

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2019073012

张文凤, 黄伟雄. 广东经济鱼类不饱和脂肪酸的含量分析与组成特征评价[J]. 环境化学, 2020, 39(5): 1181-1191.

ZHANG Wenfeng, HUANG Weixiong. The levels and evaluation of component characteristics of unsaturated fatty acids in Guangdong economic fish species[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(5): 1181-1191.

广东经济鱼类不饱和脂肪酸的含量分析与组成特征评价*

张文凤^{1,2} 黄伟雄^{2**}

(1. 中国广州分析测试中心, 广东省测试分析研究所, 广东省食品营养与安全快速检测仪器工程技术研究中心, 广州, 510070;
2. 广东省疾病预防控制中心, 国家食品安全风险监测参比实验室(重金属), 广州, 511430)

摘要 采用水解提取-气相色谱法测定鱼肉中脂肪酸的含量和组成, 采用元素分析仪-同位素比值质谱法(EA-IRMS)测定鱼肉碳稳定同位素比值($\delta^{13}\text{C}$)。开展广东沿海地区主要经济鱼类肌肉脂肪酸的含量分析及组成特征评价研究。研究表明, 25种经济鱼类鱼肉中主要含有单不饱和脂肪酸、n-6和n-3系列多不饱和脂肪酸, 以及少量反式脂肪酸(TFAs); 鱼肉的优势脂肪酸为油酸(OA)、亚油酸(LA)和二十二碳六烯酸(DHA); 鲮鱼含有较高的二十碳五烯酸(EPA)和DHA, 合计 $370.0\text{ mg}\cdot(100\text{ g})^{-1}$; 鲮鱼鱼肉中TFAs的含量($280.0\text{ mg}\cdot(100\text{ g})^{-1}$)远高于其它品种鱼类; 鲢鱼和黑鲷EPA+DHA的含量较高, 分别为 $(154.4\pm 100.0\text{ mg}\cdot(100\text{ g})^{-1})$ 和 $1287\pm 291.1\text{ mg}\cdot(100\text{ g})^{-1}$, 两种鱼均具有较好的商业开发价值; 统计学分析结果表明了鱼类的不饱和脂肪酸在组成上具有种属差异, 揭示了浮游食性的鱼类其鱼肉组织中MUFAs、n-6 PUFAs以及n-3 PUFAs的含量高于底栖食性的鱼类。鱼肉脂肪酸的组成差异较大, 表现为品种、空间以及食性差异。建议市民在日常膳食中丰富食物的种类和数量, 警惕过多地食用单一品种鱼类(尤其是鲮鱼)而导致TFAs摄入过多的风险, 从而确保鱼类脂肪酸的平衡摄入。

关键词 不饱和脂肪酸, 组成特征, 健康风险, 经济鱼类, 差异分析。

The levels and evaluation of component characteristics of unsaturated fatty acids in Guangdong economic fish species

ZHANG Wenfeng^{1,2} HUANG Weixiong^{2**}

(1. China National Analytical Center, Guangzhou, Guangdong Institute of Analysis, Guangdong Engineering and Technology Research Center of Rapid Testing Instrument for Food Nutrition and Safety, Guangzhou, 510070, China;
2. National Reference Laboratory of Food Safety Risk Surveillance for Heavy Metal, Guangdong Province Center for Disease Control and Prevention, Guangzhou, 511430, China)

Abstract: The study on the levels and the composition characteristics of the fatty acids in the fish muscles from coastal southern China was carried out. The concentrations and composition of the fatty acids were determined by digestion extraction-gas chromatography, while the $\delta^{13}\text{C}$ values in fish muscles were tested by Elemental Analyzer-Isotope Ratio Mass Spectrometry. As a result, monounsaturated fatty acids (MUFAs), n-6 and n-3 polyunsaturated fatty acids (PUFAs) in fish muscles of most of the 25 commercial fish species, to be noticed, *trans*-fatty acids (TFAs) were also detected. The dominant fatty acids were found to be oleic acid (OA), linoleic acid (LA), and docose hexaenoic acid (DHA). A relatively high amount of eicosapentenoic acid (EPA) and DHA

2019年7月30日收稿(Received: July 30, 2019).

* 广东省科学院发展专项资金(2019GDASYL-0103027)资助。

Supported by the GDAS' Project of Science and Technology Development(2019GDASYL-0103027).

** 通讯联系人: Tel: 020-31051640, E-mail: 1571459635@qq.com

Corresponding author, Tel: 020-31051640, E-mail: 1571459635@qq.com

was detected in bluespot mullet muscle ($370.0 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$), but unexpectedly, this fish also brought a relatively higher level of TFAs ($280.0 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$) than other fish species. The concentrations of the sum of EPA and DHA were relative higher in Silver carp and Gilthead seabream than other fish species, i.e. 154.4 ± 100.0 and $1287 \pm 291.1 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$, respectively. It means that, both of the Silver carp and Gilthead seabream have good commercial value. The results of statistical analysis demonstrated the species variation in composition of unsaturated fatty acids in the fish species, and indicated that the levels of MUFAs, n-6 PUFAs, and n-3 PUFAs were higher in pelagic fish than benthic fish. The composition of fatty acids in fish muscles is various, with differences in species, space and habitats, and feeding habits. It should be noted that fish eaters should take into consideration about the excessive intake of TFAs (especially when eating the bluespot mullet). And it is recommended that the public should enrich the type and the quantity of fish in the diet to ensure a balanced intake of fatty acids.

Keywords: unsaturated fatty acids, component characteristics, human health risk, commercial fishes, variation analysis.

脂肪酸(fatty acids, FAs)是机体的营养物质,同时是机体的主要能量来源之一.鱼类是一种重要的自然资源,在某种意义上,鱼类为人类提供了对人体健康有重要影响的必需脂肪酸(essential fatty acids, EFAs)和多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFAs).鱼体中的脂肪酸包括饱和脂肪酸(saturated fatty acid, SFAs)、单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acid, MUFAs)、n-3 系列多不饱和脂肪酸(n-3 PUFAs)、n-6 系列多不饱和脂肪酸(n-6 PUFAs)等.通过平衡膳食摄入这些脂肪酸,将给人体健康带来多方面的益处.

MUFAs 可以降低人体血浆胆固醇和甘油三酯的浓度^[1].n-3 PUFAs 几乎存在于所有的食物当中,尤其是肉类和鱼类^[2].研究发现,n-3 PUFAs 对新生儿神经系统的发育有促进作用^[3-5],对人体心血管系统有保护作用^[6],还能减缓心血管系统疾病的发展^[7-8],降低免疫性疾病^[9-12]、缺血性中风、突发性或非突发性心肌梗死以及冠心病等疾病的罹患风险^[13-15].虽然关于 n-6 PUFAs 和 n-3 PUFAs 之间是否能在体内相互转化尚未达成一致的认识,但是通过膳食摄入来维持 n-6 PUFAs 和 n-3 PUFAs 平衡的重要性早已深入人心^[2, 16].除运动以外,肥胖症预防措施中的一项重要膳食因子是,将 n-6 PUFAs 与 n-3 PUFAs 的比值(n-6 PUFAs/n-3 PUFAs)范围控制在 1—2:1 范围内^[2].饮食中过高的摄入 n-6 PUFAs 将改变一个人的健康生理状态,出现血栓前期症状^[16].

我国约 3 亿人受到各种慢性疾病的困扰^[17],而很多常见慢性疾病的发生、发展与脂肪酸的失衡有着非常密切的关系,但是目前膳食脂肪酸的失衡导致的健康风险并未引起太多关注.临床研究表明脂肪酸失衡是引起肥胖症、糖尿病和营养不良的一个重要因素^[17].其中,n-6 和 n-3 多不饱和脂肪酸的营养失衡可导致血脂紊乱、雄性生育障碍、小鼠肠道菌群变化并诱发系列肠道疾病的发生^[18-19].一些营养学方面的权威专家提出,市民在日常膳食中需要保证 SFAs、MUFAs 和 PUFAs 的平衡摄入(1:1:1)^[20].那么,在评价鱼类膳食对脂肪酸平衡的贡献之前,需要了解鱼类中脂肪酸的含量及其组成特征.

本研究开展鱼类脂肪酸含量分析研究,从多个角度分析阐述海水鱼鱼肉中不饱和脂肪酸的含量分布特征,旨在了解鱼体长期的营养情况,了解鱼类所处的食物链及其食物来源,了解鱼体脂肪酸的含量、组成及其影响因素.为海洋鱼类资源的保护和开发利用、鱼类食品的营养价值评价以及人类膳食中脂肪酸的平衡提供数据基础和参考依据.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 仪器与试剂

Milli-Q 超纯水处理系统,回流冷凝装置,7890B 型气相色谱仪(美国 Agilent 公司),HP-88 毛细管色谱柱(100 m×0.25 mm×0.20 μm,美国 Agilent 公司),Flash 2000 元素分析仪-Delta V+同位素比值质谱联

用仪(EA-IRMS),HH-S24 数显恒温水浴锅,TGL-20M 医用离心机,百万分之一电子天平(德国赛多利斯公司),万分之一电子天平(德国赛多利斯公司),振荡器。

标准物质与试剂:37 种脂肪酸甲酯混标溶液(美国 Sigma 公司)、十一碳酸甘油三酯(美国 Sigma 公司、用作脂肪酸测定的内标化合物)、L-谷氨酸 USGS40(美国国家标准技术研究所)、盐酸(优级纯)、氨水(分析纯)、焦性没食子酸、乙醚(分析纯)、石油醚(分析纯)、乙醇(95%)、甲醇(色谱纯)、二氯甲烷(色谱纯)、正庚烷(色谱纯)、三氟化硼甲醇溶液(浓度为 15%)、无水硫酸钠(分析纯)、氯化钠(分析纯)。

1.2 研究区域与样品采集

广东地区海洋生物资源相当丰富,鱼类产品年产量高,居民消费量高,鱼类是当地居民膳食结构中不可或缺的食品。汕尾市(SW)和湛江市(ZJ)是兼具有上述特点的典型地区,此外,这两个地区的沿海岸有着不同的水文学特征,即在汕尾市 120 km 的海岸范围内水的深度均高于 200 m,在湛江市 120 km 的海岸范围内水深均低于 60 m,因此,以 SW 为深水区,以 ZJ 为浅水区。

在预调查和预实验的基础上,2016 年 11 月—12 月在 SW 和 ZJ 当地渔民的协助下,在水产品农贸市场和渔港市场等水产品流通领域随机采集附近海域捕捞的新鲜鱼类,品种涵盖了 25 种广东常见的经济鱼类,其中有 21 种海水鱼(样本量为 204)和 4 种淡水鱼(样本量为 30)。这 25 种鱼类的规格详见表 1。

表 1 随机采集的 25 种广东常见经济鱼类的规格

Table 1 Body sizes of the 25 common economical fish species in Guangdong province, China

名称	体重 Body weight/g	体长 Body length/mm	体宽 Body width/mm
淡水鱼 Freshwater fish	1070 (654—1351)	476 (339—600)	182 (155—220)
草鱼 Grass carp	(1207)	(488)	(172)
鲢鱼 Silver carp	n.d.	(540)	n.d.
鳙鱼 Bighead carp	(1351)	(600)	(220)
鲫鱼 Tilapia	654 (538—769)	339 (337—341)	(155)
海水鱼 Marine fish	329 (37—1162)	262 (146—466)	70 (36—124)
杂食性海水鱼 Omnivorous marine fish	439 (60—1162)	279 (190—466)	85 (36—124)
黑鲷 Gilthead seabream	461 (300—737)	254 (166—330)	105 (90—120)
美国红鱼 Red drum	(1162)	466 (465—467)	124 (124—125)
多鳞鱈 Silver sillago	n.d.	(179)	(29)
黄鳍鲷 Yellowfin seabream	(396)	244 (203—285)	96 (93—98)
鲯鱼 Bluespot mullet	n.d.	(175)	(51)
龙头鱼 Bombay-duck	60 (48—78)	241 (225—257)	36 (27—64)
褐篮子鱼 Mottled spinefoot	114 (103—128)	190 (155—216)	63 (56—65)
肉食性海水鱼 Carnivorous marine fish	268 (37—855)	252 (146—466)	62 (37—84)
海鳗 Daggertooth pike conger	(855)	430 (429—431)	84 (84—85)
带鱼 Smallhead hairtail	n.d.	(788)	(81)
短尾大眼鲷 Red bigeye	226 (222—236)	264 (250—278)	77 (72—93)
多齿蛇鲻 Greater lizardfish	n.d.	(242)	(51)
二长棘鲷 Red snapper	74 (72—77)	146 (139—153)	70 (66—76)
蓝圆鲹 Japanese scad	193 (125—305)	232 (152—288)	64 (50—80)
石斑鱼 Hong Kong grouper	372 (104—1142)	192 (186—364)	57 (55—141)
鳗鲩 Striped ell catfish	n.d.	(196)	(27)
金线鱼 Golden threadfin bream	37 (25—64)	173 (142—218)	37 (30—72)
黄花鱼 Yellow croaker	n.d.	n.d.	n.d.
白姑鱼 Silver croaker	47 (29—64)	159 (142—182)	44 (32—56)
鲷鱼 Pompano	n.d.	(307)	(178)
龙舌鱼 Macao tonguesole	40 (33—62)	205 (186—246)	49 (47—51)
马鲛鱼 Mackerel	(565)	466 (448—484)	78 (75—80)

注:括号前的数据为平均值,括号内的数据为数值范围;n.d.为未检测。

Note:the data before the brackets are the mean values, and the data in the brackets are the ranges of the detected data; while n.d. represented not detected.

采集回来的 234 份鱼类样品经冷链运输至实验室,在实验室内对鱼类进行清洗、解剖(去皮、去内

脏、取鱼肉)、匀浆至泥糊状等一系列操作后,将鱼肉样品置于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下保存,待测。

1.3 脂肪酸含量的测定与计算

根据 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》,提取鱼肉组织中的脂肪,采用内标法分析样品脂肪酸的含量和组成,样品脂肪酸的含量均以鲜重计。

脂肪酸目标物及其计算:

(1) MUFAs 包含十六烷烯酸/棕榈油酸 C16:1 (palmitoleic acid, POA)、顺-9-十八烯酸/油酸 C18:1n9c (oleic acid, OA)、顺-11-二十碳烯酸/鳕油酸 C20:1n9 (Gadoleic acid)、顺-13-二十二碳烯酸/芥子酸 C22:1n9 (Erucic acid) 以及顺-15-二十四碳烯酸/神经酸或鲨油酸 C24:1n9 (tetracosenic acid) 等。即 $[\text{MUFAs}] = [\text{C16:1}] + [\text{C18:1n9c}] + [\text{C20:1n9}] + [\text{C22:1n9}] + [\text{C24:1n9}]$ 。

(2) n-6 PUFAs 包含全顺-9,12-十八碳二烯酸/亚油酸 C18:2n6c (linoleic acid, LA) 全顺-6,9,12-十八碳三烯酸/ γ -亚麻酸 C18:3n6 (γ -Linolenic acid, GLA)、全顺-11,14-二十碳二烯酸 C20:2n6 (eicosadienoic acid, EDA)、全顺-8,11,14-二十碳三烯酸/二高- γ -亚麻酸 C20:3n6 (dihomo- γ -linolenic acid, DGLA) 以及全顺-5,8,11,14-二十碳四烯酸/花生四烯酸 C20:4n6 (arachidonic acid, AA) 等。即 $[\text{n-6 PUFAs}] = [\text{C18:2n6c}] + [\text{C18:3n6}] + [\text{C20:2n6}] + [\text{C20:3n6}] + [\text{C20:4n6}]$ 。

(3) n-3 PUFAs 包含全顺-9,12,15-十八碳三烯酸/ α -亚麻酸 C18:3n3 (Alpha-linolenic acid, ALA)、全顺-11,14,17-二十碳三烯酸 C20:3n3 (cis-11,14,17-eicosatrienoic acid,)、全顺-5,8,11,14,17-二十碳五烯酸 C20:5n3 (eicosapentenoic acid, EPA) 以及全顺-4,7,10,13,16,19-二十二碳己烯酸 C22:6n3 (docose hexaenoic acid, DHA) 等。即 $[\text{n-3 PUFAs}] = [\text{C18:3n3}] + [\text{C20:3n3}] + [\text{C20:5n3}] + [\text{C22:6n3}]$, 其中 $[\text{C20:5n3}] + [\text{C22:6n3}] = \text{EPA} + \text{DHA}$ 。

(4) 反式脂肪酸 (*trans*-fatty acids, TFAs) 包含反-9-十八烯酸/反油酸 C18:1n9t (Methyl *trans*-9-octadecenoate) 和全反-9,12-十八碳二烯酸/反亚油酸 C18:2n6t (*trans*-9,12-Octadecenoic acid) 等。即 $[\text{TFAs}] = [\text{C18:1n9t}] + [\text{C18:2n6t}]$ 。

(5) MUFAs、n-6 PUFAs、n-3 PUFAs 以及 TFAs 等脂肪酸均属于不饱和脂肪酸 (UFAs), 其含量的加和为总不饱和脂肪酸 (Total UFAs), 即 $[\text{Total UFAs}] = [\text{MUFAs} + \text{n-6 PUFAs} + \text{n-3 PUFAs} + \text{TFAs}]$ 。

(6) n-6 PUFAs 含量与 n-3 PUFAs 含量的比值缩写为 n-6 PUFAs/n-3 PUFAs 或 n-6/n-3, 即 $[\text{n-6 PUFAs}/\text{n-3 PUFAs}] = [\text{n-6 PUFAs}]/[\text{n-3 PUFAs}]$ 。

1.4 碳稳定同位素比值的测定

鱼肉样品中碳稳定同位素比值 ($\delta^{13}\text{C}$) 通过元素分析-同位素比值质谱法进行测定, 鱼肉去脂、干燥、研磨成均质样品, 称取 0.500 mg 干燥粉末于 EA-IRMS 联用仪中检测, 具体步骤按照文献执行^[21]。

1.5 质量保证与质量控制

每批样品至少含 1 个空白、10% 平行样、10% 标准品; 平行样的相对标准偏差小于 5%, 采用内标法进行定量。

1.6 统计分析

运行 SPSS 对数据进行频率统计 (bootstrap 抽样方法, 抽样次数 $n = 1000$, 置信区间 95%)。采用 1-样本 K-W 检验对变量 (鱼类体重、体长、体宽) 进行正态分布、均匀分布和泊松分布检验。K-样本 K-W 检验对变量 (鱼类的空间/地域、品种、食性等属性) 逐一进行差异性检验 (Monte Carlo 算法, 模拟次数 $n = 10000$, 置信度 99%)。利用皮尔逊 (双变量) 相关性分析法逐一评价两两变量之间的相关关系是否显著, 变量间相关的强度与方向采用皮尔逊相关系数 (Pearson correlation coefficient, 即 r_p) 来表示。当 P 值小于 0.05 时则判断差异具有统计学意义。此外, 还采用了 Excel 和 Origin 等软件对数据进行统计分析和绘图。

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 鱼肉中脂肪酸的含量分析及其与鱼类规格的相关性分析

鱼类的规格在一定程度上反映了鱼类样本的代表性。本研究随机采集鱼类的体重、体长和体宽等规格的均值范围分别为 37—1351 g、146—788 mm 和 27—220 mm (表 1)。经 1-样品 Kruskal Wallis 检验, 所

采集鱼类的规格与均匀分布和泊松分布存在显著差异,与正态分布无显著差异,说明随机采集鱼类样品的规格服从正态分布,样本具有一定的代表性。经 K-样本 K-W 检验,按品种分,25 个品种鱼类的规格差异不显著;按水域分,淡水鱼和海水鱼在体重、体长和体宽等规格上具有显著差异($P < 0.05$),统计量 χ^2 的值范围在 5 到 7 之间,并且本研究中淡水鱼的规格比海水鱼的规格更大(规格大小见表 1);而杂食性海水鱼与肉食性海水鱼在规格上的无显著差异($P > 0.05$)。

为明确鱼肉中脂肪酸含量与鱼类规格的关系,本研究对鱼类规格指标之间,以及多种脂肪酸的含量指标与鱼类规格指标等逐一进行了双变量相关性分析。表 2 汇总了这些指标两两之间的相关性系数及其显著程度,结果显示:(1)鱼类体重与体长、体重与体宽、体长与体宽等两两之间均存在显著正相关性,其相关系数分别为 0.931、0.880、0.578, P 值分别为 < 0.001 、 < 0.001 、0.004;(2)鱼肉中 MUFAs、PUFAs、n-6 PUFAs、n-3 PUFAs、TFAs、EPA、DHA、EPA+DHA 以及 Total UFAs 等脂肪酸含量与鱼类体重的相关性均不显著;(3)鱼肉中 PUFAs、n-6 PUFAs、n-3 PUFAs、TFAs、EPA、DHA、EPA+DHA 以及 Total UFAs 等脂肪酸含量与鱼类体长的相关性均不显著,但鱼肉中 MUFAs 与鱼类体长呈显著正相关关系,其相关性系数为 0.452;(4)鱼肉中 PUFAs、n-3 PUFAs、TFAs、EPA、DHA、EPA+DHA 以及 Total UFAs 等脂肪酸含量与鱼类体长的相关性均不显著,但鱼肉中 n-6 PUFAs 与鱼类体宽呈较强的正相关关系($r_p = 0.524$)且具有统计学意义。上述结果说明了鱼肉中 PUFAs、n-3 PUFAs、TFAs、EPA、DHA、EPA+DHA 以及 Total UFAs 等脂肪酸的含量可能与鱼类的规格无关。

由于 n-6 PUFAs/n-3 PUFAs 的比值在脂肪酸平衡膳食中具有重要的参考意义,因此,本研究探讨了鱼肉 n-6/n-3 比值与鱼类规格的相关关系(表 2)。结果表明,鱼肉 n-6/n-3 比值与鱼类体重、体宽均呈较强的正相关关系(r_p 分别为 0.517 和 0.661)且具有统计学意义,但鱼肉 n-6/n-3 比值与鱼类体长的相关性($r_p = 0.299$)无统计学意义。

表 2 鱼类规格与多种脂肪酸含量的皮尔逊相关系数

Table 2 The Pearson's correlation coefficient between the contents of the 4 types of fatty acids and the values of $\delta^{13}\text{C}$ in fish muscles

规格 Fish sizes/FAs	MUFAs	n-6 PUFAs	n-3 PUFAs	PUFAs	TFAs	EPA	DHA	EPA+DHA	Total PUFAs	n-6/n-3
体重 Body weight/g ^a	0.287	0.409	0.066	0.365	0.168	0.078	0.06	0.06	-0.183	0.517 [*]
体长 Body length/mm ^b	0.452 [*]	0.251	0.054	0.395	-0.134	0.073	0.037	0.037	-0.300	0.299
体宽 Body width/mm ^c	-0.079	0.524 [*]	0.172	-0.127	-0.087	0.273	0.182	0.183	-0.115	0.661 ^{***}

注:^a $n = 17$; ^b $n = 24$; ^c $n = 23$; * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$ 。

进一步地,对上述呈正相关关系的变量之间进行一元线性回归分析,结果如图 1 所示。从修正的相关系数的平方(R_{adj}^2)可以看出鱼肉中 MUFAs 与鱼类体长(图 1A, $R_{\text{adj}}^2 = 0.1685$)、鱼肉中 n-6PUFAs 与鱼类体宽(图 1B, $R_{\text{adj}}^2 = 0.2381$)、鱼肉 n-6/n-3 比值与鱼类体重(图 1C, $R_{\text{adj}}^2 = 0.2183$)之间存在较弱的正相关关系($R_{\text{adj}}^2 < 0.3$)。而鱼肉 n-6/n-3 比值与鱼类体宽之间(图 1D, $R_{\text{adj}}^2 = 0.4100$)存在中等的正相关关系($0.3 < R_{\text{adj}}^2 < 0.5$)。由该一元线性回归方程可判断体宽为 87.3 mm 附近的鱼类其鱼肉中 n-6/n-3 的比值可能接近 1:1。

鱼类肌肉组织中各种不饱和脂肪酸的含量范围分别为 MUFAs 102.8—5655 $\text{mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ 、PUFAs 145.3—3057 $\text{mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ 和 TFAs 2.783—276.5 $\text{mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ 。表 3 展示了 25 种鱼类肌肉中各不饱和脂肪酸的含量水平。富含 MUFAs ($> 2000 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$) 的鱼类有鲫鱼、黑鲷、黄花鱼以及鲳鱼,同时,这几种鱼富含 PUFAs ($> 1000 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$)。从这个角度看,这 4 种鱼类的营养价值远远高于不饱和脂肪酸含量小于 $400 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ 的龙舌鱼、白姑鱼、多齿蛇鲻以及短尾大眼鲷。其中,鲫鱼中 MUFAs 和 PUFAs 均值分别高达 $5655 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ 和 $3057 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ 。从总样本量(平均值)看,淡水鱼中 MUFAs 的含量(均值为 $1751 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$)高于海水鱼(均值为 $809.1 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$),这可能与淡水鱼的规格(体长均值为 476 mm)大于海水鱼(体长均值为 262 mm)有关。

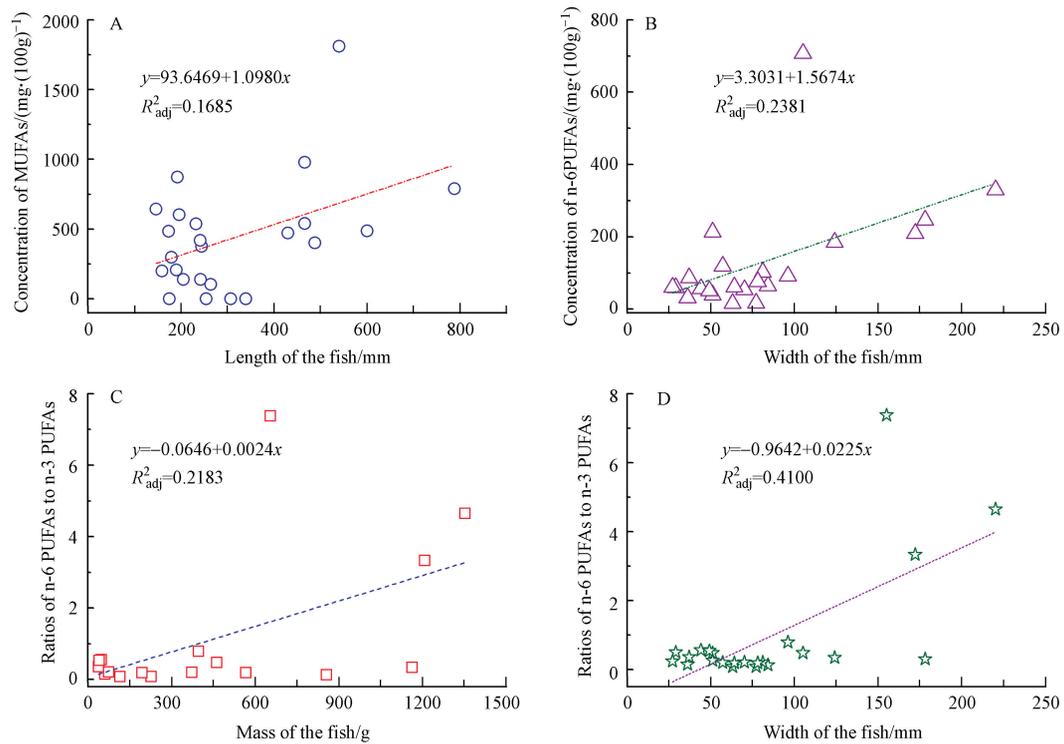


图1 鱼肉脂肪酸与鱼类规格的散点图及其一元线性回归方程

Fig.1 The scatter plots of FAs in fish muscles vs. the fish sizes, and four of the one-dimensional linear regression equations

表3 25种鱼类肌肉中MUFAs、PUFAs、TFAs、Total UFAs的含量水平

Table 3 The levels of MUFAs, PUFAs, TFAs, and Total UFAs in fish muscles of the 25 different economical fish species $\text{mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$

名称 Name	n	MUFAs	PUFAs	TFAs	Total UFAs
淡水鱼 Freshwater fish	30	1751	946.6	19.62	2691
草鱼 Grass carp	12	401.1	273.2	5.575	679.9
鲢鱼 Silver carp	6	1812	598.4	49.57	2460
鳙鱼 Bighead carp	6	486.0	401.3	3.617	890.9
鲫鱼 Tilapia	6	5655	3057	33.78	8746
海水鱼 Marine fish	204	809.1	519.6	34.01	1370
杂食性海水鱼 Omnivorous marine fish	63	1001	661.8	73.23	1613
黑鲷 Gilthead seabream	6	3720	2198	66.44	5985
美国红鱼 Red drum	6	979.2	730.4	48.62	1758
多鳞鲱 Silver sillago	13	298.9	181.2	8.143	488.2
黄鳍鲷 Yellowfin seabream	13	376.9	207.7	9.192	593.8
鳙鱼 Bluespot mullet	13	1720	656.7	276.5	2653
龙头鱼 Bombay-duck	6	418.6	250.9	8.427	678.0
褐篮子鱼 Mottled spinefoot	6	206.2	209.7	8.774	424.7
肉食性海水鱼 Carnivorous marine fish	141	727.3	521.9	17.31	1266
海鳗 Daggertooth pike conger	6	472.5	552.5	16.05	1041
带鱼 Smallhead hairtail	13	789.8	590.9	16.20	1397
短尾大眼鲷 Red bigeye	6	102.8	237.2	2.783	342.7
多齿蛇鲻 Greater lizardfish	6	139.0	187.7	6.363	333.0
二长棘鲷 Red snapper	13	642.5	310.8	18.59	971.9
蓝圆鲹 Japanese scad	12	538.4	394.1	13.54	946.1
石斑鱼 Hong Kong grouper	14	873.1	720.8	43.47	1637
鳗鲡 Striped ell catfish	6	602.5	311.7	14.15	928.3
金线鱼 Golden threadfin bream	12	484.2	330.4	16.54	831.2
黄花鱼 Yellow croaker	7	2073	1216	50.52	3340
白姑鱼 Silver croaker	6	199.0	157.8	3.599	360.4
鲷鱼 Pompano	14	2255	1625	22.68	3279
龙舌鱼 Macao tonguesole	13	138.6	145.3	6.500	290.4
马鲛鱼 Mackerel	13	539.2	468.2	8.709	1016

鱼类肌肉组织中 MUFAs 的含量对 Total UFAs 的贡献最大(图 2),贡献率高达 55.2%,DHA 对 n-3 PUFAs 的贡献最大,贡献率高达 77.4%。总体而言,淡水鱼肌肉中不饱和脂肪酸的含量水平高于海水鱼,淡水鱼中 MUFAs 的含量与 PUFAs 的含量的比(1.96:1)高于海水鱼(1.64:1),95% 鱼肉中 TFAs 的含量低于 $100.0 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$,然而淡水鱼中 TFAs 的含量也高于海水鱼。暗示了鱼类脂肪酸的含量可能受地域(咸淡水)和品种的影响。值得一提的是,海水鱼肌肉中 n-3 PUFAs 的含量高于 n-6 PUFAs,而淡水鱼的情况则相反,这提示增加食用海水鱼可以有效补充 n-3 PUFAs(DHA),而食用淡水鱼有利于平衡膳食摄入 n-6 PUFAs 和 n-3 PUFAs。

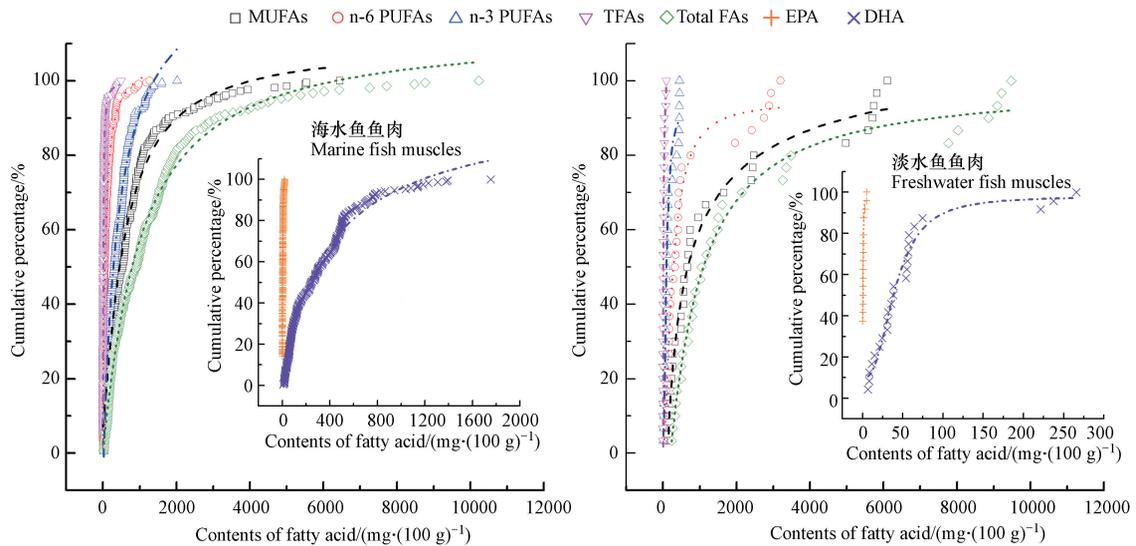


图 2 鱼肉中 MUFAs、n-6 PUFAs、n-3 PUFAs、TFAs、Total UFAs、EPA 以及 DHA 等不饱和脂肪酸含量的累积百分比
Fig.2 The cumulative percentage of contents of MUFAs, n-6 PUFAs, n-3 PUFAs, TFAs, Total UFAs, EPA, and DHA in fish muscles

广东沿海地区的经济鱼类不同品种之间不饱和脂肪酸的含量差别较大(表 3)。张红霞等研究发现,我国黄海 38 种海水鱼中 SFAs、MUFAs、PUFAs 的平均比例为 1:0.7:1.1^[22]。其中 MUFAs 与 PUFAs 的平均比例 0.1:1.1 与本研究的情况并非一致,如上所述,广东沿海海域 21 种海水鱼中 MUFAs、PUFAs 的平均比例为 1.6:1。这暗示了鱼类各种脂肪酸之间的比值可能也受地域和品种的影响,同时提示了长期单一进食某品种鱼类可能导致 SFAs、MUFAs、PUFAs 三者的比值偏离膳食中的脂肪酸平衡的推荐范围(1:1:1)。

研究区域海水鱼鱼肉(即可食部, $n = 204$)中 MUFAs 总量的范围是 $102.8\text{—}3720 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ 。n-6 PUFAs 总量的范围是 $16\text{—}708 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$,与前人研究的多个区域的常见海水鱼中 n-6 PUFAs 总量的分布范围相当或低于部分海域,如舟山渔场 $2\text{—}876 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$,黄海海域 $10\text{—}940 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$,渤海海域 $6\text{—}1160 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$,以及南海海域 $14\text{—}507 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ ^[21-22]。n-3 PUFAs 总量的范围是 $94\text{—}1490 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$,与前人研究的多个区域的常见海水鱼中 n-3 PUFAs 总量的分布范围相当,如舟山渔场 $82\text{—}1440 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ (不包含扁舵鲹 $2620 \pm 426 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$),黄海海域 $84\text{—}1450 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$,渤海海域 $43\text{—}1220 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$,但高于南海海域 $68\text{—}593 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ ^[21-22]。TFAs 总量的范围是 $3\text{—}276 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ 可食部,反油酸(C18:1n9t)的平均含量占 TFAs 总量的 59.5%,是海水鱼鱼肉中的优势反式脂肪酸。TFAs 总量均值的范围比舟山渔场 31 种常见海水鱼(含鲱鱼)中 TFAs 的含量分布范围更宽($10\text{—}39 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$),舟山渔场鲱鱼中 TFAs 的构成与本研究的一致,但其反式脂肪酸含量并未出现本研究中的高值^[23],这提示粤沿海地区常见海水鱼品种 TFAs 的含量偏高。虽然鲱鱼鱼肉中 EPA+DHA 的含量(均值为 $370 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$)明显高于一些品种的淡水鱼或海水鱼(在所有海水鱼中位于第 67 百分位点),但是鲱鱼同时含有较高的 TFAs($280 \pm 150 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$),且极大值为 $490 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ 。从我国卫生部规定的标准(TFAs $< 300 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$)、美国 FDA 规定的标准值(每份 500 mg)以及世界卫生组织(WHO)的建议值(每天 2000 mg)等角度来看,长期单一进食鲱鱼可能增加罹患心血管疾病的风

险,但是目前尚无充分的实验证据证明鱼类等天然来源的反式脂肪酸与健康存在负相关关系^[24].

2.2 海水鱼鱼肉中脂肪酸的组成特征评价

统计分析结果显示,海水鱼鱼肉中油酸(C18:1n9c,OA)平均占MUFAs总量的70.2%,亚油酸(C18:2n6c,LA)平均占n-6 PUFAs总量的73.5%,DHA(C22:6n3)平均占n-3 PUFAs总量的78.3%,因此,MUFAs、n-6 PUFAs以及n-3 PUFAs等脂肪酸中的优势脂肪酸分别为OA、LA和DHA.

为了更深入地了解不同品种海水鱼鱼肉中不饱和脂肪酸的组成及其分布特征,本文从品种、空间(地域)以及食性等角度探讨了鱼肉中不饱和脂肪酸在组成上的差异.

2.2.1 鱼类脂肪酸的种属差异评价

K-W 检验结果显示,不同品种海水鱼的MUFAs等6个指标具有显著性差异($df=24, P<0.001$).因此,鱼类的饱和脂肪酸在组成上具有种属差异.而且呈现如下规律:(1)在几种饱和脂肪酸中,MUFAs的含量高于 $1000 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ 的鱼类有4种,包括鲳鱼、黑鲷、鲮鱼和黄花鱼;(2)n-6 PUFAs含量高于 $300 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ 的鱼类有3种,包括鲳鱼、黑鲷和黄花鱼;n-3 PUFAs的含量高于 $300 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ 的鱼类共有10种,鱼肉中n-3 PUFAs含量均值的顺序为黑鲷(1490)>黄花鱼>鲳鱼>石斑鱼>美国红鱼>带鱼>海鳗>鲮鱼>马鲛鱼>鲫鱼>蓝圆鲹>鲢鱼>二长棘鲷>鳗鲡>金线鱼>短尾大眼睛鲷>龙头鱼>褐篮子鱼>多齿蛇鲻>多鳞鳢>黄鳍鲷>白姑鱼>龙舌鱼>鳙鱼>草鱼($63.0 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$);(3)鲮鱼的反式脂肪酸含量远远高于其它品种鱼类,最大值达到 $490 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$,占不饱和脂肪酸总量的9%以上.

2.2.2 鱼类脂肪酸的空间特征与食性特征评价

动物组织中的 $\delta^{13}\text{C}$ 与其食物来源中的 $\delta^{13}\text{C}$ 一一对应,并且不同的动物组织对C同位素的分馏效应并不相同.C稳定同位素在食物与摄食者之间具有对应关系,可以利用C稳定同位素比值的差异判断食物来源差异,也可利用 $\delta^{13}\text{C}$ 值分辨水生生物的底栖食性或浮游食性^[25].当 $\delta^{13}\text{C}$ 值小于 -15‰ 时,鱼类摄入的碳源可能来自浮游生物等上层食物网;当 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 -15‰ — -14‰ 时,鱼类摄入的碳源可能来自中层食物网;当 $\delta^{13}\text{C}$ 值大于 -14‰ 时,鱼类摄入的碳源可能来自底栖的藻类等下层食物网^[26].

表4描述了鱼肉中MUFAs、n-6 PUFAs、n-3 PUFAs和TFAs等不饱和脂肪酸与 $\delta^{13}\text{C}$ 的相关关系.统计结果表明不饱和脂肪酸与鱼肉中 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈中等负相关(MUFAs和n-6 PUFAs, $0.3 < |r_p| < 0.5$)或低度负相关(n-3 PUFAs, $|r_p| < 0.3$)或不相关(TFAs),说明了鱼肉中MUFAs和n-6 PUFAs的含量高低受鱼类食性的影响,然而,鱼肉中TFAs的含量不受鱼类的食性影响.进一步地,从表4中的反相关关系可以了解到浮游食性的鱼类其鱼肉组织中MUFAs、n-6 PUFAs以及n-3 PUFAs的含量高于底栖食性的鱼类.

表4 鱼肉中4类脂肪酸的含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 值的皮尔逊相关系数

Table 4 The Pearson's correlation coefficient between the contents of the 4 types of fatty acids and the values of $\delta^{13}\text{C}$ in fish muscles

类别 Items	MUFAs	n-6 PUFAs	n-3 PUFAs	TFAs
含水率 moisture content/%	-0.669 **	-0.615 **	-0.557 **	-0.450 **
$\delta^{13}\text{C}$	-0.370 **	-0.362 **	-0.232 **	0.144

注: * $P<0.05$; ** $P<0.01$; *** $P<0.001$.

K-W 检验结果显示,不同类别(淡水鱼和海水鱼、杂食性海水鱼和肉食性海水鱼)鱼类的MUFAs、n-6 PUFAs、n-3 PUFAs、EPA+DHA等指标的差异具有统计学意义.肉食性海水鱼中n-3 PUFAs的含量($411 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$,其中EPA+DHA含量为 $339 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$)显著高于杂食性海水鱼($374 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$,其中EPA+DHA含量为 $308 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ ww),见表5;相反地,肉食性海水鱼中MUFAs、n-6 PUFAs以及TFAs的含量显著低于杂食性海水鱼.

各品种鱼类的类别及其肌肉组织中EPA+DHA的含量见表1和图2,华南沿海地区经济鱼类肌肉中EPA+DHA的含量范围(95CI)为低于检出限7.62至 $1760 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$,P50和P97.5分别为 $200 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ 和 $1160 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$.14种肉食性海水鱼鱼肉中EPA+DHA的含量参差不齐,含量大于 $500 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ 的有黑鲷、石斑鱼、黄花鱼和鲳鱼,其中黑鲷肌肉中EPA+DHA的含量是其它6种

杂食性海水鱼的几倍甚至几十倍(黑鲷 $1287 \pm 291.1 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$, 鲳鱼 $523.0 \pm 271.1 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$), 这些鱼种可以作为 EPA 和 DHA 的良好膳食来源, 具有较高的利用和开发价值。而黄鳍鲷、多鳞鲱、白姑鱼和龙舌鱼等品种是低 EPA 和 DHA 的海水鱼, 均低于 $90 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ 。值得一提的是, 鲢鱼是淡水鱼中 EPA+DHA 含量较高的品种 ($154.4 \pm 100.0 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$), 对于海水鱼资源匮乏而淡水鱼丰富的地区, 鲢鱼可作为一种补充 EPA 和 DHA 良好的膳食来源。

表 5 鱼肉中 n-6 和 n-3 系列不饱和脂肪酸的含量(均值 95%CI) / ($\text{mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$)

Table 5 The contents (95%CI of the mean values) of n-6 and n-3 PUFAs in fish muscles / ($\text{mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$)

名称 Name	n	n-6 PUFA	n-3 PUFA	EPA+DHA
淡水鱼 Freshwater fish	30	751.5 (421.7, 1158)	169.1 (120.1, 226.8)	50.80 (29.77, 75.50)
海水鱼 Marine fish	204	125.1 (98.40, 152.9)	401.7 (354.4, 450.9)	332.0 (290.8, 376.5)
杂食性海水鱼	63	164.9 (111.9, 223.8)	373.7 (274.5, 489.6)	308.5 (220.2, 401.8)
肉食性海水鱼	141	107.9 (81.15, 139.3)	410.6 (359.8, 463.4)	339.1 (295.7, 385.3)
合计 Sum	234	203.1 (154.8, 266.0)	372.8 (329.2, 414.8)	297.0 (258.4, 338.5)

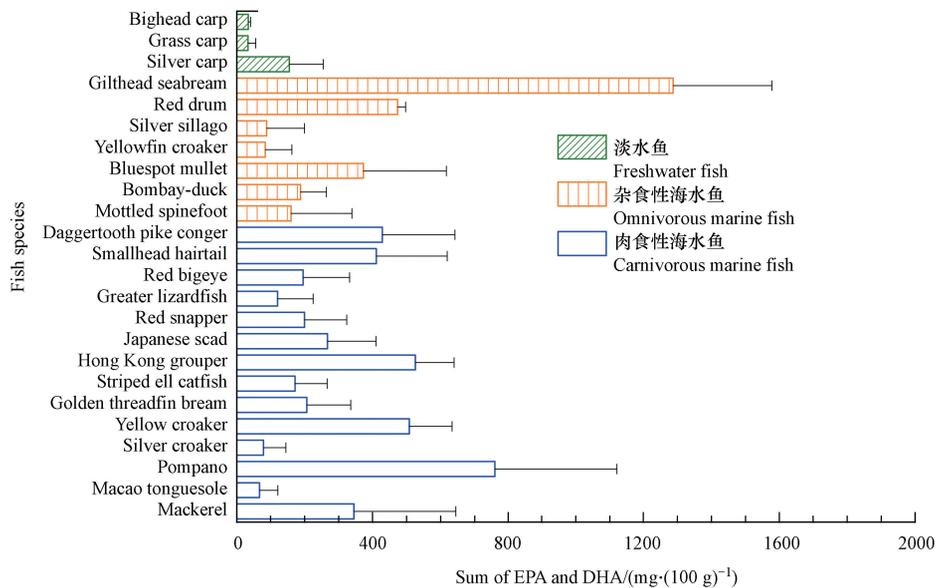


图 3 不同种属鱼类肌肉中 EPA+DHA 的含量

Fig.3 The levels of EPA+DHA concentrations in fish muscles of various fish species

K-W 检验结果显示, SW 和 ZJ 鱼类肌肉中 MUFAs、n-6 PUFAs、n-3 PUFAs、EPA+DHA 等指标的差异无统计学意义 ($P > 0.100$, $df = 1$). 但不同水域(淡水与海水)鱼类肌肉中 MUFAs 等 4 个指标的差异具有统计学意义. 表现为海水鱼肌肉中 EPA+DHA 的含量 ($332 \pm 317 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$) 显著高于淡水鱼 ($51.0 \pm 69.0 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$), $P < 0.001$. 3 种常见淡水鱼肌肉中 EPA+DHA 的含量均较低, 以鲢鱼最高, 为 $154 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$, 但也低于大部分海水鱼肌肉中 EPA+DHA 的含量。

2.2.3 鱼类脂肪酸的平衡膳食

从本研究结果可以了解到天然鱼类肌肉中 MUFAs、n-6 PUFAs 和 n-3 PUFAs 的含量分配几乎都不以 1:1:1 的方式存在(图 3). 显然地, 本研究中, n-6 PUFAs 与 n-3 PUFAs 的比值在 0.5—1.5 之间的鱼类有且仅有 5 种, 它们分别是鲢鱼、多鳞鲱、黄鳍鲷、白姑鱼和龙舌鱼。

由于 n-6 PUFAs 与 n-3 PUFAs 在新陈代谢和功能上有着明显的区别, 而且常常有着重要但相反的生理效应, 值得一提的是, n-6 PUFAs 在生理功能上可能存在一些负面的效应, 因此, 通过膳食摄入来维持 n-6 PUFAs 和 n-3 PUFAs 的平衡是非常重要的. 鱼类膳食讲究平衡损益, 鱼肉中 n-6 PUFAs/n-3 PUFAs 的范围较广, 从 0.082(褐篮子鱼)到 4.648(鲷鱼), 暗示了长期单一进食一种鱼类, 将对控制脂肪酸的平衡膳食不利, 尤其是不利于使 n-6 PUFAs/n-3 PUFAs 的比例控制在 1:1—2:1 范围内. 换言

之,鱼类脂肪酸的膳食平衡需要丰富食鱼的种类和数量,才能使多不饱和脂肪酸的益处恰当地发挥出来。

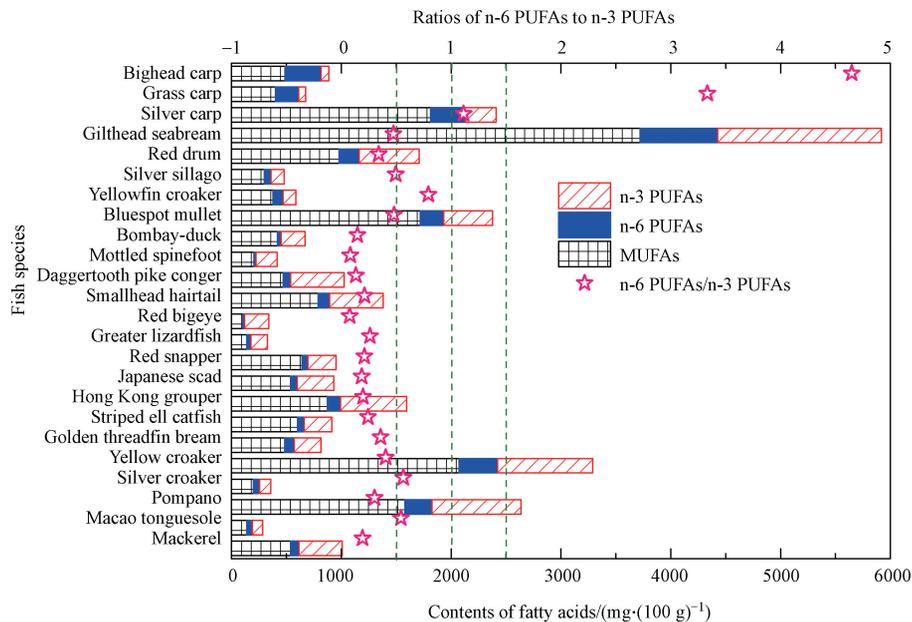


图4 不同种属鱼类肌肉中 MUFAs、n-6 PUFAs 和 n-3 PUFAs 的含量以及 n-6 PUFAs 与 n-3 PUFAs 的比值

Fig.4 The bar graph of levels of MUFAs, n-6 PUFAs, and n-3 PUFAs concentrations in fish muscles of various fish species, and the scatter diagram of the ratios of n-6 PUFAs to n-3 PUFAs in the relative fish species

3 结论 (Conclusion)

本研究首次分析并阐明了我国华南地区 21 种海水鱼和 4 种淡水鱼的不饱和脂肪酸的含量及其组成特征.本研究得出以下结论:(1)总体而言,海水鱼肌肉中 EPA+DHA 的含量高于淡水鱼,淡水鱼中 MUFAs 的含量高于海水鱼,这可能与淡水鱼的规格(体长均值为 476 mm)大于海水鱼(体长均值为 262 mm)有关;(2)淡水鱼鲫鱼是一种富含不饱和脂肪酸的鱼类,其肌肉中 MUFAs 和 PUFAs 的含量均比海水鱼高;(3)高 EPA+DHA 的黑鲷(约 $1287 \text{ mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$)是一种具有较大的养殖价值以及巨大的食品和保健品开发潜力的海水鱼;(4)鲮鱼是高反式脂肪酸的鱼类,需谨防单一大量进食这类鱼。

为确保鱼类脂肪酸的平衡摄入,建议市民在日常膳食中丰富食鱼的种类和数量,以使 MUFAs、n-6 PUFAs 和 n-3 PUFAs 的比值达到推荐值 1:1:1.本研究的开展对华南沿海地区鱼类资源的开发利用具有重要的现实意义,也为鱼类食品的营养价值评价提供了数据基础。

参考文献 (References)

- [1] KRIS-ETHERTON P M, PEARSON T A, WAN Y, et al. High-monounsaturated fatty acid diets lower both plasma cholesterol and triacylglycerol concentrations [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1999, 70(6): 1009-1015.
- [2] SIMOPOULOS A P. An increase in the omega-6/omega-3 fatty acid ratio increases the risk for obesity [J]. Nutrients, 2016, 8(3): 128-144.
- [3] WILLIAMS C, BIRCH E E, EMMETT P M, et al. Stereoacuity at age 3.5 y in children born full-term is associated with prenatal and postnatal dietary factors: A report from a population-based cohort study [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2001, 73(2): 316-322.
- [4] MALCOLM C A, HAMILTON R, MCCULLOCH D L, et al. Scotopic electroretinogram in term infants born of mothers supplemented with docosahexaenoic acid during pregnancy [J]. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 2003, 44(8): 3685-3691.
- [5] LAURITZEN L, JØRGENSEN M H, MIKKELSEN T B, et al. Maternal fish oil supplementation in lactation: Effect on visual acuity and n-3 fatty acid content of infant erythrocytes [J]. Lipids, 2004, 39(3): 195-206.

- [6] HOLUB D J, HOLUB B J. Omega-3 fatty acids from fish oils and cardiovascular disease [J]. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 2004, 263: 217-225.
- [7] VON SCHACHKY C, ANGERER P, KOTHNY W, et al. The effect of dietary omega-3 fatty acids on coronary atherosclerosis a randomized, double-blind, placebo-controlled trial [J]. *Annals of Internal Medicine*, 1999, 130: 554-562.
- [8] DE MELLO V D, ERKKILÄ A T, SCHWAB U S, et al. The effect of fatty or lean fish intake on inflammatory gene expression in peripheral blood mononuclear cells of patients with coronary heart disease [J]. *European Journal of Nutrition*, 2009, 48: 447-455.
- [9] CALDER P C. n-3 polyunsaturated fatty acids, inflammation, and inflammatory diseases [J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2006, 83(suppl): 1505S-1519S.
- [10] SALAM M T, LI Y F, LANGHOLZ B, et al. Maternal fish consumption during pregnancy and risk of early childhood asthma [J]. *Journal of Asthma Research*, 2005, 42(6): 513-518.
- [11] ROMIEU I, TORRENT M, GARCIA-ESTEBAN R, et al. Maternal fish intake during pregnancy and atopy and asthma in infancy [J]. *Clinical & Experimental Allergy*, 2007, 37(4): 518-525.
- [12] TREBBLE T M, WOOTTON S A, MILES E A, et al. Prostaglandin E2 production and T cell function after fish-oil supplementation: response to antioxidant cosupplementation [J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2003, 78(3): 376-382.
- [13] HE K, RIMM E B, MERCHANT A, et al. Fish consumption and risk of stroke in man [J]. *Journal of the American Medical Association*, 2002, 288: 3130-3136.
- [14] DAVIGLUS M L, STAMLER J, ORENCIA A J, et al. Fish consumption and the 30-year risk of fatal myocardial infarction [J]. *The New England Journal of Medicine*, 1997, 336: 1046-1053.
- [15] MOZAFFARIAN D, RIMM E B. Fish intake, contaminants, and human health evaluating the risks and the benefits [J]. *Journal of the American Medical Association*, 2006, 296: 1885-1899.
- [16] SIMOPOULOS A P. The importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acids [J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2002, 56(8): 365-379.
- [17] 梁讯. 脂肪酸失衡导致健康危机, 全球营养专家建议 [J]. *粮食与食品工业*, 2018, 25(4): 62.
LIANG X. Fatty acid imbalance leads to a health crisis, recommendation from the global nutrition experts [J]. *Cereal & Food Industry*, 2018, 25(4): 62 (in Chinese).
- [18] 赵子建. 不饱和脂肪酸失衡与雄性生殖发生障碍 [C]. 中国杭州: 第十二届全国脂质与脂蛋白学术会议, 2014.
ZHAO Z J. The relationship of unsaturated fatty acid imbalance and male reproductive disorders [C]. Hangzhou: The 12th National Academic Conference on Lipids and Lipoproteins, 2014 (in Chinese).
- [19] 张欣, 向荣, 李晓曦, 等. 膳食中高 n-6/n-3 多不饱和脂肪酸比值对小鼠肠道菌群的影响 [J]. *现代生物医学进展*, 2015, 15(25): 4824-4827, 4833.
ZHANG X, XIANG R, LI X X, et al. High ratio of dietary n-6/n-3 polyunsaturated fatty acids affects gut microbiota in mice [J]. *Progress in Modern Biomedicine*, 2015, 15(25): 4824-4827, 4833 (in Chinese).
- [20] 蔡妙颜, 李冰, 袁向华. 膳食中的脂肪酸平衡 [J]. *粮油食品科技*, 2003, 11(2): 37-39.
CAI M Y, LI B, YUAN X H. Fatty acid equilibrium in diet [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2003, 11(2): 37-39 (in Chinese).
- [21] ZHANG W F, HUANG W X, CHEN X, et al. Stable carbon and nitrogen isotope evidence for the low biomagnification of mercury in marine fish from the South China Sea [J]. *Marine and Freshwater Research*, 2020. <https://doi.org/10.1071/MF19069>.
- [22] 张红霞. 我国三个海域常见海鱼消费对健康影响的风险—获益平衡研究 [D]. 太原: 山西医科大学, 2014.
ZHANG H X. Study on the risk-fishing balance of common marine fish consumption in three sea areas of China [D]. Taiyuan: Shanxi Medical University, 2014 (in Chinese).
- [23] 高颀雄. 舟山地区海水鱼类消费对健康影响的风险—获益评估研究 [D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2013.
GAO Y. Risk-benefit assessment of intake of marine fish from Zhoushan [D]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention. 2013 (in Chinese).
- [24] FIELD C J, BLEWETT H H, PROCTOR S, et al. Human health benefits of vaccenic acid [J]. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 2009, 34(5): 979-991.
- [25] WANG S, LI B, ZHANG M, et al. Bioaccumulation and trophic transfer of mercury in a food web from a large, shallow, hypereutrophic lake (Lake Taihu) in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, 19(7): 2820-2831.
- [26] FRANCE R L. Carbon-13 enrichment in benthic compared to planktonic algae: foodweb implications [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1995, 124(1): 307-312.