

广州市典型食用鱼类甲基汞含量及风险评估

田文娟^{1,2}, 陈来国^{2*}, 莫测辉¹, 许振成², 方建德², 梁明易², 黄玉妹²

(1.暨南大学理工学院环境工程系, 广州 510632; 2.环境保护部华南环境科学研究所城市环境研究中心, 广州 510655)

摘要:通过分析广州市区居民消费量较大的7种淡水鱼和5种海水鱼肌肉中甲基汞(MeHg)含量,评估人体通过食鱼摄入MeHg的暴露风险。结果显示,广州市鱼体肌肉中MeHg含量范围为2.39~349 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量为43.4 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。不同食性鱼类MeHg含量水平依次为:肉食性>杂食性>草食性,处于食物链不同环节解释了这种含量差异。从生长环境来看,海水鱼肌肉的MeHg含量总体上高于淡水鱼。所有鱼中MeHg含量均低于国内外相关标准限值。与国内其他地区商品鱼相比,广州市商品鱼中MeHg含量相当,但明显低于野生鱼。居民通过食鱼摄入的MeHg范围为0.035~0.087 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ (bw),均值为0.050 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ (bw),远低于美国EPA规定的MeHg暴露参考剂量(RfD)值(1.1 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$),也低于WHO和FAO制定的临时性周可承受摄入量(PTWD)(1.6 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。研究结果表明,广州居民食鱼MeHg暴露风险较小,但儿童等敏感人群食用特定鱼类的量和频次要引起一定注意。

关键词:淡水鱼类;海水鱼类;甲基汞;风险评估

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)03-0416-06

Concentrations and Exposure Risk Assessment of Methylmercury in Regularly Consumed Fishes from Guangzhou Markets, China

TIAN Wen-juan^{1,2}, CHEN Lai-guo^{2*}, MO Ce-hui¹, XU Zhen-cheng², FANG Jian-de², LIANG Ming-yi², HUANG Yu-mei²

(1.Department of Environmental Engineering, College of Science and Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2.Center for Research on Urban Environment, South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China)

Abstract: Human exposure to methylmercury (MeHg) via fish consumption was evaluated by analyzing MeHg concentrations in seven kinds of freshwater fishes and five kinds of marine fishes in Guangzhou. The results indicated that the MeHg in fish muscles ranged from 2.39 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ to 349 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, with an average of 43.4 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. The MeHg concentrations in fishes of different feeding habits decreased as carnivorous>pantophagous>herbivorous, which may be due to that they are in different levels of the food chain. The MeHg concentration in the muscle of marine fish was higher than that in the freshwater fish. The MeHg concentrations in fishes from Guangzhou markets did not exceed the maximum allowed level set by domestic or abroad organizations, and were comparable to those in fishes from other domestic markets, but significantly lower than those in the wild fishes. Via fish consumption, human were exposed to MeHg with a range value of 0.035~0.087 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ (bw) and an average of 0.050 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ (bw), which were lower than the reference dose (RfD) (1.1 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$) established by US EPA and the provisional tolerable weekly intake (PTWD) (1.6 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) by WHO/FAO. In Guangzhou, human exposure to MeHg via fish consumption was relatively low, but attention should be paid to the quantity and frequency of special fishes consumed by the susceptible people, children in particular.

Keywords: freshwater fish; marine fish; methylmercury; risk assessment

鱼和贝类等水产品由于富含高品质蛋白和其他必需营养元素而成为人类健康膳食必不可少的一部

分。然而,由于工业污染等原因造成的汞(Hg)及其化合物在水生生物中的富集给人类食用水产品带来了健康隐患。甲基汞(MeHg)是一种具有很强神经毒性的污染物,可以通过食物链在水生生物体内累积并沿食物链传递,并最终危害处于食物链顶端的人类^[1]。MeHg会对成年人一些特殊的细胞(如视神经细胞和脑细胞)造成很大损害^[2],它还可通过胎盘屏障进入胎

收稿日期:2010-09-06

基金项目:国家环保公益项目(20080911)

作者简介:田文娟(1984—),女,硕士研究生,主要研究方向为环境监测及评价。E-mail:juanjuan_wit@126.com

*通讯作者:陈来国 E-mail:chenlaiguo@scies.org

儿引起先天性 Hg 中毒^[3-4]。20 世纪 50 年代发生在日本的“水俣病”即为 MeHg 中毒。

目前国内对鱼 Hg 的研究主要集中在总汞 (THg) 上,且主要关注污染严重地区 Hg 的环境地球化学过程^[5-6],关于商品鱼 MeHg 含量水平和人群摄入 MeHg 暴露的研究相对较少^[7-9]。珠三角地区水资源丰富且毗邻海洋,各种淡水及海洋水产品丰富,居民喜好食鱼。同时珠三角地区工农业发达,能源消耗量大,环境中 Hg 负载较高,研究这一地区鱼中 MeHg 含量及人体暴露水平具有重要意义。

1 材料与方 法

1.1 样品采集和预处理

2010 年 1 月至 8 月,选取广州市有代表性的水产市场和连锁超市(荔湾区黄沙水产市场、越秀区百佳超市、天河区员村市场和易初莲花超市)购买新鲜成体鱼共 12 种,其中淡水鱼包括鲫鱼 (*Carassius carassius*)、鲤鱼 (*Cyprinus carpio*)、鳊鱼 (*Aristichthys nobilis*)、草鱼 (*Ctenopharyngodon idellus*)、大口黑鲈 (*Micropterus salmonides*)、鲮鱼 (*Cirrhinus molitorella*)、尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*); 海水鱼包括金线鱼 (*Nemipterus virgatus*)、美国红鱼 (*Sciaenops ocellatus*)、沙带鱼 (*Lepturacanthus savala*)、白鲟 (*Pampus argenteus*) 和大黄鱼 (*Pseudosciaena crocea*),共计 96 尾,见表 1。

逐条测量鱼体重和体长,去鳞洗净,再用高纯水冲洗,用滤纸吸干鱼体表面,去皮取其肌肉。对大个体鱼样,分别在鱼体躯干前、中、后段各取宽约 20 mm 的背脊肌肉混合,对中小个体鱼样则取全部背脊肌肉,装入样品袋于 -20 °C 冰箱中保存。取样工具和贮

存样品容器等按 Hg 分析的质量控制要求进行清洗净化^[4]。

1.2 标样与试剂

1.0 μg·mL⁻¹MeHg 标液 (Brooks Rand LLC, Seattle, WA, USA)、干鱼标准样品 DORM-3 (NRCC, Canada)、NaBEt₄ (≥98%, Strem Chemicals, USA)、柠檬酸 (≥99.5%, Merck, Germany)、柠檬酸钠 (≥99.0%, Merck, Germany)、KOH (≥85.0%, Merck, Germany)、甲醇 (≥99.9%, Merck, Germany)、18 MΩ·cm 超纯水 (Millipore 公司 Milli-Q 制备, USA)。

1.3 样品前处理

准确称量 0.1~0.3 g (精确到 0.000 1 g) 湿鱼样或 0.05~0.08 g 标准干鱼样至 25 mL 的 Teflon 消化罐中,加 2.5 mL 25% KOH/CH₃OH 溶液,在烘箱中 65 °C 加热约 4 h,然后用 CH₃OH 定容至 23 mL,摇匀待测。

1.4 样品的仪器分析

在经严格净化的棕色进样瓶 (I-Chem, USA) 中加入约 40 mL 超纯水,然后依次加入 300 μL 柠檬酸/柠檬酸钠缓冲溶液、30 μL 鱼样消解液、40 μL 1% NaBEt₄ 溶液,加满超纯水,旋紧瓶盖,检查有无气泡,摇匀后反应 15 min。分析仪器为全自动 MeHg 测定分析仪 (MERX, Brooks Rand Labs, USA), 仪器检测限 (IDL) 为 0.002 ng·L⁻¹。

1.5 质量保证与质量控制

标样含量在 0~200 μg·L⁻¹ 范围内的 7 点标准工作曲线呈线性关系 ($R^2 > 0.999$)。每批次保证 10% 的空白样品量,空白均检出微量 MeHg,但低于鱼样 MeHg 含量的 5%,分析结果扣减空白值;10% 的鱼样进行平行实验,重复样相对偏差 < 10%。标准参考物质

表 1 鱼类样品基本信息

Table 1 Basic information of fish samples

鱼类名称	样品量/尾	体重/kg	体长/cm	食性	生活习性	来源
鲫鱼	10	0.44±0.16	27.3±3.61	杂食性	中、上层鱼类	淡水养殖
鲤鱼	4	0.52±0.18	30.6±3.20	杂食性	底栖鱼类	淡水养殖
鳊鱼	3	1.86±0.34	50.9±5.31	杂食性	中、上层鱼类	淡水养殖
草鱼	8	1.26±0.41	46.1±4.24	草食性	中、下层鱼类	淡水养殖
大口黑鲈	10	0.40±0.25	27.1±5.02	肉食性	中、下层鱼类	淡水养殖
鲮鱼	7	0.41±0.23	32.7±6.66	杂食性	底栖鱼类	淡水养殖
尼罗罗非鱼	7	0.45±0.14	27.3±3.05	杂食性	底栖鱼类	淡水养殖
金线鱼	10	0.29±0.15	27.7±5.20	肉食性	近海底层鱼类	近海捕捞
美国红鱼	7	0.53±0.07	31.5±1.41	肉食性	近海底层鱼类	海水养殖
沙带鱼	8	0.58±0.35	77.3±12.88	肉食性	中、下层鱼类	深海捕捞
白鲟	12	0.34±0.02	19.7±0.83	杂食性	中、下层鱼类	海水养殖
大黄鱼	10	0.46±0.03	25.6±0.52	肉食性	中、下层鱼类	近海捕捞

DORM-3 用于进一步控制分析质量, MeHg 测定结果为推荐值的 $(95.5 \pm 8.5) \% (n=6)$ 。

2 结果与分析

2.1 鱼肌肉组织中 MeHg 含量水平

广州市场 12 种常见鱼类 MeHg 含量情况见图 1。鱼肉 MeHg 含量范围为 $2.39 \sim 349 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中淡水鱼 MeHg 含量范围为 $2.39 \sim 63.2 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 海水鱼为 $15.7 \sim 349 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。淡水鱼类中大口黑鲈 MeHg 平均含量最高, 为 $43.1 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 草鱼 MeHg 的平均含量最低, 为 $6.27 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 海水鱼中金线鱼 MeHg 含量最高, 白鲳含量最低, 均值分别为 $157 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $30.0 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由图 1 可看出, 7 种淡水鱼中鲫鱼、鲤鱼、草鱼和罗非鱼之间 MeHg 含量差别较小, 鳙鱼、大口黑鲈、鲮鱼含量相当; 5 种海水鱼中白鲳和大黄鱼、美国红鱼和沙带鱼肌肉 MeHg 含量相近, 海水鱼类 MeHg 含量总体高于淡水鱼类。

目前, 国内关于商品鱼类 MeHg 的研究报道较少^[9-10], 国内不同地区同种鱼类的 MeHg 含量对比见表 2。乌江、松花江和天津蓟运河野生鱼类 MeHg 含量明显高于养殖鱼, 原因之一可能是这 3 条江河有明显的 Hg 污染^[9-11], 且野生鱼类生长周期较长。虽然用于比较的数据较少, 笔者仍注意到广州、北京、成都地区的商品鱼 MeHg 含量相差不大。由于不同国家食用鱼种类不同, 在此不做比较。

2.2 影响鱼类肌肉 MeHg 含量水平的因素

从食性来看(图 2), 不同食性鱼类 MeHg 含量水

表 2 国内不同地区不同鱼类中 MeHg 含量比较

Table 2 MeHg concentrations in fishes from different domestic markets

地区	鱼类 MeHg 均值/ $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$				其他信息	
	鲫鱼	鲤鱼	草鱼	鳙鱼	鱼样来源	采样时间
广州市场	8.47	12.2	6.27	30	市售鱼	2010 年
北京市场		3.76	4.86	13.95	市售鱼	2006 年 ^[9]
成都市郊	26.1	12.3	18.7		市售鱼	2007 年 ^[11]
乌江上游	140	81	50		野生鱼	1991 年 ^[12]
松花江	100	102			野生鱼	2004 年 ^[14]
天津蓟运河		240		480	野生鱼	1990 年 ^[13]
洪家渡水库	90				野生鱼	2010 年 ^[15]

平依次为: 肉食性 > 杂食性 > 草食性。处于食物链不同环节容易解释它们之间 MeHg 含量的差异。多个研究表明, 处于食物链顶端的肉食性鱼类比处于中底端的杂食性和草食性鱼类更易在体内富集 MeHg^[12-14]。

从生长环境来看, 海水鱼肌肉 MeHg 含量总体上高于淡水鱼(图 1)。海水鱼多为野生, 生长年限较长, 在自然环境中正常的食物链, 更容易富集 MeHg。商品淡水鱼一般以养殖为主, 生长年限短, 食物链已被人为破坏, 食物以人工饲料和鱼草为主, 不易富集 MeHg, 同时易产生 MeHg 的事件(如洪水、水体涨滞等)也因人为控制大大减少。

3 讨论

3.1 MeHg 暴露风险评估

3.1.1 鱼肉 MeHg 含量水平评估

水产品中允许的 MeHg 最大残留量(maximum

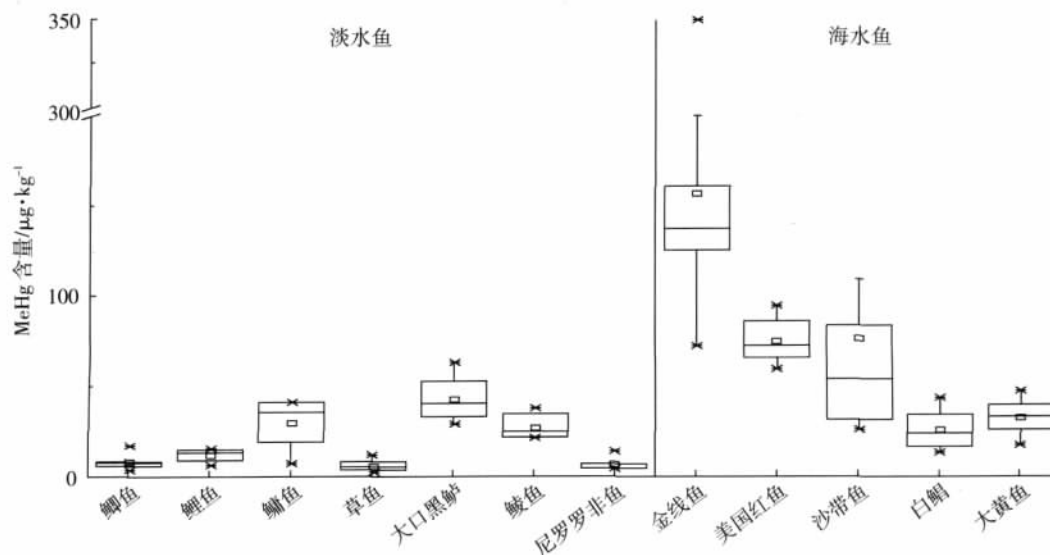


图 1 淡水和海水鱼肌肉中 MeHg 的含量水平

Figure 1 MeHg concentrations in muscles of freshwater and marine fishes

residue level, MRL) 或最高限量 (maximum level, ML) 用于评估水产品是否会对当地食鱼人群有暴露风险。2005年,我国在《食品污染物限量》(GB 2762—2005)中对鱼的 MeHg 标准进行了重新修订,非肉食鱼类及其他水产品限值为 $500 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,肉食鱼类限值为 $1000 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。美国食品药品监督管理局(FDA)规定鱼体 MeHg 限量标准为 $1000 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,英国和欧盟对非掠食性鱼类的规定同样为 $1000 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其他的鱼类可食用部分为 $500 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。参照现行的国内外标准,广州地区鱼类肌肉 MeHg 含量范围为 $2.39\sim 349 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,低于这些标准。

3.1.2 人群食鱼暴露风险评估

为了评估 MeHg 对人体的潜在危害,使用下式可计算居民每天消费鱼类摄入 MeHg 的量:

$$EDI=C\times M/BW$$

式中: C 为鱼肉中 MeHg 的浓度, M 为每人每天食鱼量, BW 为体重。本研究根据不同年龄段人群的体重^[17]和鱼的消费量^[18],计算出他们每天每千克体重 MeHg 的摄入量(图3)。

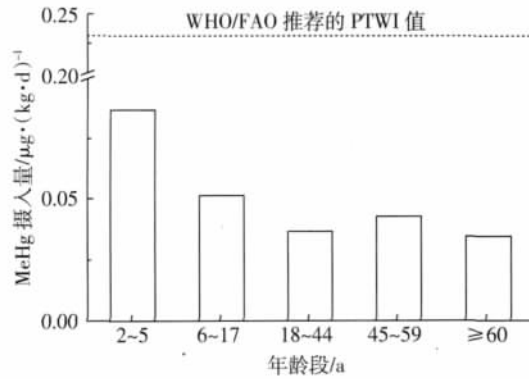


图3 不同年龄段人群食鱼的 MeHg 摄入量

Figure 3 Methylmercury intake via eating fish in different ages

根据 MeHg 和人体健康效应之间的关系,美国 FDA 和 EPA 建立了 MeHg 摄入参考剂量 (reference dose, RfD),世界卫生组织 (WHO) 和联合国粮食与农业组织 (FAO) 联合制定了临时性周可承受摄入量 (PTWD, 这两个标准成为国际公认的 MeHg 暴露衡量指标^[19]。1972年,WHO 组织建议成人每周暂定 MeHg 允许摄入量不得超过 $3.3 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。2003年,联

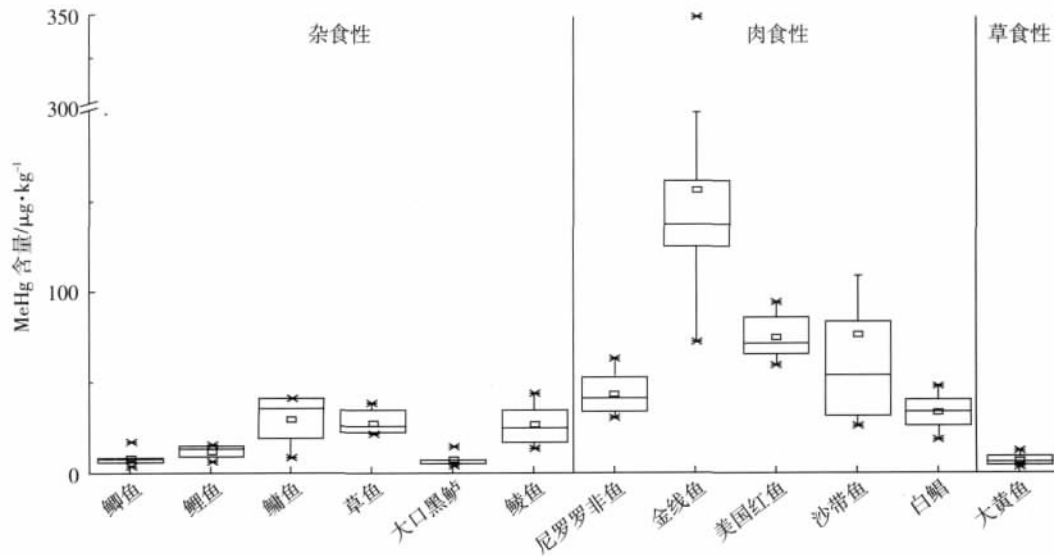


图2 不同食性鱼类肌肉 MeHg 含量水平

Figure 2 MeHg concentrations in muscles of fishes with different feeding habits

表3 部分国家或组织建议的 MeHg 最大可承受摄入量

Table 3 Proposed provisional tolerable intakes of MeHg from different countries and organizations

国家或组织	相关标准	可承受的摄入量
欧盟	指令、法规和指导文件	每周 $1.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (相当于 $0.23 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$)
日本	鱼类和甲壳类食用标准	临时性日可承受摄入量: $0.4 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$
英国	欧洲法定标准	每周 $1.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (相当于 $0.23 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$)
美国	FDA/EPA 相关规定	EPA 制定的 RfD: $1.1 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$
WHO/FAO	鱼体 MeHg 含量导则	PTWI: 每周 $1.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (相当于 $0.23 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$)

合食品添加剂专家委员会(JECFA)将 MeHg 的 PTWI 值由 $3.3 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降至 $1.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。1995 年,美国 EPA 修订了 RfD 的基准量(BMD),并推算出通过饮食进入人体的 MeHg 日摄入量限值为 $1.1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。表 3 列举了部分国家或组织制定的 MeHg 最大可承受摄入量。

由图 3 可知,随着年龄的增长,人体通过食鱼摄入的 MeHg 含量总体呈下降趋势,儿童(2~5 岁)的 MeHg 摄入量最高,为 $0.087 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,低于 WHO/FAO 设定的每天可承受摄入量($0.23 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$),远低于美国 EPA 制订的 RfD 值($1.1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)。由于儿童是最易受 MeHg 毒性影响的敏感人群,其摄入较高量的 MeHg 还是应引起一定关注。

3.1.3 广州食用鱼类消费建议

由于不同人群对 MeHg 的耐受程度不同,依据 EPA 制订的 RfD 值($1.1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$),计算了上述不同年龄段人群食用广州市 4 种代表性商品鱼的日最大安全摄入量。由表 4 可知,儿童(2~5 岁)对 MeHg 平均含量最高的金线鱼每日的食用限量为 220 g,而其他年龄段人群的食用限量都大于 300 g,对于敏感人群要注意食用特定鱼的量与频次。

表 4 依据 WHO/FAO 限值计算的不同年龄段人群每日可食鱼最大量(kg)

Table 4 Daily maximum amount of eating fish for different ages according to WHO/FAO standard (kg)

鱼类	年龄段/a				
	2~5	6~17	18~44	45~59	≥60
草鱼	5.61	7.84	8.84	10.4	7.95
大口黑鲈	0.82	1.14	1.29	1.50	1.16
白鲳	1.17	1.64	1.85	2.17	1.66
金线鱼	0.22	0.31	0.35	0.41	0.32

4 结论

(1) 广州市 12 种鱼肉的 MeHg 含量范围为 $2.39\sim 349 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值范围为 $6.27\sim 157 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,和国内报道的其他商品鱼 MeHg 含量相当,远低于受污染水体中野生鱼 MeHg 含量。

(2) 不同食性鱼类 MeHg 含量水平依次为肉食性>杂食性>草食性,处于食物链不同环节解释了这种含量差异。从生长环境来看,海水鱼肌肉的 MeHg 含量总体上高于淡水鱼。

(3) 广州商品鱼中 MeHg 的平均值和最高值均低于国内外的现行标准,同时通过食鱼 MeHg 摄入量也

远低于相关标准,广州市居民食鱼 MeHg 暴露在安全范围内,但儿童等敏感人群食用特定鱼种类和频次要引起一定注意。

参考文献:

- [1] 江津津,曾庆孝,阮征,等.水产品中汞与甲基汞风险评估的研究进展[J].食品工业科技,2007,11(28):244-246.
JIANG Jin-jin, ZENG Qing-xiao, RUAN Zheng, et al. Research progress of the risk assessment of mercury and methylmercury in aquatic products [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2007, 11 (28) : 244-246.
- [2] Clarkson T W. Mercury-major issues in environmental-health[J]. *Environment Health Perspect*, 1993, 100: 31-38.
- [3] 何滨,江桂斌.汞形态分析的前处理技术[J].分析测试学报,2002,21(1):89-94.
HE Bin, JIANG Gui-bin. Mercury morphological analysis pretreatment technique[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2002, 21 (1) : 89-94.
- [4] 阎海鱼,冯新斌,LIANG Lian,等. GC-CVAFS 法测定鱼体内甲基汞的分析方法研究[J].分析测试学报,2005,24(6):78-80.
YAN Hai-yu, FENG Xin-bin, LIANG Lian, et al. Determination of mercury in fish using GC-CVAFS[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2005, 24 (6) : 78-80.
- [5] 孙晓静,王起超,张少庆,等.第二松花江水中甲基汞的时空变化规律[J].环境科学,2008,29(11):3017-3021.
SUN Xiao-jing, WANG Qi-chao, ZHANG Shao-qing, et al. Temporal and spatial variation rule of methylmercury in water in the second Songhua River[J]. *Environmental Science*, 2008, 29 (11) : 3017-3021.
- [6] 阎海鱼,冯新斌,刘霆,等.贵州百花湖鱼体汞污染现状[J].生态学杂志,2008,27(8):1357-1361.
YAN Hai-yu, FENG Xin-bin, LIU Ting, et al. Present situation of fish mercury pollution in heavily mercury-contaminated Bai hua reservoir in Guizhou[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27 (8) : 1357-1361.
- [7] 孙瑾,陈春英,李柏,等.北京市场 4 种食用淡水鱼的总汞和甲基汞的含量分析[J].卫生研究,2006,35(6):722-725.
SUN Jin, CHEN Chun-ying, LI Bai, et al. Analysis of total mercury and methylmercury concentrations in four commercially important freshwater fish species obtained from Beijing markets[J]. *Journal of Hygiene Research*, 2006, 35 (6) : 722-725.
- [8] 张磊,王起超.第二松花江下游居民甲基汞健康风险研究[J].环境与健康杂志,2008,25(8):691-692.
ZHANG Lei, WANG Qi-chao. Health risk assessment of methylmercury exposure of urban and rural residents living in downstream of second Songhua river[J]. *Journal of Environment and Health*, 2008, 25 (8) : 691-692.
- [9] 邵丽娟,施泽明,倪师军,等.成都市城郊鱼甲基汞的安全性研究[J].安徽农业科学,2009,37(28):13649-13652.
SHAO Li-juan, SHI Ze-ming, NI Shi-jun, et al. Study on methylmercury security in fish on the outskirts of Chengdu[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37 (28) : 13649-13652.
- [10] 张明时,王爱民,赵小毛,等.乌江上游水域水生生物中甲基汞污染

- 调研[J]. 贵州科学, 1991, 9(2): 155-159.
- ZHANG Ming-shi, WANG Ai-ming, ZHAO Xiao-mao, et al. Methylmercury pollution investigation of aquatic life in Wujiang River upstream[J]. *Guizhou Science*, 1991, 9(2): 155-159.
- [11] 江桂斌, 顾晓梅, 倪哲明, 等. 毛细管气相色谱——原子吸收法测定生物样品中的有机汞化合物[J]. 色谱, 1991, 9(6): 350-352.
- JIANG Gui-bin, GU Xiao-mei, NI Zhe-ming, et al. 1991. Determination of organomercury compounds in biological samples by capillary gas chromatography-atomic absorption spectrometry[J]. *Chromatograph*, 1991, 9(6): 350-352.
- [12] Celo V, Lean D R S, Scott S L. Abiotic methylation of mercury in the aquatic environment[J]. *The Science of the Total Environment*, 2005, 368(1): 126-137.
- [13] Lasorsa B, Allen G S. The methylmercury to total mercury ratio in selected marine, freshwater, and terrestrial organisms[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, 80: 905-913.
- [14] Ikingura J R, Akagi H. Methylmercury production and distribution in aquatic systems[J]. *The Science of the Total Environment*, 1999, 234: 109-118.
- [15] 姚珩, 冯新斌, 阎海鱼, 等. 乌江洪家渡水库鱼体汞含量[J]. 生态学杂志, 2010, 29(6): 1155-1160.
- YAO Heng, FENG Xin-bin, YAN Hai-yu, et al. Mercury concentration in fish body in Hongjiadu Reservoir of Guizhou Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(6): 1155-1160.
- [16] Gold M R, Siegel J E, Russell L B, et al. Cost-effectiveness in health and medicine[M]. New York, NY: Oxford University Press, 1996.
- [17] 孟祥周. 中国南方典型食用鱼类中持久性卤代烃的浓度分布及人体暴露的初步研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院: 中国科学院广州地球化学研究所, 2007.
- MENG Xiang-zhou. Persistent halogenated hydrocarbons in typical consumer fish of South China and human exposure via fish consumption [D]. Beijing: Graduate university of Chinese Academy of Sciences: Guangzhou Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [18] 唐洪磊, 郭英, 孟祥周, 等. 广东省沿海城市居民膳食结构及食物污染状况的调研[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(2): 329-336.
- TANG Hong-lei, GUO Ying, MENG Xiang-zhou, et al. Nutritional status in dietary intake and pollutants via food in coastal cities of Guangdong Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(2): 329-336.
- [19] 蔡文洁, 江研因. 甲基汞暴露健康风险评价的研究进展 [J]. 环境与健康杂志, 2008, 25(1): 77-80.
- CAI Wen-jie, JIANG Yan-yin. Research advance of health risk assessment on methylmercury exposure[J]. *Environment and Health*, 2008, 25(1): 77-80.