险系数HQ的范围分别是: Cu 0.005~0.011, Zn 0.015~0.035, Cd 0.092~0.215, Pb 0.008~0.018; 对照塘尼罗罗非鱼肌肉中4种金属的危险系数HQ的范围分别是: Cu 0.011~0.026, Zn 0.015~0.036, Cd 0.049~0.115, Pb 0.063~0.146。实验塘鲮肌肉中4种金属(Ni除外)的危险系数HQ的范围分别是: Cu 0.005~0.010, Zn 0.009~0.022, Cd 0.034~0.080, Pb 0.019~0.045;

对照塘鲮肌肉中5种金属的危险系数HQ的范围分别是: Ni 0.017~0.039, Cu 0.054~0.126, Zn 0.008~0.019, Cd 0.086~0.200, Pb 0.011~0.025(表3)。

## 2.3 肌肉品质

实验塘两种鱼的灰分和粗蛋白含量均显著高于对照塘, 粗脂肪含量显著低于对照塘( $P<0.05$ ) (表4)。

对两种模式池塘同一种鱼肌肉中氨基酸组成和含量进行比较分析可知(表5): 实验塘中黄鳍鲷肌肉的鲜味氨基酸含量和与总氨基酸的比值显著高于对照塘( $P<0.05$ )。实验塘中尼罗罗非鱼肌肉中氨基酸总量TAA、必需氨基酸总量EAA、鲜味氨基酸含量DAA均显著高于对照塘( $P<0.05$ )。

实验塘中黄鳍鲷和尼罗罗非鱼肌肉中必需氨基酸指数EAAI均高于对照塘。若以AAS为标准, 各组的第一限制性氨基酸均为(甲硫氨酸+胱氨酸), 两种模式池塘黄鳍鲷肌肉第二限制性氨基酸均为缬氨酸, 而尼罗罗非鱼肌肉第二限制性氨基酸均为苏氨酸。若以CS为标准, 四组的第一限制性氨基酸均为(甲硫氨酸+胱氨酸), 第二限制性氨基酸均是缬氨酸(表6)。

对照塘中黄鳍鲷和尼罗罗非鱼肌肉中的饱和脂肪酸含量均显著高于实验塘( $P<0.05$ ), 单不



表 3 三种鱼的健康风险评估

Tab. 3 Estimation of human health risk on muscles from three species of fish

样品 sample	采样点 sampling site	暴露水平/(d/w) level of exposure	危险系数 hazard quotient				
			Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
黄鳍鲷 <i>S. latus</i>	实验塘 testing pond	3	0	0.008	0.018	0.047	0.008
		5	0	0.013	0.029	0.079	0.013
		7	0	0.019	0.041	0.110	0.019
	对照塘 control pond	3	0.010	0.024	0.016	0.195	0.022
		5	0.016	0.040	0.027	0.325	0.037
		7	0.023	0.056	0.038	0.455	0.051
		7	0.023	0.056	0.038	0.455	0.051
尼罗罗非鱼 <i>O. niloticus</i>	实验塘 testing pond	3	0	0.005	0.015	0.092	0.008
		5	0	0.008	0.025	0.154	0.013
		7	0	0.011	0.035	0.215	0.018
	对照塘 control pond	3	0	0.011	0.015	0.049	0.063
		5	0	0.018	0.026	0.082	0.104
		7	0	0.026	0.036	0.115	0.146
		7	0	0.026	0.036	0.115	0.146
鲮 <i>M. cephalus</i>	实验塘 testing pond	3	0	0.005	0.009	0.034	0.019
		5	0	0.009	0.016	0.057	0.032
		7	0	0.01	0.022	0.080	0.045
	对照塘 control pond	3	0.017	0.054	0.008	0.086	0.011
		5	0.028	0.090	0.013	0.143	0.018
		7	0.039	0.126	0.019	0.200	0.025
		7	0.039	0.126	0.019	0.200	0.025
FAO/WHO <sup>1</sup>			30	100	1	2	
MFR <sup>2</sup>			30	100	1	2	

注: 5种金属元素的RFD分别是: Ni=20, Cu=40, Zn=300, Cd=0.5, Pb=2 μg/kg body wt./day; HQ (Hazard Quotient)即危险系数; 1. 联合国粮农组织和世界卫生组织制定的危险系数标准; 2. 马来西亚食品与药品法的相关标准

Notes: RFDs of five metallic elements are as follows: Ni= 20, Cu= 40, Zn=300, Cd=0.5, Pb=2 μg/kg body wt./day; HQ is Hazard Quotient; 1. Standards on HQ issued by Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and World Health Organization (WHO) in 1989; 2. Standards in Malaysian Law on Food and Drugs (MSR)

表 4 两种鱼肌肉一般营养成分

Tab. 4 Nutritional components of 2 species of fish

样品 sample	采样点 location	水 moisture	灰分 ash	粗蛋白 crude protein	粗脂肪 crude fat	%
尼罗罗非鱼 <i>O. niloticus</i>	实验塘 testing pond	78.237±0.096	1.344±0.006 <sup>a</sup>	18.963±0.179 <sup>a</sup>	0.890±0.014 <sup>b</sup>	
	对照塘 control pond	78.223±0.205	1.181±0.08 <sup>b</sup>	18.538±0.082 <sup>b</sup>	1.347±0.049 <sup>a</sup>	
黄鳍鲷 <i>S. latus</i>	实验塘 testing pond	78.520±0.609	1.508±0.011 <sup>a</sup>	19.921±0.171 <sup>a</sup>	1.295±0.051 <sup>b</sup>	
	对照塘 control pond	79.030±0.095	1.461±0.013 <sup>b</sup>	18.330±0.272 <sup>b</sup>	1.602±0.035 <sup>a</sup>	

饱和脂肪酸含量无显著性差异(表7)。实验塘两种鱼体肌肉中的多不饱和脂肪酸含量显著高于对照塘, 其中实验塘黄鳍鲷肌肉中亚油酸、γ-亚

麻酸、花生四烯酸、DHA、EPA的含量显著高于对照塘, 尼罗罗非鱼肌肉中亚麻酸、花生四烯酸、DHA、EPA的含量显著高于对照塘( $P<0.05$ )。

表 5 黄鳍鲷和尼罗罗非鱼肌肉中氨基酸组成及含量

Tab. 5 Composition and contents of amino acids

%

氨基酸 amino acids	黄鳍鲷 <i>S. latus</i>		尼罗罗非鱼 <i>O. niloticus</i>	
	实验塘 testing pond	对照塘 control pond	实验塘 testing pond	对照塘 control pond
天冬氨酸 Asp**	2.03±0.11	1.99±0.08	1.99±0.11	1.86±0.11
苏氨酸 Thr*	0.88±0.01	0.86±0.03	0.92±0.03 <sup>a</sup>	0.80±0.01 <sup>b</sup>
丝氨酸 Ser	0.76±0.05	0.75±0.04	0.77±0.04	0.71±0.05
谷氨酸 Glu**	3.02±0.04	3.01±0.01	3.09±0.03	3.03±0.04
脯氨酸 Pro	0.82±0.02 <sup>a</sup>	0.78±0.01 <sup>b</sup>	0.96±0.03 <sup>a</sup>	0.74±0.02 <sup>b</sup>
甘氨酸 Gly**	0.87±0.10	0.82±0.09	1.36±0.15 <sup>a</sup>	0.99±0.04 <sup>b</sup>
丙氨酸 Ala**	1.21±0.20	1.18±0.03	1.39±0.03 <sup>a</sup>	1.24±0.02 <sup>b</sup>
缬氨酸 Val*	1.04±0.03 <sup>a</sup>	0.98±0.02 <sup>b</sup>	1.24±0.11 <sup>a</sup>	1.00±0.04 <sup>b</sup>
蛋氨酸 Met*	0.56±0.07	0.58±0.03	0.54±0.01 <sup>a</sup>	0.47±0.02 <sup>b</sup>
异亮氨酸 Ile*	0.92±0.06	0.93±0.02	0.90±0.09	0.85±0.06
亮氨酸 Leu*	1.68±0.06	1.60±0.12	1.62±0.03 <sup>a</sup>	1.53±0.02 <sup>b</sup>
酪氨酸 Tyr	0.74±0.06	0.72±0.07	0.68±0.03	0.65±0.02
苯丙氨酸 Phe*	0.89±0.06	0.84±0.05	0.95±0.04 <sup>a</sup>	0.81±0.06 <sup>b</sup>
赖氨酸 Lys*	1.92±0.01	1.84±0.05	1.83±0.03	1.81±0.03
组氨酸 His	0.42±0.03	0.41±0.03	0.53±0.03	0.45±0.05
精氨酸 Arg**	1.04±0.07	0.97±0.06	1.08±0.04 <sup>a</sup>	0.94±0.03 <sup>b</sup>
氨基酸总量 TAA	18.8±0.62	18.27±0.34	19.85±0.11 <sup>a</sup>	17.88±0.49 <sup>b</sup>
必需氨基酸总量 EAA	7.89±0.30	7.63±0.26	8.00±0.05 <sup>a</sup>	7.27±0.16 <sup>b</sup>
非必需氨基酸总量 NEAA	10.71±0.64	10.64±0.08	11.85±0.13 <sup>a</sup>	10.61±0.34 <sup>b</sup>
鲜味氨基酸总量 DAA	8.91±0.12 <sup>a</sup>	7.97±0.09 <sup>b</sup>	8.91±0.14 <sup>a</sup>	8.06±0.20 <sup>b</sup>
EAA/TAA/%	41.96±0.21	41.75±0.65	40.69±0.36	40.67±0.33
EAA/NEAA/%	73.73±1.61	71.70±1.91	67.52±1.02	68.57±0.94
DAA/TAA/%	47.39±0.52 <sup>a</sup>	43.62±0.67 <sup>b</sup>	44.88±0.48	45.07±0.19

注: \*代表必需氨基酸; \*\*代表鲜味氨基酸

Notes: values with \* mean essential amino acid; values with \*\* mean umami amino acid

### 3 讨论

#### 3.1 两种模式养殖池塘的水产品重金属富集情况

鱼类和贝类体内重金属含量的普遍规律是 Cu、Zn>Pb、Cd、Ni, 这是因为作为生命必需元素的 Cu、Zn 比非生命必需元素 Pb、Cd、Ni 更易于被生物主动吸收。本研究中 3 种鱼的鳃和内脏对重金属的富集能力明显高于肌肉部位, 这是因为鱼体内各组织器官生理功能、代谢水平均存在差异, 重金属进入鱼体内的主要途径是通

过饵料摄取、体表渗透、鳃膜吸附以及肠的消化作用等, 因此肝胰脏、肠、鳃和鳞片积累的重金属比肌肉的多<sup>[15]</sup>。由于贝类是滤食性生物, 营底栖生活, 在大量滤食食物颗粒的过程中也被被动地积累了包括重金属在内的环境污染物<sup>[16]</sup>, 贝类可食用部分重金属含量比鱼体肌肉中的高。实验塘中除尼罗罗非鱼肌肉中 Cd 含量和鳃肌肉中 Zn 含量显著高于对照塘 ( $P<0.05$ ) 外, 其他金属含量显著低于对照塘或无显著性差异, 即实验塘水产品中重金属含量基本上均低于对照组。实验塘所有水产品可食用部分中 5 种重金属含量

表6 两种模式下鱼体肌肉AAS, CS及EAAI的比较

Tab. 6 Comparative analysis of AAS, CS and EAAI in muscles of fish from two different cultured modes

	氨基酸 amino acids	FAO/WHO评分模式标准值/(mg/g) FAO/WHO evaluation mode standard	鸡蛋蛋白标准值/(mg/g) egg protein standard	分值 score			
				H <sub>1</sub>	H <sub>0</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>0</sub>
AAS	Thr	250		1.024	1.024	0.976**	0.920**
	Val	310		0.977**	0.942**	0.981	0.926
	Ile	250		1.072	1.108	1.188	1.148
	Leu	440		1.111	1.084	1.025	0.998
	Lys	340		1.644	1.612	1.547	1.526
	Met+Cys	220		0.741*	0.786*	0.705*	0.614*
	Phe+Tyr	380		1.247	1.224	1.413	1.295
CS	Thr		292	0.877	0.877	0.836	0.788
	Val		411	0.737**	0.710**	0.740**	0.698**
	Ile		331	0.810	0.837	0.897	0.867
	Leu		534	0.916	0.893	0.845	0.822
	Lys		441	1.267	1.242	1.193	1.176
	Met+Cys		386	0.422*	0.448*	0.401*	0.349*
	Phe+Tyr		565	0.839	0.823	0.950	0.871
EAAI	必需氨基酸指数 essential amino acids index			74.44	73.80	74.24	69.42

注: \*为第一限制性氨基酸, \*\*为第二限制性氨基酸; H<sub>1</sub>和H<sub>0</sub>分别表示实验塘和对照塘中黄鳍鲷; L<sub>1</sub>和L<sub>0</sub>分别表示实验塘和对照塘中尼罗罗非鱼。下表同

Notes: Values with \* mean first restrictive amino acid, values with \*\* mean second restrictive amino acid; H<sub>1</sub> is *S. latus* in testing pond, H<sub>0</sub> is *S. latus* in the control pond; L<sub>1</sub> is *O. niloticus* in testing pond, L<sub>0</sub> is *O. niloticus* in the control pond, the same below

均符合国家限量标准; 对照塘近江牡蛎可食用部分中Cu和Cd的含量分别为57.113 mg/kg wet wt. 和1.163 mg/kg wet wt., 超过了国家限量标准, 泥蚶软体部中Cd含量达到1.231 mg/kg wet wt., 也超过限量标准。

两组水产品中重金属含量的差异是由于海马齿浮床对重金属的富集作用。有研究表明, 海马齿对Cd和Hg具有很强的吸附特性和耐受性<sup>[17-18]</sup>。严廷良等<sup>[19]</sup>研究海马齿对重金属Pb和Zn的响应表明了海马齿对重金属Pb和Zn具有一定的耐受性, 但是海马齿是否对Pb、Zn、Cu和Ni有很高的吸附性还有待进一步研究。

实验塘和对照塘中黄鳍鲷、尼罗罗非鱼和鳊肌肉的危险系数HQ均小于1, 不存在食用安全隐患, 可以放心食用。

### 3.2 两种模式养殖池塘的水产品肌肉品质

实验塘黄鳍鲷和尼罗罗非鱼肌肉的粗蛋白含量显著高于对照塘, 而粗脂肪含量显著低于

对照塘, 这符合人们对于高蛋白、低脂肪食物的要求<sup>[20]</sup>。水体低氧时, 鱼体需存储大量脂肪来抵御低氧等恶劣条件<sup>[21]</sup>。海马齿生态浮床原位修复技术能够有效改善养殖池塘水体中溶氧量<sup>[22]</sup>, 这可能是实验塘鱼肌肉中脂肪含量下降的重要原因。

鱼体肌肉中的氨基酸含量与组成是衡量鱼类营养价值和影响鱼肉风味的非常重要的指标<sup>[23]</sup>。各组鱼体肌肉共检测到16种氨基酸, 包括5种鲜味氨基酸和8种必需氨基酸。实验塘中黄鳍鲷和尼罗罗非鱼中高鲜味氨基酸含量使其肉质更加鲜美<sup>[8]</sup>。实验塘中黄鳍鲷和尼罗罗非鱼较高的必需氨基酸指数EAAI说明其营养价值高于对照塘中水产品。氨基酸评分AAS和化学评分CS显示, 实验塘两种鱼肌肉的限制性氨基酸均为(甲硫氨酸+胱氨酸)和缬氨酸。在以后的饲料投喂中, 可通过提高饲料中限制性氨基酸的含量促进鱼体更好地生长。

鱼肉中n-3多不饱和脂肪酸特别是DHA和

表 7 两种模式下脂肪酸组成及含量

Tab. 7 Composition and contents of fatty acids		%			
脂肪酸 fatty acids	H <sub>1</sub>	H <sub>0</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>0</sub>	
饱和脂肪酸 SFA					
月桂酸 C12:0	<0.05	<0.05	1.09±0.01	<0.05	
肉豆蔻酸 C14:0	1.40±0.04 <sup>b</sup>	1.89±0.13 <sup>a</sup>	3.40±0.10 <sup>a</sup>	2.30±0.09 <sup>b</sup>	
十五碳酸 C15:0	0.22±0.05 <sup>b</sup>	0.80±0.03 <sup>a</sup>	0.39±0.02	0.40±0.02	
棕榈酸 C16:0	22.48±0.50	22.61±0.74	27.63±1.06	27.30±1.34	
十七碳酸 C17:0	0.29±0.02 <sup>b</sup>	1.20±0.13 <sup>a</sup>	0.41±0.05 <sup>b</sup>	0.69±0.07 <sup>a</sup>	
硬脂酸 C18:0	7.21±0.04 <sup>b</sup>	8.48±0.12 <sup>a</sup>	6.99±0.23 <sup>b</sup>	10.09±0.13 <sup>a</sup>	
花生酸 C20:0	0.31±0.07	0.39±0.05	0.22±0.08	0.31±0.08	
二十二碳酸 C22:0	0.21±0.09 <sup>b</sup>	3.20±0.30 <sup>a</sup>	0.10±0.02 <sup>b</sup>	0.49±0.01 <sup>a</sup>	
二十三碳酸 C23:0	<0.05	0.52±0.03	<0.05	<0.05	
二十四碳酸 C24:0	1.41±0.02 <sup>b</sup>	2.98±0.22 <sup>a</sup>	1.31±0.03	4.52±0.18	
ΣSFA	33.50±0.59 <sup>b</sup>	41.91±0.06 <sup>a</sup>	41.52±0.78 <sup>b</sup>	46.09±1.37 <sup>a</sup>	
单不饱和脂肪酸 MUFA					
肉豆蔻油酸 C14:1n5	<0.05	<0.05	<0.05	0.10	
棕榈油酸 C16:1n7	3.41±0.07 <sup>a</sup>	2.09±0.02 <sup>b</sup>	2.22±0.01 <sup>b</sup>	4.92±0.08 <sup>a</sup>	
油酸 C18:1n9c	15.88±0.23 <sup>b</sup>	17.30±0.26 <sup>a</sup>	23.00±0.12 <sup>a</sup>	18.61±0.05 <sup>b</sup>	
二十碳一烯酸 C20:1	0.59±0.04	0.60±0.02	<0.05	1.39±0.01	
芥酸 C22:1n9	0.20±0.01	0.20±0.03	0.29±0.02 <sup>a</sup>	0.10±0.01 <sup>b</sup>	
二十四碳一烯酸 C24:1n9	0.70±0.04	0.71±0.02	0.21±0.01 <sup>a</sup>	0.09±0.02 <sup>b</sup>	
ΣMUFA	20.81±0.37	20.88±0.22	25.70±0.14	25.16±0.02	
多不饱和脂肪酸 PUFA					
亚油酸 C18:2n6c	16.18±0.09 <sup>a</sup>	15.07±0.18 <sup>b</sup>	9.03±0.11 <sup>b</sup>	9.60±0.05 <sup>a</sup>	
γ-亚麻酸 C18:3n6	0.72±0.04 <sup>a</sup>	0.50±0.03 <sup>b</sup>	1.10±0.05 <sup>a</sup>	0.59±0.08 <sup>b</sup>	
α-亚麻酸 C18:3n3	1.44±0.04 <sup>b</sup>	1.68±0.07 <sup>a</sup>	4.62±0.01 <sup>a</sup>	2.50±0.03 <sup>b</sup>	
二十碳二烯酸 C20:2	0.60±0.12	0.60±0.04	0.77±0.03 <sup>b</sup>	0.98±0.04 <sup>a</sup>	
二十碳三烯酸 C20:3n6	0.73±0.04 <sup>b</sup>	0.99±0.11 <sup>a</sup>	1.30±0.05 <sup>a</sup>	0.91±0.04 <sup>b</sup>	
花生四烯酸 ARA C20:4n6	6.18±0.09 <sup>a</sup>	4.07±0.04 <sup>b</sup>	8.72±0.04 <sup>a</sup>	5.01±0.12 <sup>b</sup>	
二十碳三烯酸 C20:3n3	0.10	0.10	1.10±0.08 <sup>a</sup>	0.30±0.05 <sup>b</sup>	
二十碳五烯酸 EPA C20:5n3	5.11±0.28 <sup>a</sup>	1.78±0.17 <sup>b</sup>	2.40±0.12 <sup>a</sup>	0.31±0.04 <sup>b</sup>	
二十二碳六烯酸甲酯 DHA C22:6n3	11.82±0.15 <sup>a</sup>	8.40±0.08 <sup>b</sup>	14.08±0.12 <sup>a</sup>	3.17±0.16 <sup>b</sup>	
二十二碳二烯酸 C22:2n6	<0.05	0.10	<0.05	0.10	
ΣPUFA	42.82±0.21 <sup>a</sup>	33.30±0.18 <sup>b</sup>	43.14±0.19 <sup>a</sup>	23.43±0.30 <sup>b</sup>	

EPA, 对抑制人类II型糖尿病、心血管疾病和炎症性疾病极其重要, 对婴幼儿视力和认知功能的发展具有积极作用<sup>[24-25]</sup>。实验塘中两种鱼肌肉中多不饱和脂肪酸总含量显著高于对照组, 其中DHA和EPA水平也显著高于对照塘。

鱼肉品质的差异是由遗传、生长环境、饲养、品种、规格、年龄等很多因素造成的, 其中生长环境和饲养条件是影响鱼体肌肉品质的外在因素<sup>[26]</sup>。本研究实验塘和对照塘不同的养殖模式造成环境条件的不同。实验塘铺设海马齿浮床, 形成一种原位立体生态修复的养殖模式。生态浮床对养殖污染水体的修复不仅体现在水质改善上, 更体现在可以恢复养殖水体生态系统循环方面。植物浮床系统对养殖环境的改善可促进浮游动物、底栖动物多样性的恢复和提高<sup>[27]</sup>, 而且对丰富藻类种类组成、降低过高生物量和微囊藻爆发的风险有一定作用<sup>[28]</sup>。底栖动物是水生态系统食物链的关键环节, 在物质循环、能量流动和初级生产力等方面均具有重要的作用<sup>[29]</sup>。浮游动物是许多经济水产动物的饵料, 因而其数量变化可以直接影响鱼类养殖<sup>[30]</sup>。在水产养殖生态系统中, 浮游藻类不仅可以作为适口饵料, 而且对改善水质、抑制有害菌群、减少病害也起到至关重要的作用。实验塘良好的水质条件及丰富适宜的浮游动物和浮游藻类饵料对黄鳍鲷和尼罗罗非鱼的肌肉品质具有重要作用。

总而言之, 实验塘中水产品的食用安全性高于对照塘, 且尼罗罗非鱼和黄鳍鲷的肌肉品质优于对照塘, 因此, 海马齿生态浮床系统对水产品的养殖品质具有有利影响。关于最佳的浮床铺设密度和鱼、贝的投放比例及生态浮床的技术优化等还需进一步探究。

#### 参考文献:

- [1] 邓来富, 江兴龙. 池塘养殖生物修复技术研究进展[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(5): 1270-1275.
- Deng L F, Jiang X L. The application and research progress of bioremediation in pondaquaculture[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(5): 1270-1275(in Chinese).
- [2] 吴伟, 胡庚东, 金兰仙, 等. 浮床植物系统对池塘水体微生物的动态影响[J]. 中国环境科学, 2008, 28(9): 791-795.

Wu W, Hu G D, Jin L X, et al. Dynamic influence on



- microorganisms in pond waterbody by the planted float system[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(9): 791-795(in Chinese).
- [3] 王炯. 水生植物水体修复技术简述[J]. *科技情报开发与经济*, 2012, 22(5): 105-107.
- Wang J. Discussion on aquatic plant-based water restoration technology[J]. *Sci-Tech Information Development & Economy*, 2012, 22(5): 105-107(in Chinese).
- [4] Wang C Y, Sample D J. Assessing floating treatment wetlands nutrient removal performance through a first order kinetics model and statistical inference[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 61(19): 292-302.
- [5] 窦碧霞, 黄建荣, 李连春, 等. 海马齿对海水养殖系统中氮、磷的移除效果研究[J]. *水生态学杂志*, 2011, 32(5):94-99.
- Dou B X, Huang J R, Li L C, *et al.* Research on effects of nutrient and phosphate removal from marine aquaculture system by *Sesuvium portulacastrum*[J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, 32(5): 94-99(in Chinese).
- [6] 董小霞, 颜昌宙, 王灶生, 等. 组合式水生植物净化系统对Cu、Pb和Cd的去除与生物富集特征[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(4): 1447-1453.
- Dong X X, Yan C Z, Wang Z S, *et al.* Removal efficiency and accumulation characteristics of Cu, Pb and Cd in combined purification systems[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(4): 1447-1453(in Chinese).
- [7] Borne K E, Fassman E A, Tanner C C. Floating treatment wetland retrofit to improve stormwater pond performance for suspended solids, copper and zinc[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 54: 173-182.
- [8] Hu L, Yun B, Xue M, *et al.* Effects of fish meal quality and fish meal substitution by animal protein blend on growth performance, flesh quality and liver histology of Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*)[J]. *Aquaculture*, 2013, s 372-375(1): 52-61.
- [9] Grigorakis K. Compositional and organoleptic quality of farmed and wild gilthead sea bream (*Sparus aurata*) and sea bass (*Dicentrarchus labrax*) and factors affecting it: A review[J]. *Aquaculture*, 2007, 272(1-4): 55-75.
- [10] 顾佳丽, 赵刚. 辽宁沿海城市海鱼和贝类中重金属含量的测定及评价[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(8): 63-67.
- Gu J L, Zhao G. Determination and safety evaluation of heavy metals in fish and shellfish from Liaoning coastal city[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(8): 63-67(in Chinese).
- [11] Storelli M M. Potential human health risks from metals (Hg, Cd, and Pb) and polychlorinated biphenyls (PCBs) via seafood consumption: estimation of target hazard quotients (THQs) and toxic equivalents (TEQs)[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2008, 46(8): 2782-2788.
- [12] 黄强, 赵静, 陈升桂, 等. 莱州海产品市场食用鱼类中重金属含量调查及评价[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(5): 248-251.
- Huang Q, Zhao J, Chen S G, *et al.* Investigation and evaluation of heavy metal content in edible fish available in a seafood market of Laizhou[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(5): 248-251(in Chinese).
- [13] Taweel A, Shuhaimi-Othman M, Ahmad A K. Assessment of heavy metals in tilapia fish (*Oreochromis niloticus*) from the Langat River and Engineering Lake in Bangi, Malaysia, and evaluation of the health risk from tilapia consumption[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, 93: 45-51.
- [14] 陈晓婷, 吴靖娜, 路海霞, 等. 蓝圆鲹肌肉中营养成分分析与评价[J]. *渔业现代化*, 2016, 43(1): 56-61.
- Chen X T, Wu J N, Lu H X, *et al.* Analysis and evaluation of nutritional components in the muscle of *Decapterus maruadsi*[J]. *Fishery Modernization*, 2016, 43(1): 56-61(in Chinese).
- [15] 肖明松, 王松, 鲍方印, 等. 淮河蚌埠段鳊鱼体内重金属富集研究[J]. *安徽科技学院学报*, 2012, 26(2): 28-34.
- Xiao M S, Wang S, Bao F Y, *et al.* Concentrations of heavy metals in the bighead carp *Aristichthys nobilis* from Huaihe River segment of Bengbu[J]. *Journal of Anhui Science and Technology University*, 2012, 26(2): 28-34(in Chinese).
- [16] 何琳, 江敏, 戴习林, 等. 养殖鱼体中重金属污染状况评价[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(10): 49-52, 58.
- He L, Jiang M, Dai X L, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in the farmed fish[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(10): 49-52, 58 (in Chinese).
- [17] Ghnaya T, Nouairi I, Slama I, *et al.* Cadmium effects on growth and mineral nutrition of two halophytes: *Sesuvium portulacastrum* and *Mesembryanthemum*

- crystallinum*[J]. Journal of Plant Physiology, 2005, 162(10): 1133-1140.
- [18] 梁胜伟, 胡新文, 段瑞军, 等. 海马齿对无机汞的耐性和吸附积累[J]. 植物生态学报, 2009, 33(4): 638-645.  
Liang S W, Hu X W, Duan R J, *et al.* Mercury tolerance and accumulation in the halophyte *Sesuvium portulacastrum*[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 33(4): 638-645(in Chinese).
- [19] Sinha A K, Kumar V, Makkar H P S, *et al.* Non-starch polysaccharides and their role in fish nutrition—a review[J]. Food Chemistry, 2011, 127(4): 1409-1426.
- [20] Økland H M W, Stoknes I S, Remme J F, *et al.* Proximate composition, fatty acid and lipid class composition of the muscle from deep-sea teleosts and elasmobranchs[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology, 2005, 140(3): 437-443.
- [21] 胡盼, 高乔, 韩雨哲, 等. 野生与池塘、工厂化养殖牙鲆肌肉理化品质及质构特性比较研究[J]. 水生生物学报, 2015, 39(4): 723-729.  
Hu P, Gao Q, Han Y Z, *et al.* Comparison of the physicochemical qualities and the muscle textural characteristics between the wild, pond- and factory-cultured *Paralichthys olivaceus*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2015, 39(4): 723-729(in Chinese).
- [22] 岳晓彩, 饶科, 熊安安, 等. 生态浮床原位修复对海水养殖池塘底栖动物群落结构的影响[J]. 水生态学杂志, 2014, 35(1): 22-27.  
Yue X C, Rao K, Xiong A A, *et al.* Effect of ecological floating bed on benthos community structure in a mariculture pond[J]. Journal of Hydroecology, 2014, 35(1): 22-27(in Chinese).
- [23] Deng Y, Luo Y L, Wang Y G, *et al.* Effect of different drying methods on the myosin structure, amino acid composition, protein digestibility and volatile profile of squid fillets[J]. Food Chemistry, 2015, 171: 168-176.
- [24] Lemahieu C, Bruneel C, Ryckebosch E, *et al.* Impact of different omega-3 polyunsaturated fatty acid (n-3 PUFA) sources (flaxseed, *Isochrysis galbana*, fish oil and DHA Gold) on n-3 LC-PUFA enrichment (efficiency) in the egg yolk[J]. Journal of Functional Foods, 2015, 19: 821-827.
- [25] Siriwardhana N, Kalupahana N S, Moustaid-Moussa N. Health benefits of n-3 polyunsaturated fatty acids: Eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid[J]. Advance in Food and Nutrition Research, 2012, 65: 211-222.
- [26] 高露姣, 黄艳青, 夏连军, 等. 不同养殖模式下红鳍东方鲀的品质比较[J]. 水产学报, 2011, 35(11): 1668-1676.  
Gao L J, Huang Y Q, Xia L J, *et al.* Comparison of flesh quality of farmed fugu, *Takifugu rubripes* from different culture models[J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 35(11): 1668-1676(in Chinese).
- [27] 李爽, 谢从新, 何绪刚, 等. 水蕴菜浮床对草鱼主养池塘轮虫群落结构的影响[J]. 水生生物学报, 2014, 38(1): 43-50.  
Li S, Xie C X, He X G, *et al.* Effect of *Ipomoea aquatica* floating-bed on the rotifer community structure in grass carp pond[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2014, 38(1): 43-50(in Chinese).
- [28] 李晓莉, 陶玲, 张世羊, 等. 陶粒浮床对草鱼养殖池塘水质和浮游植物的影响[J]. 水生生物学报, 2015, 39(3): 507-516.  
Li X L, Tao L, Zhang S Y, *et al.* The effects of a new ceramsite ecological floating bed on the water quality and phytoplankton in grass carp culture ponds[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2015, 39(3): 507-516(in Chinese).
- [29] Carvalho S, Barata M, Pereira F, *et al.* Distribution patterns of macrobenthic species in relation to organic enrichment within aquaculture earthen ponds[J]. Marine Pollution Bulletin, 2006, 52(12): 1573-1584.
- [30] 王胜男, 陈卫. 浅析淡水浮游动物的种类组成及其生态功能作用[J]. 生物学通报, 2012, 47(10): 10-13.  
Wang S N, Chen W. Research on species composition and ecological functions of zooplanktons in fresh water[J]. Bulletin of Biology, 2012, 47(10): 10-13(in Chinese).

## Effects of ecological floating bed on content of heavy metals and nutritional quality in aquatic products

ZHAI Zhe, FENG Jianxiang, GAO Shanshan, CHEN Jingfang, HUANG Jianrong, LI Zufu\*

(School of Life Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** To study the effects of ecological floating beds on the quality of aquatic products, three species of fish (*Sparu latus*, *Oreochromis niloticus* and *Mugil cephalus*) and two species of mollusk (*Crassostrea rivularis* and *Tegillarca granosa*) were collected from the polyculture pond with floating bed and traditional monoculture ponds. Concentrations of heavy metals including Ni, Cu, Zn, Cd and Pb were measured in muscles, gills and viscera of fish and in the edible part of mollusk for health risk assessment. Nutritional quality of *S. latus* and *O. niloticus* was analyzed in terms of their muscle nutrition, amino acids and fatty acids composition. The results showed that the concentrations of five heavy metals of all products from the experimental pond conformed to the criteria values for aquatic food in China. However, the concentrations of Cu (57.113 mg/kg wet wt) and Cd (1.163 mg/kg wet wt) in *C. rivularis* and the concentration of Cd in *T. granosa* from the control ponds were all beyond the criteria values. According to the Hazard Quotient, there will be no potential risks resulting from ingestion of fish from two kinds of ponds. Content of umami amino acid of *S. latus* from the experimental pond was significantly higher than that of the control pond. *O. niloticus* from the experimental pond had notably higher contents of TAA, EAA and DAA than those from control pond. Contents of polyunsaturated fatty acids of *S. latus* and *O. niloticus* from the testing pond were all higher than those in the control ponds, while opposite results were observed for the contents of saturated fatty acids. Generally, polyculture mode with in-situ ecological floating beds system demonstrated superiorities to the traditional monoculture mode according to the health risk assessment and nutritional quality of aquatic products.

**Key words:** aquaculture mode; heavy metal; nutritional quality; assessment of human health risk

**Corresponding author:** LI Zufu. E-mail: lsslzf@mail.sysu.edu.cn

**Funding projects:** Science and Technology Planning Project of Guangdong Province, China (2015B020235006); Public Science and Technology Research Funds Projects of Ocean (201305021); Program of Funds Expenditure on 2011/2012 Central Divided Water Exploration (Environmental Protection); Science and Technology Foundation of Macao, China (045/2010/A)