

# 太湖鱼中多不饱和脂肪酸及其与多氯联苯共摄入 益害分析

张东平<sup>①</sup>, 张少欢<sup>①</sup>, 余应新<sup>①\*</sup>, 吴明红<sup>②</sup>, 傅家谟<sup>①③</sup>

① 上海大学环境与化学工程学院环境污染与健康研究所, 上海 200444;

② 上海大学环境与化学工程学院上海射线应用研究所, 上海 200444;

③ 中国科学院广州地球化学研究所, 有机地球化学国家重点实验室, 广州 510640

\* 联系人, E-mail: yuyingxin@staff.shu.edu.cn

2011-07-13 收稿, 2011-11-17 接受

国家重点基础研究发展计划(2008CB418205)和上海市重点学科项目(S30109)资助

**摘要** 鱼体脂肪中含有丰富的 n-3 系多不饱和脂肪酸, 但同时能富集有毒的持久性有机污染物. 本文测定了太湖 4 种野生食肉性鱼类: 刀鲚(*Coilia ectenes taihuensis*)、红鳍原鲃(*Cultrichthys erythropterus*)、似刺鲃(*Paracanthobrama guichenoti*)和太湖新银鱼(*Neosalanx taihuensis* Chen)中的脂肪酸含量, 分析了其脂肪酸组成, 结果表明, 这 4 种鱼体中脂肪酸以棕榈酸、油酸和 DHA 为主. 通过多不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸的比值(PUFA/SFA)及 n-6/n-3 PUFA 比值分析了这些鱼类的营养价值, 结果表明, 这 4 种鱼类均具有较高的营养价值. 由于环境持久性有机污染物多氯联苯可富积于鱼体脂肪中, 摄入 PUFAs 的同时会摄入这类污染物. 同时, 对 PUFAs 中的有效成分 EPA+DHA 与多氯联苯共摄入时对人的益害风险进行了评估, 发现对于健康成人在达到 EPA+DHA 摄入要求下, 食用这 4 种鱼带来的多不饱和脂肪酸与多氯联苯共摄入不会引起非致癌或致癌的健康风险.

## 关键词

淡水鱼  
脂肪酸  
多氯联苯  
营养价值  
益害分析

脂肪酸中的多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFA)含有 2 个或 2 个以上的双键, 根据距甲基端第一个双键的位置不同, PUFA 主要分为 n-3 和 n-6 PUFA 两大系列. 其中 n-3 PUFA 具有减少冠心病的发病率, 降低血浆中甘油三酯的水平, 促进婴儿的脑和视网膜组织的发育等益处<sup>[1,2]</sup>. 由于人体自身合成这类脂肪酸效率极低, 需从日常膳食中补充, 鱼类由于富含此类物质而受到人们的青睐.

随着工业和经济的发展, 越来越多的污染物被释放到环境并进入水体, 最终可能被鱼体吸收. 持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs)由于其亲脂性高, 容易在鱼体脂肪中富集, 因此, 人们食用鱼类时, 在获得有益的 n-3 PUFA 同时带来这类污染物共摄入的风险. PUFA 和污染物的共摄入对人

体健康风险的研究日渐受到国外学者的重视<sup>[3-6]</sup>, 而我国目前还没有开展这方面的研究. 国内已有的研究只从营养学的角度关注鱼体中 PUFA 的含量与分布<sup>[7,8]</sup>, 从污染物的暴露水平与环境归趋角度来研究其对人体潜在危害<sup>[9]</sup>.

目前国际上对 PUFA 和污染物共摄入的益害研究多集中在海水鱼类<sup>[3,6]</sup>, 对淡水鱼类的相关研究甚少<sup>[5]</sup>. 我国是淡水鱼的生产 and 消费大国, 太湖是我国第二大淡水湖, 也是重要的渔业基地. 近些年随着太湖地区的经济迅速发展, 许多 POPs 类污染物都在太湖水体和鱼体中检出<sup>[10-13]</sup>, 而太湖鱼类中脂肪酸的浓度水平报道十分有限<sup>[14]</sup>.

本研究选取太湖常见的 4 种食肉性鱼类, 测定了脂肪酸的含量与组成, 分析了其营养价值, 并对食用

这些鱼类时, n-3 PUFA 和多氯联苯(polychlorinated biphenyls, PCBs, 一种含氯 POPs)共摄入时的益害风险进行了评估. 研究结果一方面为进一步开发太湖渔业资源提供依据, 另一方面为人们合理食用太湖鱼类提供建议与参考, 为食品营养研究、环境污染与人体健康风险研究提供基础数据.

## 1 实验

(i) 试剂. 分析纯的二氯甲烷、正己烷、氯仿、丙酮、2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚(BHT)和优级纯的浓硫酸均购自上海国药集团化学试剂有限公司. 二氯甲烷、正己烷和丙酮经全玻璃系统重蒸后使用. 甲醇(液相色谱纯)购自 Merck 公司. 纯水由 Millipore 公司 Elix 系统制备. 26 种脂肪酸(GLC-490-ACID), 26 种脂肪酸甲酯(GLC-490), 十九碳酸(N-19-A)及十九碳酸甲酯(N-19-M)均购自 NU-CHECK-PREP 公司. PCBs 混合标准物质(31 种)购自 AccuStandard 公司, PCB209 购自 Supelco 公司, <sup>13</sup>C-PCB208 购自美国剑桥同位素实验室.

(ii) 采样和样品前处理. 2010 年 9 月, 从苏州光福镇渔民刚捕捞的鱼中购得刀鲚(*Coilia ectenes taihuensis*)、红鳍原鲌(*Cultrichthys erythropterus*)、似刺鳊鲌(*Paracanthobrama guichenoti*)和太湖新银鱼(*Neosalanx taihuensis* Chen)等 4 种鱼. 鱼样分类存于冰袋中运回实验室, 水洗净后, 称重, 量体长(见表 1). 刀鲚、红鳍原鲌、似刺鳊鲌去皮后, 取肌肉组织, 用搅拌机搅碎. 太湖新银鱼由于个体小且人们食用时也是整体食用, 将每 10 条混合作为一个样品, 得到 5 个太湖新银鱼样品, 鱼洗净后, 直接放入搅拌机中搅碎. 4 种鱼共计 20 个脂肪酸样品保存于-20℃冰箱中待用. 由于 4 种鱼都属于小型鱼类, 单个样品不足以分析 PCBs 的浓度, 故将每种鱼所有样品混合成 1 个样品, 共 4 个样品用于 PCBs 分析.

(iii) 样品脂肪酸分析. 样品制备<sup>[14]</sup>: 第一步脂肪提取: 准确称取一定量的样品(约 50 mg)于 10 mL 具塞玻璃离心管中, 加内标十九碳酸(C19:0)后加 1.9 mL

内含 0.01% BHT 的氯仿-甲醇混合溶液(1/2, v/v), 涡旋 50 s; 再加入 0.625 mL 氯仿, 涡旋 50 s; 之后再加 0.625 mL 去离子水, 涡旋 50 s. 管内溶液变浑浊后于 3000 r/min 下离心 15 min. 转移有机相用无水硫酸钠除水后置于 8 mL 棕色瓶中, 然后用氮气吹至近干待用. 第二步甲酯化: 向上述棕色瓶内加入 0.5 mL 含 2% 硫酸的甲醇溶液, 密封条件下于 70℃反应 2 h; 反应结束后加入 2 mL 去离子水, 再用正己烷萃取(2 mL × 3), 萃取液浓缩近干后用异辛烷定容 1 mL, 样品保存于 4℃冰箱中待分析.

样品测定在气相色谱-质谱联用仪 (6890N-5975, Agilent)上完成. 色谱柱为 DB-WAXETR (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm, J&W Scientific), 升温程序: 120℃保留 1 min 后以 4℃/min 升至 172℃, 保留 15 min, 再以 1.5℃/min 升至 202℃, 保留 15 min, 最后以 20℃/min 升至 242℃, 保留 2 min. 载气为氦气, 流速为 1.0 mL/min. 进样口温度为 230℃. 进样模式为 1 μL 无分流进样. 化合物检测采用选择离子模式, 选择离子质荷(m/z)比如下: 饱和脂肪酸甲酯为 74, 单不饱和脂肪酸甲酯为 55, 多不饱和脂肪酸甲酯为 67 或 79.

(iv) PCBs 样品分析. 将已称重的样品与足量无水硫酸钠经充分碾磨成细粉后, 按文献[14]的方法进行分析. 加入回收率指示物 PCB209, 用 200 mL 正己烷/丙酮(体积比为 1:1)混合溶剂索氏抽提 72 h. 将抽提液浓缩至 1 mL, 用凝胶渗透色谱(GPC, 填料为 200~400 目的 S-X3 生物珠)净化, 即用 115 mL 正己烷/二氯甲烷(体积比为 1:1)淋洗去除脂肪后, 收集 115~280 mL 组分, 浓缩至 0.5 mL; 再用酸/碱性硅胶-氧化铝复合层析柱净化, 即用 70 mL 的正己烷/二氯甲烷(体积比为 1:1)混合溶剂淋洗并收集, 旋蒸浓缩后, 加内标 <sup>13</sup>C-PCB208, 氮吹后定容至 50 μL, 样品保存于 4℃冰箱中待分析. PCBs 样品的测定在气相色谱-质谱联用仪 (6890N-5975, Agilent)上完成. 仪器测定方法同文献[14].

(v) 质量控制和质量保证. 脂肪酸分析: 在进行样品分析的同时进行方法空白(2 个), 基质加标(2 个)及样品平行样(2 个)分析. 样品定量分析采用 2 条 5 种质量浓度的混合标样(0.25~5 或 5~100 μg/mL), 用内标法绘制工作曲线( $R^2 > 0.99$ ). 26 种脂肪酸的平均回收率为 74.5% (56.0%~91.8%), 平行样品分析相对标准偏差 < 20.0% (0.04%~20.07%), 均符合样品分析要求. 本文采用 4~13 倍信噪比浓度的标样, 平行

表 1 样品信息

鱼类名称	样品数(尾)	体长(cm)	体重(g)
刀鲚	4 (4)	17.3 ± 1.6	14.3 ± 7.2
红鳍原鲌	6 (6)	18.5 ± 1.0	44.6 ± 7.8
似刺鳊鲌	5 (5)	20.1 ± 3.5	79.0 ± 40.7
太湖新银鱼	5 (50)	5.6 ± 0.5	0.6 ± 0.1

分析6次,取其标准偏差 $S$ ,以3.36倍 $S$ 为仪器检出限.采用该方法,26种脂肪酸甲酯的仪器检出限为0.08~19.9 pg.根据仪器检出限,以50 mg样品为试样,样品处理后定容体积为1 mL为基准,对应26种脂肪酸的方法检出限为1.5~382.0 pg/g. PCBs分析质量控制同我们的前期研究<sup>[14]</sup>.样品采用内标法定量,校准曲线的建立、仪器检出限、方法检出限的计算按文献[14]进行,校准曲线的相关系数均大于0.99,PCB209的回收率在73.6%~119.0%之间.

## 2 结果与讨论

### 2.1 脂肪酸浓度水平

为方便与文献数据比较,脂肪酸浓度以“mg/100 g”为单位,结果如表2所示.在这4种鱼中,脂肪酸总浓度从高到低分别为太湖新银鱼(789.2 mg/100 g)、似刺鳊鮰(713.9 mg/100 g)、刀鲚(588.6 mg/100 g)、红鳍原鲈(492.8 mg/100 g).单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acids, MUFA)以似刺鳊鮰最高(252.3 mg/100 g).饱和脂肪酸(saturated fatty acids, SFA), n-3 PUFA 及总 PUFA 以太湖新银鱼最高,其浓度分别为315.0, 222.8和303.9 mg/100 g.

二十碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, EPA)和二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)属于 n-3 PUFA,具有很高的生理保健功效.以海产品为主要食物的爱斯基摩人其心血管疾病发病率极低,动物实验和临床研究都表明海产品中丰富的EPA和DHA是其发病率低的主要原因<sup>[15]</sup>.本研究中太湖新银鱼、似刺鳊鮰、刀鲚和红鳍原鲈中EPA+DHA的平均浓度分别为188.6, 91.9, 97.7和100.0 mg/100 g,其中太湖新银鱼的EPA+DHA浓度远高于其他3种鱼类.据报道,野生鲫鱼、黑鱼、包头鱼和桂鱼中EPA+DHA浓度在56.8~465.9 mg/100 g之间<sup>[16]</sup>;白鲢、花鲢、鳊鱼、团头鲂、鲫鱼、乌鱼和黄颡鱼等7种鱼的浓度在40~3380 mg/100 g之间<sup>[17]</sup>;北美太阳鱼的浓度为142.9 mg/100 g<sup>[18]</sup>;西伯利亚河鲈的浓度为262 mg/100 g<sup>[19]</sup>;欧洲河鲈的浓度为290 mg/100 g<sup>[20]</sup>.与文献相比,本研究中4种淡水鱼的EPA+DHA浓度均在这些淡水鱼范围内.与海水鱼相比,这4种淡水鱼的EPA+DHA浓度远低于三文鱼、大比目鱼、沙丁鱼和剑鱼,这些鱼中EPA+DHA浓度在1907~3276 mg/100 g之间<sup>[21]</sup>;但是与琵琶鱼、黑线鲟、大头鱼、

表2 鱼体中脂肪酸浓度(mg/100 g)

脂肪酸	刀鲚	红鳍原鲈	似刺鳊鮰	太湖新银鱼
C14:0	14.3 ± 12.8	8.6 ± 4.7	16.5 ± 17.5	23.5 ± 4.5
C16:0	156.9 ± 89.7	106.7 ± 36.4	173.2 ± 111.8	197.5 ± 25.6
C16:1	30.9 ± 30.2	27.9 ± 14.4	59.5 ± 59.0	52.2 ± 10.1
C17:0	7.8 ± 3.3	5.1 ± 3.0	8.6 ± 4.6	14.4 ± 1.9
C18:0	36.0 ± 14.1	35.0 ± 9.8	49.2 ± 27.7	63.8 ± 9.2
C18:1n11	108.8 ± 101.2	90.7 ± 40.4	168.9 ± 160.0	87.5 ± 13.7
C18:1n9	21.5 ± 17.4	15.4 ± 8.1	18.8 ± 17.4	19.2 ± 3.4
C18:2n6	14.3 ± 10.0	13.6 ± 8.9	15.2 ± 10.2	20.9 ± 3.8
C18:3n6-γ	1.4 ± 1.2	1.3 ± 2.3	0.6 ± 0.3	2.6 ± 0.5
C18:3n3-α	11.2 ± 9.6	13.8 ± 6.4	8.4 ± 7.5	23.5 ± 3.9
C20:0	1.5 ± 0.9	1.1 ± 0.6	1.4 ± 1.1	3.7 ± 0.7
C20:1	0.9 ± 0.8	2.0 ± 1.0	5.1 ± 5.1	1.4 ± 0.3
C20:2n6	2.1 ± 1.2	2.0 ± 1.0	7.1 ± 4.7	1.5 ± 0.1
C20:3n6	1.3 ± 1.7	5.3 ± 7.7	1.5 ± 1.0	3.1 ± 0.6
C20:3n3	1.3 ± 1.0	1.6 ± 0.8	1.4 ± 0.9	1.2 ± 0.2
C20:4n6	50.8 ± 14.8	41.0 ± 13.1	64.0 ± 24.0	50.4 ± 7.9
C20:5n3 (EPA)	34.5 ± 9.4	27.9 ± 7.5	27.3 ± 20.7	62.5 ± 9.5
C22:0	1.8 ± 0.5	0.6 ± 0.4	1.4 ± 1.1	5.2 ± 0.8
C22:1	N.D. <sup>a)</sup>	N.D. <sup>a)</sup>	N.D. <sup>a)</sup>	1.4 ± 0.5
C22:2n6	N.D. <sup>a)</sup>	N.D. <sup>a)</sup>	N.D. <sup>a)</sup>	0.1 ± 0.1
C22:3n3	5.7 ± 4.0	3.8 ± 2.2	7.5 ± 4.3	2.5 ± 0.4
C22:4n6	0.7 ± 0.9	N.D. <sup>a)</sup>	N.D. <sup>a)</sup>	N.D. <sup>a)</sup>
C22:5n3	19.3 ± 8.5	15.9 ± 4.7	13.4 ± 8.4	9.6 ± 0.9
C22:6n3 (DHA)	63.2 ± 11.3	72.1 ± 19.0	64.6 ± 33.0	126.1 ± 3.5
C24:0	1.4 ± 0.3	0.3 ± 0.2	0.4 ± 0.4	6.8 ± 1.1
C24:1	1.2 ± 0.8	1.1 ± 0.4	N.D. <sup>a)</sup>	8.6 ± 0.3
Σ SFA	219.7 ± 121.6	157.4 ± 54.3	250.7 ± 163.4	315.0 ± 43.6
Σ MUFA	163.2 ± 150.0	137.1 ± 62.6	252.3 ± 241.2	170.3 ± 27.5
Σ PUFA	205.7 ± 70.6	198.3 ± 66.7	210.8 ± 110.3	303.9 ± 29.7
Σ n-6	75.6 ± 32.8	67.0 ± 34.5	95.8 ± 42.9	81.1 ± 13.1
Σ n-3	130.1 ± 38.3	131.3 ± 37.0	115.1 ± 69.6	222.8 ± 16.7
EPA+DHA	97.7 ± 20.1	100.0 ± 26.0	91.9 ± 53.2	188.6 ± 11.9
总浓度	588.6 ± 340.6	492.8 ± 181.0	713.9 ± 511.4	789.2 ± 100.6

a) N.D. 表示未检出

鳊鱼、鳙鱼<sup>[21]</sup>、金头鲷和白鲷<sup>[22]</sup>等海水鱼类处于同一数量级,这些鱼类中EPA+DHA浓度在63~330 mg/100 g之间.

### 2.2 脂肪酸组成特征

刀鲚、红鳍原鲈、似刺鳊鮰和太湖新银鱼4种鱼肉组织中分别检测到24, 23, 22和25种脂肪酸,主要成分为棕榈酸(C16:0),油酸(C18:1n11)和DHA(表3),它们同时也分别是SFA, MUFA和PUFA中最主要的成分. SFA含量最高的为太湖新银鱼,占总脂肪酸含量的39.9%, MUFA和PUFA含量最高的分别为似刺鳊鮰(30.9%)和红鳍原鲈(40.8%). EPA+DHA

表 3 鱼体中脂肪酸组成(%)

脂肪酸	刀鲚	红鳍原鲈	似刺鲃	太湖新银鱼
C14:0	2.1 ± 0.8	1.7 ± 0.3	1.9 ± 0.8	3.0 ± 0.2
C16:0	26.7 ± 0.4	21.8 ± 1.1	25.1 ± 2.5	25.0 ± 0.3
C16:1	4.4 ± 2.0	5.4 ± 0.9	7.1 ± 2.6	6.6 ± 0.4
C17:0	1.4 ± 0.2	1.0 ± 0.3	1.3 ± 0.3	1.8 ± 0.1
C18:0	6.6 ± 1.1	7.3 ± 0.9	7.5 ± 1.3	8.1 ± 0.1
C18:1n11	15.9 ± 5.9	18.0 ± 3.3	20.7 ± 6.2	11.1 ± 0.3
C18:1n9	3.3 ± 0.9	3.0 ± 0.5	2.4 ± 0.5	2.4 ± 0.1
C18:2n6	2.3 ± 0.3	2.6 ± 0.8	2.2 ± 0.3	2.6 ± 0.1
C18:3n6-γ	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.3	0.1 ± 0.1	0.3 <sup>a)</sup>
C18:3n3-α	1.6 ± 0.7	2.7 ± 0.7	1.1 ± 0.3	3.0 ± 0.1
C20:0	0.3 <sup>a)</sup>	0.2 ± 0.1	0.2 <sup>a)</sup>	0.5 <sup>a)</sup>
C20:1	0.1 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.6 ± 0.2	0.2 <sup>a)</sup>
C20:2n6	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.1	1.0 ± 0.2	0.2 <sup>a)</sup>
C20:3n6	0.2 ± 0.2	0.9 ± 0.9	0.3 ± 0.2	0.4 <sup>a)</sup>
C20:3n3	0.2 <sup>a)</sup>	0.3 <sup>a)</sup>	0.2 ± 0.1	0.1 <sup>a)</sup>
C20:4n6	9.7 ± 2.6	8.6 ± 1.4	10.4 ± 2.9	6.4 ± 0.2
C20:5n3 (EPA)	6.6 ± 1.8	5.9 ± 0.8	4.1 ± 1.7	7.9 ± 0.2
C22:0	0.3 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.2 ± 0.2	0.7 ± 0.1
C22:1	N.D. <sup>b)</sup>	N.D. <sup>b)</sup>	N.D. <sup>b)</sup>	0.2 ± 0.1
C22:2n6	N.D. <sup>b)</sup>	N.D. <sup>b)</sup>	N.D. <sup>b)</sup>	N.D. <sup>b)</sup>
C22:3n3	0.1 ± 0.2	N.D. <sup>b)</sup>	N.D. <sup>b)</sup>	<0.1
C22:4n6	0.9 ± 0.1	0.7 ± 0.2	1.1 ± 0.4	0.3 <sup>a)</sup>
C22:5n3	3.5 ± 0.5	3.3 ± 0.5	2.0 ± 0.4	1.2 <sup>a)</sup>
C22:6n3 (DHA)	12.6 ± 4.4	15.2 ± 2.3	10.3 ± 3.2	16.1 ± 1.6
C24:0	0.3 ± 0.1	0.1 <sup>a)</sup>	0.1 <sup>a)</sup>	0.9 <sup>a)</sup>
C24:1	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.1	N.D. <sup>b)</sup>	1.1 ± 0.1
ΣSFA	37.6 ± 0.9	32.2 ± 1.4	36.3 ± 3.3	39.9 ± 0.6
ΣMUFA	24.0 ± 8.7	27.0 ± 4.1	30.9 ± 9.1	21.5 ± 0.7
ΣPUFA	38.4 ± 8.0	40.8 ± 3.0	32.8 ± 7.5	38.6 ± 1.1
Σn-6	13.7 ± 2.1	13.4 ± 2.5	15.1 ± 3.5	10.2 ± 0.4
Σn-3	24.7 ± 6.1	27.4 ± 3.2	17.7 ± 5.1	28.4 ± 1.4
EPA+DHA	19.3 ± 6.2	21.1 ± 2.9	14.4 ± 4.6	24.0 ± 1.4
PUFA/SFA	1.0 ± 0.2	1.3 ± 0.1	0.9 ± 0.2	1.0 <sup>a)</sup>
n-6/n-3	0.6 ± 0.1	0.5 ± 0.1	0.9 ± 0.2	0.4 <sup>a)</sup>

a) 标准偏差小于 0.05; b) N.D.表示未检出

占总脂肪酸含量从高到低分别为太湖新银鱼(24.0%)、红鳍原鲈(21.1%)、刀鲚(19.3%)和似刺鲃(14.4%)。

文献中相同鱼类脂肪酸组成比如表 4 所示, 刀鲚中 SFA 含量与刘凯等人<sup>[23]</sup>的报道接近, MUFA 则远低于该报道, 而 PUFA 和 EPA+DHA 的含量远高于该报道。似刺鲃的 SFA 含量稍高于顾若波等人<sup>[7]</sup>和李广焱等人<sup>[8]</sup>的报道, MUFA 则远低于该报道, 与刀鲚相同, PUFA 和 EPA+DHA 含量则远高于该报道。太湖新银鱼的脂肪酸含量与刘红等人<sup>[24]</sup>的报道相比, SFA, MUFA 和 PUFA 与之接近, 但 EPA+DHA 含量高于该报道。对于红鳍原鲈来说, PUFA 含量在这 4 种鱼

中最高, 据了解, 目前还未见对其脂肪酸组分的报道。

鱼体中脂肪酸浓度和组成与样品的采样季节、采样点和样品所取部位有关。据报道, 鱼体内的脂肪酸浓度存在明显的季节变化, 这主要与鱼的产卵期和不同季节的食料有关。在产卵准备期, 鱼体内的脂肪会向生殖器官转移, 因而在产卵期及产卵之后, 鱼体肌肉组织内脂肪酸浓度下降, 脂肪酸组成也会发生变化<sup>[25]</sup>。不同产地的鱼所食用的食料存在差异, 食肉性鱼类主要以浮游生物、鱼、虾为主要食料, 研究表明, 浮游生物中含有较多的 PUFA, 浮游生物体内的脂肪酸浓度与组成对鱼体内的脂肪酸也有很大影响<sup>[26]</sup>。此次研究的是鱼体可食用部分, 选择了鱼体整个可食用部位的肌肉(包括背部、腹部以及尾部), 而鱼体不同部位的脂肪酸浓度与组成会由于脂肪含量的不同而存在差异<sup>[25]</sup>, 这可能也是造成本研究与其他研究结果有别的原因之一。另外, 本研究在定量脂肪酸组成所用标样为 26 种, 与其他研究不同, 因而在计算统计脂肪酸组分的百分含量时, 也会造成一定的差异。

### 2.3 营养价值分析

SFA 是一类不含碳碳双键的直链羧酸, 过量摄入会导致血液中低密度脂蛋白胆固醇浓度升高, 使得胆固醇在动脉管壁沉积堵塞血管, 从而引起严重的心脑血管疾病<sup>[27]</sup>。PUFA/SFA 比值是衡量鱼肉营养价值的一个重要指标, 世界卫生组织建议最低值为 0.4~0.5<sup>[28]</sup>。本研究中, 刀鲚、红鳍原鲈、似刺鲃和太湖新银鱼的 PUFA/SFA 比值分别为 1.0, 1.3, 0.9 和 1.0(图 1), 均高于建议值。与文献中同类鱼相比, 刀鲚和似刺鲃的 PUFA/SFA 比值均高于文献报道<sup>[7,8,24]</sup>, 而太湖新银鱼则略低于文献值<sup>[24]</sup>(表 4)。与其他种类淡水鱼对比, 这 4 种鱼的 PUFA/SFA 比值均在文献报道范围 0.2~3.1 之内<sup>[8,16,29~31]</sup>。

如前所述, PUFA 可以分为 n-3 和 n-6 PUFA 两大类。n-6 PUFA 具有调节细胞生长, 增强免疫力的功效, 但过多摄入 n-6 PUFA 可对人体健康产生危害, 如可能会引起癌症、冠心病和脑血管疾病等<sup>[32,33]</sup>。早期世界卫生组织建议日常饮食中 n-6 和 n-3 PUFA 比值(n-6/n-3 PUFA)应小于 4<sup>[28]</sup>。本研究中, 4 种鱼类的 n-6/n-3 PUFA 比值在 0.4~0.9 之间(图 1), 远远小于该建议值。据报道, 目前我国居民日常膳食中的 n-6/n-3 PUFA 比值在 10 左右<sup>[34]</sup>, 远高于该建议值,

表4 不同研究中这些鱼类的脂肪酸组成(%)

	刀鲚		似刺鳊鮰			太湖新银鱼	
	本研究	文献[23]	本研究	文献[7]	文献[8]	本研究	文献[24]
采样时间	2010-09	2008-05-07	2010-09	-	2006-05	2010-09	1996年冬
产地	太湖	太湖	太湖	鄱阳湖	太湖	太湖	湖北
取样部位	混合	背	混合	-	背	混合	混合
标样数量	26	21	26	39	18	26	12
ΣSFA	37.6 ± 0.9	37.5	36.3 ± 3.3	25.0	30.1	39.9 ± 0.6	27.4
ΣMUFA	24.0 ± 8.7	46.3	30.9 ± 9.1	51.2	56.9	21.5 ± 0.7	14.6
ΣPUFA	38.4 ± 8.0	16.1	32.8 ± 7.5	12.4	13.0	38.6 ± 1.1	32.1
EPA+DHA	19.3 ± 6.2	6.6	14.4 ± 4.6	3.2	4.2	24.0 ± 1.4	13.5
PUFA/SFA	1.0 ± 0.2	0.4	1.3 ± 0.1	0.5	0.4	0.9 ± 0.2	1.0
n-6/n-3	0.6 ± 0.1	-	0.5 ± 0.1	1.2	-	0.9 ± 0.2	1.0

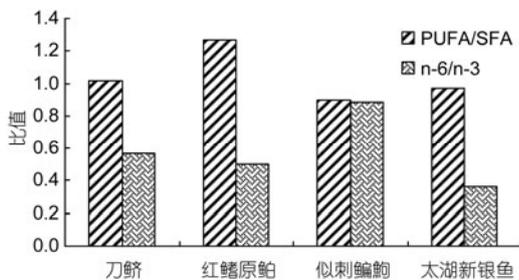


图1 4种鱼体中 PUFA/SFA 和 n-6/n-3 的对比

因此,日常饮食中增加这4种鱼的食用可以降低居民日常膳食中 n-6 和 n-3 PUFA 的摄入比例,提高居民膳食营养.但是,我们必须指出,由于相关证据的缺乏以及观念的局限性,最新出版的《脂肪与脂肪酸膳食推荐摄入量报告》中删去了该建议值<sup>[35]</sup>.

#### 2.4 PUFA 与 PCBs 共摄入损害分析

PCBs 曾被广泛用于电力、机械等行业,具有致癌性、致突变性等毒性.由于这类污染物易在鱼体内富积,并通过食物链放大.人们食用受到此类污染物污染的鱼时,不仅摄入了 PUFA 等营养物质,同时也摄入了 PCBs.因此,在评估食用鱼对人体健康的影响时,不能单一地从营养价值或污染物带来的健康危害评估食用鱼类对人体健康的影响,而应该同时考虑鱼体中的营养物与有害物对人体健康的影响.

目前对于 n-3 PUFA 特别是 EPA 和 DHA 对人体健康的影响研究最为深入. EPA 和 DHA 对预防心血管疾病致猝死有显著的作用,这在流行病学以及临床医学上已得到验证<sup>[36-38]</sup>,并取得了每日最低建议摄入量数据.此外 n-3 PUFA 对于老年痴呆、风湿性关节炎、哮喘、自身免疫性疾病以及糖尿病等的发病都有一定程度的延缓作用<sup>[39-42]</sup>,但相对于预防心血

管疾病致猝死而言, n-3 PUFA 对此类疾病的影响研究都为医学上的观察结论,并没有相关的每日最低建议摄入量数据.因此本文中对于食用鱼带来的人体健康受益是针对摄入鱼体中的 PUFA,即 EPA+DHA,可以降低心血管疾病致猝死的健康益处而言.达到 EPA+DHA 的最低建议摄入量的鱼肉食用量  $Q_{FA}$  (g/d),可用公式(1)表示:

$$Q_{FA} = \frac{R_{FA}}{C_{FA}}, \quad (1)$$

其中  $R_{FA}$  为 DHA+EPA 的最低建议摄入量(mg/d),由于不同国际组织对 EPA+DHA 的最低建议摄入量有不同的标准,本文采用健康成人每天需摄入的 EPA+DHA 最低量为 250 mg 来计算<sup>[15,43]</sup>;  $C_{FA}$  为鱼肉组织中 DHA+EPA 的含量(mg/g).对于长期食用鱼所带来的健康风险的定量分析评估,美国环境保护局(U.S. EPA)将其分为两种情况:慢性非致癌的健康风险和潜在的致癌健康风险,两者的每日最大食用量可分别用公式(2)和(3)计算:

$$Q_{NC} = \frac{RfD \cdot BW}{c}, \quad (2)$$

$$Q_C = \frac{ARL \cdot BW}{CSF \cdot c}, \quad (3)$$

其中  $Q_{NC}$  为非致癌健康风险下污染物最大允许摄入的鱼肉量(g/d); RfD 为污染物的参考剂量,对于 PCBs, RfD 为  $2.0 \times 10^{-5}$  (mg kg<sup>-1</sup>) d<sup>-1</sup><sup>[44]</sup>; BW 为体重(kg),本文采用 59.6 kg<sup>[9]</sup>; c 为鱼肉中污染物的浓度(mg/g),本研究中刀鲚、红鳍原鲈、似刺鳊鮰和太湖新银鱼中 31 种 3-9 氯代 PCBs 总浓度分别为 439.6, 565.6, 462.8 和 451.2 pg/g 湿重.  $Q_C$  为产生致癌健康风险的污染物最大允许摄入的鱼肉量(g/d); ARL 为最高可接受的致癌风险水平,本文采用  $10^{-5}$  (即有十万分之一的致癌

可能). CSF 为致癌斜率因子, 对于 PCBs, CSF 为  $2.0 [(mg\ kg^{-1})\ d^{-1}]^{-1}$  [44].

鱼体中的 PUFA 与 PCBs 共摄入时, 其损害关系可用达到 EPA+DHA 最低建议摄入量时的鱼食用量与产生致癌或非致癌健康风险的最大食用鱼量的比值来表示, 如公式(4)和(5):

$$R_{NC} = \frac{Q_{FA}}{Q_{NC}} = \frac{R_{FA} \cdot c}{C_{FA} \cdot RfD \cdot BW}, \quad (4)$$

$$R_C = \frac{Q_{FA}}{Q_C} = \frac{R_{FA} \cdot CSF \cdot c}{C_{FA} \cdot ARL \cdot BW}, \quad (5)$$

其中  $R_{NC}$  为产生非致癌健康风险的损害比,  $R_C$  为产生致癌健康风险的损害比. 若  $R_{NC}$  或  $R_C > 1$  表示食用该鱼可能会给人体健康带来风险, 反之则给人体带来危害较低.

食用这 4 种鱼引起致癌和非致癌风险的损害结果如图 2 所示, 引起非致癌风险的损害比  $R_{NC}$  在 0.05~0.13 之间, 引起致癌风险的损害比  $R_C$  在 0.21~0.52 之间, 均小于 1, 表明在保证 EPA+DHA 的摄入要求下, 食用这 4 种鱼都基本不会带来非致癌与致癌的健康风险. 在这 4 种鱼中, 太湖新银鱼引起非致癌与致癌健康风险的损害比值均最小, 表明太湖新银鱼在这 4 种鱼中由 PCBs 引起的健康风险最低.

然而需要指出的是, PCBs 目前已被国际癌症机构确定为致癌物质, 任何量的 PCBs 摄入都可能引起致癌风险, 因此从理论上说, 食用这些含有 PCBs 的

鱼类都存在致癌风险. 此外, 本文在损害比值的计算过程中, 所采用的 RfD 与 CSF 值, 均有一定的不确定性, 其数值是在一系列的假设条件下确定的 [44], 因此所计算的损害比值也存在一定的不确定性. 另外, 本研究中, 由于数据资料所限, 只考虑了 PCBs 这一类污染物, 其他的污染物如有机氯农药、多溴联苯醚、多环芳烃以及重金属等由于缺乏相关的浓度数据或毒理数据而没有计算在内. 如考虑所有污染物的情况, 食用这些鱼类对人体健康的风险还会增大. 对于孕妇、婴儿和心血管病人等特殊人群来说, 各国和国际组织建议的 EPA+DHA 每日摄入量都大于本次计算所用的 250 mg/d 标准 [1,45,46], 如美国心脏学会(AHA)建议心血管疾病患者 DHA+EPA 的每天最低摄入量为 1 g. 显然, 对于这些特殊人群来说, 要达到 EPA+DHA 摄入要求, 需增加鱼肉的摄入量, 但也会导致污染物的摄入量增加, 增加健康风险, 因此这些人群在食用鱼肉时, 鱼类的选择应更为谨慎, 须选择污染较轻而 PUFA 含量高的鱼类, 或者选用鱼油胶囊等产品. 这就需要开展更为广泛的调查筛选工作来全面掌握我国市场上鱼产品的营养成分和污染物含量, 进而建立鱼类的营养成分和受污状况的数据库, 为人们科学合理食用鱼产品提供建议与参考.

### 3 结论

太湖 4 种食肉性鱼类鱼肉中脂肪酸以棕榈酸、油酸和 DHA 为主. 这些鱼均具有较高的 PUFA/SFA 比值和较低的 n-6/n-3PUFA 比值, 说明它们均具有较高的营养价值. 在考虑鱼体内 EPA+DHA 对人体的益处和 PCBs 对人体健康危害时, 发现在保证 EPA+DHA 摄入要求下, 食用这 4 种鱼基本不会引起非致癌或致癌的危害, 健康风险较低. 太湖新银鱼在两种健康风险的损害比值计算中, 比值最低, 表明食用太湖新银鱼具有较高的营养价值和较低的健康危害.

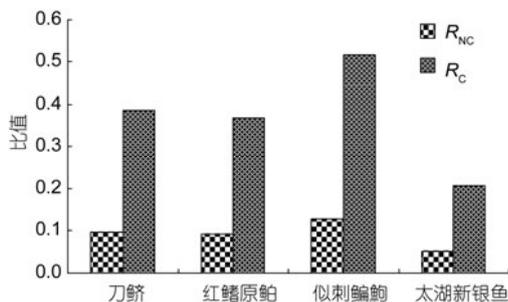


图 2 4 种鱼体内的  $R_{NC}$  和  $R_C$  的对比

### 参考文献

- 1 World Health Organization (WHO). Diet, nutrition, and the prevention of chronic diseases. Report of a joint WHO/FAO expert consultation. Rome: World Health Organization, 2003. 71-91
- 2 National Academy of Sciences-Institute of Medicine (NAS-IOM). Seafood Choices: Balancing Benefits and Risks. Washington, DC: National Academies Press, 2006. 69-84
- 3 Foran J A, Good D H, Carpenter D O, et al. Quantitative analysis of the benefits and risks of consuming farmed and wild salmon. J Nutr, 2005, 135: 2639-2643

- 4 Gladyshev M I, Sushchik N N, Anishchenko O V, et al. Benefit-risk ratio of food fish intake as the source of essential fatty acids vs. heavy metals: A case study of Siberian grayling from the Yenisei River. *Food Chem*, 2009, 115: 545–550
- 5 Loring P A, Duffy L K, Murray M S. A risk-benefit analysis of wild fish consumption for various species in Alaska reveals shortcomings in data and monitoring needs. *Sci Total Environ*, 2010, 408: 4532–4541
- 6 Miklavcic A, Stibilj V, Heath E, et al. Mercury, selenium, PCBs and fatty acids in fresh and canned fish available on the Slovenian market. *Food Chem*, 2011, 124: 711–720
- 7 顾若波, 徐钢春, 华丹, 等. 似刺鲃肌肉营养成分与品质的评价. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2008, 38: 263–268
- 8 李广焱, 邓泽元, 范亚苇, 等. 鄱阳湖 10 种淡水鱼脂肪酸的特性研究. *食品工业科技*, 2010, 31: 324–328
- 9 Meng X Z, Zeng E Y, Yu L P, et al. Persistent halogenated hydrocarbons in consumer fish of China: Regional and global implications for human exposure. *Environ Sci Technol*, 2007, 41: 1821–1827
- 10 Feng K, Yu B Y, Ge D M, et al. Organo-chlorine pesticide (DDT and HCH) residues in the Taihu Lake Region and its movement in soil-water system I. Field survey of DDT and HCH residues in ecosystem of the region. *Chemosphere*, 2003, 50: 683–687
- 11 Nakata H, Hirakawa Y, Kawazoe M, et al. Concentrations and compositions of organochlorine contaminants in sediments, soils, crustaceans, fishes and birds collected from Lake Tai, Hangzhou Bay and Shanghai city region, China. *Environ Pollut*, 2005, 133: 415–429
- 12 Zhang Y, Lu Y, Xu J, et al. Spatial distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons from lake Taihu, china. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2011, 87: 80–85
- 13 Yu Y X, Zhang S H, Li J L, et al. Levels of polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated biphenyls in fish and influences of fish length and physicochemical properties of chemicals on biomagnifications of the pollutants in a food web in Taihu Lake, China. *Environ Toxicol Chem*, 2011, doi: 10.1002/etc.1722
- 14 Zhang D P, Zhang X Y, Yu Y X, et al. Intake of omega-3 polyunsaturated fatty acids, polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated biphenyls via consumption of fish from Taihu Lake, China: A risk-benefit assessment. *Food Chem*, 2012, 132: 975–981
- 15 Mozaffarian D, Rimm E B. Fish intake, contaminants, and human health: Evaluating the risks and the benefits. *J Am Med Assoc*, 2006, 296: 1885–1899
- 16 姚婷. 海水鱼与淡水鱼 omega-3 多不饱和脂肪酸含量的比较研究. *现代食品科技*, 2005, 21: 26–29
- 17 金庆华, 李桂玲, 何世文. 中国淡水鱼油的研究-I. 淡水生物中 n-3 不饱和脂肪酸含量的研究. *中国海洋药物*, 1997, 16: 36–39
- 18 Grun I U, Shi H, Fernando L N, et al. Differentiation and identification of cultured and wild crappie (*Pomoxis* spp.) based on fatty acid composition. *Lebensm-Wiss Technol*, 1999, 32: 305–311
- 19 Sushchik N N, Gladyshev M I, Kalachova G S, et al. Comparison of seasonal dynamics of the essential PUFA contents in benthic invertebrates and grayling *Thymallus arcticus* in the Yenisei River. *Comp Biochem Phys B*, 2006, 145: 278–287
- 20 Ahlgren G, Blomqvist P, Boberg M, et al. Fatty acid content of the dorsal muscle, an indicator of fat quality in freshwater fish. *J Fish Biol*, 1994, 45: 131–157
- 21 Sirot V, Oseredczuk M, Bemrah-Aouachria N, et al. Lipid and fatty acid composition of fish and seafood consumed in France: CALIPSO study. *J Food Compos Anal*, 2008, 21: 8–16
- 22 Ozyurt G, Polat A, Ozkutuk S. Seasonal changes in the fatty acids of gilthead sea bream (*Sparus aurata*) and white sea bream (*Diplodus sargus*) captured in Iskenderun Bay, eastern Mediterranean coast of Turkey. *Eur Food Res Technol*, 2005, 220: 120–124
- 23 刘凯, 段金荣, 徐东坡, 等. 长江下游产卵期凤鲚、刀鲚和湖鲚肌肉生化成分与能量密度. *动物学杂志*, 2009, 44: 118–124
- 24 刘红, 曹志华. 太湖新银鱼和近太湖新银鱼脂肪酸组成分析. *湖北农学院学报*, 1999, 19: 50–52
- 25 Mraz J, Pickova J. Differences between lipid content and composition of different parts of fillets from crossbred farmed carp (*Cyprinus carpio*). *Fish Physiol Biochem*, 2009, 35: 615–623
- 26 Ikonomou M G, Higgs D A, Gibbs M, et al. Flesh quality of market-size farmed and wild British Columbia salmon. *Environ Sci Technol*, 2007, 41: 437–443
- 27 陈银基, 鞠兴荣, 周光宏. 饱和脂肪酸分类与生理功能. *中国油脂*, 2008, 33: 35–39
- 28 Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization (FAO/WHO). *Fats and Oils in Human Nutrition. Report of a Joint Expert Consultation*. Rome: Food and Agriculture Organization, 1994. 49–55
- 29 罗永康. 7 种淡水鱼肌肉和内脏脂肪酸组成的分析. *中国农业大学学报*, 2001, 6: 108–111
- 30 Jabeen F, Chaudhry A S. Chemical compositions and fatty acid profiles of three freshwater fish species. *Food Chem*, 2011, 125: 991–996
- 31 Memon N N, Talpur F N, Bhangar M I. A comparison of proximate composition and fatty acid profile of Indus River fish species. *Int J Food Prop*, 2010, 13: 328–337
- 32 Kris-Etherton P M, Harris W S, Appel L J, et al. Fish consumption, fish oil, omega-3 fatty acids, and cardiovascular disease. *Circ J*, 2002, 106: 2747–2757

- 33 Calder P C. Long-chain n-3 fatty acids and cardiovascular disease: Further evidence and insights. *Nutr Res*, 2004, 24: 761–772
- 34 周潇奇. 我国居民二十年间膳食脂肪酸的变化及不同脂肪酸构成比对动脉粥样硬化老龄大鼠脂肪代谢的影响. 硕士学位论文. 南昌: 南昌大学, 2008. 40
- 35 Food and Agriculture Organization of the United Nations. Fat and fatty acids in human nutrition. Report of an Expert Consultation, FAO Food and Nutrition Paper 91. Rome: Food and Agriculture Organization, 2010. 17
- 36 GISSI-Prevenzione Investigators. Dietary supplementation with (n-3) polyunsaturated fatty acids and vitamin E after myocardial infarction: Results of the GISSI-Prevenzione trial. *Lancet*, 1999, 354: 447–455
- 37 Dewailly E, Blanchet C, Lemieux S, et al. (N-3) fatty acids and cardiovascular disease risk among the Inuit of Nunavik. *Am J Clin Nutr*, 2001, 74: 464–473
- 38 Erkkila A T, Lichtenstein A H, Mozaffarian D, et al. Fish intake is associated with a reduced progression of coronary artery atherosclerosis in postmenopausal women with coronary artery disease. *Am J Clin Nutr*, 2004, 80: 626–632
- 39 Hodge L, Salone C M, Peat J K. Consumption of oily fish and childhood asthma risk. *Med J Aust*, 1996, 164: 137–140
- 40 Dunston D W, Mori T A, Puddley I B. The independent and combined effects of aerobic exercise and dietary fish intake on serum lipids and glycemic control in NIDDM: A randomized controlled study. *Diabetes Care*, 1997, 20: 913–921
- 41 Cleland L G, James M J. Fish oil and rheumatoid arthritis: Anti-inflammatory and collateral health benefits. *J Rheumatol*, 2000, 27: 2305–2307
- 42 Calon R, Lim G P, Yang F S, et al. Docosahexaenoic acid protects from dendritic pathology in Alzheimer's disease mouse model. *Neuron*, 2004, 43: 633–645
- 43 Elmadfa I, Kornsteiner M. Fats and fatty acid requirements for adults. *Ann Nutr Metab*, 2009, 55: 56–75
- 44 U.S.A. Environmental Protection Agency (U.S. EPA). Guidance for Assessing Chemical Contaminant Data for Use in Fish Advisories. Volume 2: Risk Assessment and Fish Consumption Limits. 3th ed. Washington, DC: U.S. EPA, 2000. 34–118
- 45 Institute of Medicine (IOM). Dietary reference intakes for energy, carbohydrate, fiber, fat, fatty acids, cholesterol, protein, and amino acids (macronutrients). Washington, DC: the National Academies Press, 2002. 992
- 46 Lichtenstein A H, Appel L J, Brands M, et al. Diet and lifestyle recommendations revision 2006: A scientific statement from the American Heart Association Nutrition Committee. *Circulation*, 2006, 114: 82–96

## Polyunsaturated fatty acids in fish from Taihu Lake and the associated risk of ingesting polychlorinated biphenyls

ZHANG DongPing<sup>1</sup>, Zhang ShaoHuan<sup>1</sup>, YU YingXin<sup>1</sup>, WU MingHong<sup>2</sup> & FU JiaMo<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Environmental Pollution and Health, School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

<sup>2</sup> Institute of Applied Radiation, School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

<sup>3</sup> State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640, China

Fish contain high levels of n-3 polyunsaturated fatty acids (PUFAs), a desirable attribute for healthy eating. However, persistent organic pollutants often accumulate in fish. We measured the concentrations of fatty acids in four carnivorous fish: *Coilia ectenes taihuensis*, *Cultrichthys erythropterus*, *Paracanthobrama guichenoti*, and *Neosalanx taihuensis* Chen, collected from Taihu Lake, China. In addition, we evaluated the benefit-risk of co-ingestion of polychlorinated biphenyls and EPA+DHA, the active components of PUFAs. Palmitic acid, oleic acid, and docosahexaenoic acid were the predominant fatty acids in all species. The nutritive value of all four species was high based on the ratio of polyunsaturated fatty acids to saturated fatty acids and n-6 to n-3 polyunsaturated fatty acids (n-6/n-3 PUFA). Our data suggest that ingestion of the recommended 250 mg EPA+DHA intake per day for a healthy adult via the consumption of any of the four species would likely not result in the risk of cancer.

**freshwater fish, fatty acid, polychlorinated biphenyls, nutritive value, benefit-risk analysis**

doi: 10.1360/972011-1380