

# 鱼肉中汞的生物可给性研究

——基于 *in vitro* PBET 方法

廖文<sup>1-3</sup> 汪光<sup>1,2</sup> 赵文博<sup>1,2,4</sup> 李开明<sup>1,2</sup> 陈中颖<sup>1,2</sup>

- (1. 环境保护部华南环境科学研究所, 国家环境保护水环境模拟与污染控制重点实验室, 广东 广州 510655; 2. 广东省水与大气污染防治重点实验室, 广东 广州 510655; 3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 4. 河北大学生命科学学院, 河北 保定 071002)

**摘要:** 文章采用 ICP-MS 对广州市售的鲮鱼、多宝鱼和老虎斑 3 种鱼中汞浓度进行了检测, 并通过 *in vitro* 体外模拟胃肠消化 (PBET) 对鱼肉中汞的生物可给性进行了考察。结果表明, 鱼肉中汞的浓度为 4.9 ~ 44.3  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 未超过国家规定的食品中汞限量指标。同时 *in vitro* 结果表明, 鱼肉中 62.36% ~ 79.21% 的汞生物可给。最后在生物可给浓度的基础上进行了风险评价, 在广州, 成人和小孩通过这 3 种鱼摄入汞最大量分别为 2.11 和 1.44  $\mu\text{g}/\text{d}$ , 占 JECFA 规定的暂定每周可耐受摄入量的 19.5% 和 13.3%, 因此汞在这 3 种鱼类中的暴露风险都是安全的。

**关键词:** 汞; 鱼; 生物可给性; PBET; 健康风险评估

中图分类号: X171.5

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2018.02.020

## Bioaccessibility of Mercury in Fish Based on an *in vitro* Physiologically – based Extraction Test

Liao Wen<sup>1,2,3</sup>, Wang Guang<sup>1,2</sup>, Zhao Wenbo<sup>1,2,4</sup>, Li Kaiming<sup>1,2</sup>, Chen Zhongying<sup>1,2</sup>

- (1. National Key Laboratory of Water Environment Simulation and Pollution Control, South China Institute of Environmental Sciences, MEP, Guangzhou 510655, China; 2. Key Laboratory of Water and Air Pollution Control of Guangdong Province, Guangzhou 510655, China; 3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 4. College of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071002, China)

**Abstract:** As a global toxic trace element, mercury (Hg) is carcinogenic and teratogenic. Fish is highly nutritious food but generally considered to be one of the main diet exposure sources of Hg. In this study, three kinds of fish (Mesoclupea, Turbot, Tiger grouper) were collected from the markets in Guangzhou City and ICP-MS was used to determine the Hg contents in the sample fishes. *In vitro* Physiologically – based Extraction Test (PBET) was used to assess the bioaccessibility of Hg in the fish. The results showed that Hg concentrations in fish were 4.9 ~ 44.3  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , not exceeding the national regulated limits in food. Meanwhile, the *in vitro* results indicated that the bioaccessible percent of Hg in fish was 62.36% ~ 79.21%. In addition, risk assessment was carried out on the basis of bioaccessibility concentration. It was estimated that the daily intakes of Hg from the three kinds of fish were 2.11 and 1.44  $\mu\text{g}/\text{d}$  by adults and children respectively, accounting for 19.5% and 13.3% of the provisional tolerable weekly intake (PTWI) established by JECFA. Therefore, the exposure risks of Hg in the three kinds of fish were safe.

**Keywords:** Mercury; Fish; Bioaccessibility; PBET; Health Risk Assessment

CLC number: X171.5

收稿日期: 2018-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(21207046); 广东省自然科学基金(S2012010008396)资助

作者简介: 廖文(1988-), 女, 博士研究生。研究方向: 环境毒理及健康风险评估。E-mail: liaowen0735@126.com

通信作者: 汪光(1979-), 男, 博士、高级工程师。研究方向: 毒害污染物健康及生态风险评估。E-mail: wangguang@scies.org

汞(Hg)是一种具有严重生理毒性的全球性重金属污染物,具有可致癌性、致畸性,尤其是甲基汞,可能破坏脑细胞,引起神经系统紊乱,对心血管具有很大的危害,且易通过胎盘作用于胎儿<sup>[1]</sup>。人类活动导致每年向大气、水体和土壤中排放的总汞量已超过 2 万 t<sup>[2]</sup>。鱼肉是膳食中重要的组成部分<sup>[3]</sup>,其富含多种不饱和脂肪酸、高质量蛋白、维生素和微量元素等,人们认为通过多摄入鱼肉能起到预防高血压、冠心病、癌症等目的<sup>[4]</sup>。然而环境中的无机汞可在鱼体内被转化为毒性更强的甲基汞,甲基汞的脂溶性和较长的半衰期使其在鱼体内具有极高的生物富集系数(104 以上)并通过食物链富集起来<sup>[5]</sup>。因此,鱼被认为是人体汞经口暴露的主要途径之一<sup>[6-7]</sup>。

我国规定肉食性和非肉食性鱼肉中甲基汞的限定值分别为 1.0 和 0.5 mg/kg<sup>[8]</sup>。为评价食品中汞对人体造成的健康危害,一般根据食品中汞的浓度和人群暴露量来计算食品汞摄入量<sup>[9]</sup>。不少国家或地区制定了食品中总汞或甲基汞的最大容许浓度及每周耐受摄入量,并通过比较食品中汞的摄入量与耐受摄入量进行人体健康风险评估<sup>[10]</sup>。

广东沿海地区由于受饮食习惯影响,各类海产品的摄入量较大,鱼虾类摄入量明显高于我国平均水平,其中广东省鱼虾类总体平均摄入量约为全国总体平均摄入量的两倍,且逐年有上升趋势<sup>[11-12]</sup>。蔡文华等<sup>[13]</sup>对 2014 年广东省膳食中的汞的人群健康风险进行过评价,计算出广东省人群汞每周摄入量为 0.01 ~ 1.29 μg/(kg·BW),小于联合国粮农组织和世界卫生组织下的食品添加剂联合专家委员会(JECFA)规定的汞每周耐受摄入量(PTWI) 1.3 μg/(kg·BW),指出广东省居民膳食中汞污染的暴露情况总体来说处于安全水平,但暴露结果仅根据食品中汞的初始浓度来计算,而经口的食物中的汞不一定能完全可被吸收。那么采用食品中本身浓度来进行健康风险评价可能会过高估计其对人体的风险。因此,有必要通过研究鱼肉生物可给的浓度来评价。

生物可给性(bioaccessibility),即污染物在胃

肠环境中可以溶出的比例,是污染物最大经口生物有效性的指示。一般采用 *in vivo* 和 *in vitro* 毒性试验来研究,其中 *in vitro* 方法以体外消化法为主即通过模拟人体消化系统(主要是胃和小肠),采用与人体生理条件一致或相接近的人工合成消化液(唾液、胃液、小肠液等)来浸提不同基质中的污染物,测定污染物溶出量,得出污染物的生物可给性;该方法操作简单、实验周期短、费用低廉、实验条件易于操作、实验结果重现性较好,目前被广泛地应用<sup>[14]</sup>。近年来,通过研究鱼肉中汞的生物可给性来评价鱼肉汞暴露对人体的健康风险较多<sup>[15-23]</sup>。

因此,文章对广州市场上采集的鱼进行处理后测定汞的浓度,并采用胃-肠两步模拟消化分析总汞的生物可给性,最后在此基础上对鱼肉中汞的健康风险进行评价,对比初始浓度和生物可给浓度下的健康风险,以期能为流行病学方面提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 样品采集

在广州市内某两个大型海鲜市场及菜市场购买多宝鱼、老虎斑和鲚鱼,均来自珠江海域。去皮、骨头等,清水洗后用超纯水冲洗 3 次,然后绞碎肌肉(小熊 Bear 粉碎机 FSJ - A05N6),于 -20 °C 下预冷冻 12 h 后,一部分放入真空冷冻干燥机( ALPHA 1 - 2 ,CHRIST,德国)内冷冻干燥 72 h,另一部分在 -80 °C 下保存。

### 1.2 *in vitro* 生物可给性实验

鱼肉中汞的生物可给性实验基于体外模拟胃-肠两阶段消化(PBET),实验中所用到的化学物质,除特别说明,均来自 Sigma - Aldrich 公司,为分析纯及以上。实验用水为超纯水(Milli - Q Element Millipore,美国,电阻率 ≥ 18.2 mΩ·cm),所用到的器皿均采用 20% 硝酸浸泡 24 h 后洗净待用。

每个反应罐中加入 500 mL 模拟胃液(1 L 超纯水 + 1.25 g 胃蛋白酶 + 0.5 g 柠檬酸钠 + 0.5 g 苹果酸 + 420 μL 乳酸 + 500 μL 乙酸,并用 12

mol/L 的 HCl 调 pH 至 2) ,取 5 g 鱼肉样品 ,通氦气 1 ~ 2 min ,开始计时 ,在 37 °C 的溶出试验仪中以 150 r/min 旋涡震荡 1 h; 旋转条件下取 30 mL 消化液。在进入肠阶段前 ,先用饱和 NaHCO<sub>3</sub> 溶液将 pH 调至 5.3 ,然后在每个反应罐中加入 0.875 g 胆酸钠(质量比食物样品:胆酸钠 = 1:0.175) 和 0.25 g 胰酶(质量比食物样品:胰酶 = 1:0.05) ;再用 1 mol/L 的氢氧化钠将 pH 值调至 7.0; 在 37 °C 的溶出试验仪中以 150 r/min 旋涡震荡 2 h; 旋转条件下取 30 mL 消化液。

### 1.3 样品测定

准确称取粉碎冻干后的海鲜样品(0.2 g) ,加入 4 mL 硝酸静置直至样品基本溶于硝酸中(4 ~ 6 h) ,然后加入 1 mL 双氧水 ,之后使用微波消解仪( Mars 6 ,CEM ,美国) 在最大功率为 1 600 W 条件下进行梯度消解 40 min(各消解温度下的爬升时间和停留时间分别为 120 °C: 6 min ,5 min; 150 °C: 5 min ,5 min; 180 °C: 4 min ,15 min) 。消解液定容至 50 mL ,采用 0.22 μm 水系膜过滤后待测。标准物质与空白采用同样方式消解 ,各平行 3 份。

生物可给样品在 5 000 g 离心 15 min ,上清液采用 0.22 μm 水系膜过滤后待测。模拟消化后的鱼肉残渣在 -20 °C 条件下预冷冻后进行真空冷冻干燥 ,消解后待测。

实验采用 ICP - MS( ICP - MS 7700 ,Agilent ,美国) 测定鱼肉样品、体外模拟胃 - 肠两阶段消化后的溶液及残渣中汞浓度。采用四级杆碰撞反应池技术 ,能有效减少多原子离子的干扰 ,保证 <sup>156</sup>CeO<sup>+</sup> / <sup>140</sup>Ce < 1.5% ,双电荷 <sup>70</sup>Ce<sup>2+</sup> / <sup>140</sup>Ce < 3% 。ICP - MS 的工作参数见表 1。

实验采用 2% 硝酸逐级稀释汞标准液 ,由于食品中汞的浓度很低 ,设定汞标准曲线的浓度梯度分别为 0.0 ,0.2 ,0.4 ,0.6 ,0.8 和 1.0 μg/L。实验测得汞标准曲线相关系数均在 0.999 9 以上。测定空白样(2% 硝酸) ,计算 11 次测定值的 3 倍标准偏差所对应的分析物的浓度值 ,即为检出限<sup>[24]</sup> ,文章计算得到的检出限为 0.013 5 μg/L。

表 1 ICP - MS 仪器的工作参数

| 工作参数                     | 设定值                      |
|--------------------------|--------------------------|
| RF 功率                    | 1 550 W                  |
| 等离子体气流量                  | 15 L·min <sup>-1</sup>   |
| 辅助气流量                    | 1 L·min <sup>-1</sup>    |
| 载气流量                     | 0.86 L·min <sup>-1</sup> |
| 雾化温度                     | 2 °C                     |
| 蠕动泵                      | 0.1 r·min <sup>-1</sup>  |
| 采样深度                     | 8 mm                     |
| 积分时间                     | 2 s                      |
| 内标元素( <sup>209</sup> Bi) | 10 μg·L <sup>-1</sup>    |
| 数据采集方式                   | 全定量                      |

### 1.4 数据处理

根据样品测定结果 ,鱼肉中汞的生物可给性及残渣汞占比分别可按照以下两个公式计算<sup>[19]</sup>:

$$\text{汞的生物可给性}(\%) = \frac{\text{生物可给的汞浓度}}{\text{鱼肉中汞的总浓度}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{残渣汞}(\%) = \frac{\text{残渣中汞浓度}}{\text{鱼肉中汞的总浓度}} \times 100 \quad (2)$$

为了评价鱼肉中汞的健康风险 ,采用每日摄入量(EDI) 和目标风险系数(THQ)<sup>[13 25]</sup>:

$$EDI = \frac{DC \times c_i}{BW} \quad (3)$$

$$THQ = \frac{EF \times ED \times EDI}{RfD \times AT} \times 10^{-3} \quad (4)$$

其中:DC 为每日鱼肉摄入量 ,g/d; c<sub>i</sub> 为鱼肉中的汞浓度或者生物可给浓度; BW 为人体重(成人 60 kg ,小孩 32.5 kg) ; ED 为暴露持续时间(70 a) ; EF 为暴露频率(365 d/a) ; AT 为非致癌的平均时间(文中假设为 365 d/a × 暴露时间 70 a) ; 10<sup>-3</sup> 为转化系数; RfD 为 JECFA 规定的参考口服剂量(0.18 μg/(kg·d))<sup>[26]</sup> ,广东省成人鱼肉摄入量为 60 g/d ,小孩鱼肉摄入量为 41 g/d<sup>[27]</sup>。

### 1.5 质量保证与质量控制

狗鲨鱼肉(NRC DORM - 2) 和鱼蛋白(NRC DORM - 4) 标准物质用于保证方法的准确性 ,总

量测定实验中,标准物质与其他样品在相同条件下反应萃取其中的汞,标准物质的测定值与标准物质中汞的标准含量的比值可得出方法的回收率,为 91%~107%。

采用 SPSS 21.0 和 OriginLab 9.0 分析数据。采用单向方差分析显著性,当  $P < 0.05$  则认为具有显著性。所有的数据采用平均值或者平均值  $\pm$  标准偏差的形式。所有质量浓度均为湿重形式。

表 2 广州市场中鱼肉中总汞的浓度和生物可给性

| 种类    | 学名                            | 样本量 | 冷冻干燥<br>脱水率/% | 总汞/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ |           | 汞的生物可给浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ |           |
|-------|-------------------------------|-----|---------------|--------------------------------------|-----------|--|-----------|
|       |                               |     |               | 平均值                                  | 范围        | 平均值  | 范围        |
| 鲚鱼(大) | <i>Engraulis encrasicolus</i> | 6   | 80.54         | 4.9                                  | 1.8~7.8   | 3.1  | 1.1~4.9   |
| 多宝鱼   | <i>Scophthalmus maximus</i>   | 8   | 81.38         | 16.7                                 | 11.2~25.6 | 10.8                                       | 7.2~16.5  |
| 老虎斑   | <i>Blotchy rock cod</i>       | 4   | 77.69         | 44.3                                 | 34.5~56.7 | 35.1                                       | 27.3~44.9 |

对比我国其他省份及国外某些市场中鱼肉总汞的浓度,鲚鱼、多宝鱼和老虎斑 3 种鱼汞的含量

## 2 结果与讨论

### 2.1 鱼肉中汞的含量

采集的鲚鱼、多宝鱼和老虎斑 3 种鱼中汞的平均浓度为  $21.97 \mu\text{g}/\text{kg}$ ,其中老虎斑的含量最大,为  $44.3 \mu\text{g}/\text{kg}$ ,鲚鱼的含量最小,为  $4.9 \mu\text{g}/\text{kg}$ ,见表 2。未超过国家规定的鱼肉中汞的限量指标<sup>[8]</sup>。

均处于中低水平,与中国南海中某些鱼汞含量类似<sup>[18]</sup>,见表 3。

表 3 我国其他省及国外某些市场中鱼肉总汞的浓度和生物可给性

| 来源  | 鱼种类                                 | 总汞的浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 汞的生物可给性/%        | In vitro 实验 | 备注      |
|-----|-------------------------------------|---|------------------|-------------|---------|
| 香港  | 10 种淡水鱼                             | $94.3 \pm 49.2$                         | 21.4~51.7        | 胃、肠两阶段      | [15]    |
|     | 10 种海水鱼                             | $106 \pm 62.4$                          |                  |             |         |
| 浙江  | 鲶鱼( <i>yellowhead catfish</i> )     | $41.2 \pm 16.3$                         | 37.5~56.5 (MeHg) | 胃、肠两阶段      | [16-17] |
|     | 鳙鱼( <i>bighead carp</i> )           | $57.0 \pm 16.9$                         |                  |             |         |
|     | 草鱼( <i>Grass carp</i> )             | $23.6 \pm 10.9$                         |                  |             |         |
| 海南  | 鲳鱼等 14 种海鱼                          | 8~293                                   | NA               | NA          | [9]     |
|     | 金枪鱼( <i>Thunnus spp.</i> )          | 910                                     | $78 \pm 6$       | 口、胃、肠三阶段    | [18]    |
| 葡萄牙 | 鲭鱼( <i>Scomber scombrus</i> )       | 1~10                                    | NA               | NA          | [19]    |
|     | 鲈鱼( <i>Dicentrarchus labrax</i> )   | 20~90                                   |                  |             |         |
|     | 带鱼( <i>Aphanopus carbo</i> )        | 320~1100                                |                  |             |         |
| 西班牙 | 鳀鱼( <i>Engraulis encrasicolus</i> ) | 23.5~42.5                               | 77~86            | 胃、肠两阶段      | [20]    |
|     | 鳕鱼( <i>Merluccius merluccius</i> )  | 44~274                                  | 59~92            |             |         |
|     | 琵琶鱼( <i>Lophius piscalorius</i> )   | 132.9~133.0                             | 57               |             |         |
| 加拿大 | 鲑鱼、独角鲸等 6 中海水鱼                      | 20~3 400                                | 1~99             | 胃、肠两阶段      | [21]    |

来自同一海域的不同的鱼体中汞的浓度不一,这可能与不同鱼类代谢汞的方式和程度以及不同栖息和摄食习性等有关<sup>[22]</sup>。已有研究表明海水鱼中汞的平均浓度大于淡水鱼<sup>[15]</sup>,肉食性鱼中汞的含量大于杂食性和草食性鱼<sup>[15-17]</sup>。文中

老虎斑是典型的肉食性海鱼类,主要摄食鱼、虾、蟹、章鱼等海洋生物;多宝鱼摄食甲壳类、小鱼、虾等;鲚鱼属河口性洄游鱼类。因此,老虎斑体内汞的浓度最大。

### 2.2 鱼肉中汞的生物可给性

文章对模拟胃肠消化前后鱼肉中汞的浓度进行了检测,根据公式(1)和(2)计算了生物可给性和残渣率。总的来说,各鱼肉中汞的生物可给部分小于鱼肉中汞的总量。经过模拟胃肠消化后,对残渣中汞的浓度检测,计算得到汞的残渣率分别为 34.56%、30.21% 和 17.35%,与生物可给部分之和为 94.57%~96.92%,进一步证明生物可给实验的有效性。结果见图 1。

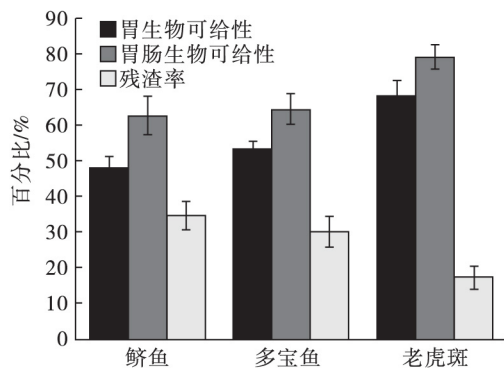


图 1 鱼肉中汞的胃生物可给性、胃肠生物可给性和残渣中剩余汞占比

由图 1 可知,在经过模拟胃阶段消化后,鲚鱼、多宝鱼和老虎斑中汞的生物可给性分别为

47.82%、53.16% 和 67.79%,而胃肠消化后,3 种鱼中汞的生物可给性均有所上升,分别为 62.36%、64.36% 和 79.21%。这是因为:在酸性条件下( $pH = 2.0$ ),胃蛋白酶接受更多的氢离子使其更好地打破肽键,将蛋白质水解。而在肠消化阶段, $pH$  调至  $pH = 5.3 \sim 7.0$ ,可使得胰液中的酶使得多糖被水解形成单糖,并进一步破坏蛋白质的结构,形成自由氨基酸和缩氨酸,促进了结合在蛋白质上汞的释放,另一方面胆盐能增强胰酶的活性。因而在胃肠消化后,汞的生物可给部分更多得以释放出来<sup>[23]</sup>。

文中的实验结果与某些研究一致<sup>[19, 21]</sup>,而 Wang et al<sup>[15]</sup>对香港市场 10 种淡水鱼和 10 种海水鱼研究发现,汞的生物可给性为 21.4%~51.7%,小于文中研究结果。一方面,可能是模拟生物可给实验的方法和条件差异<sup>[23]</sup>;另一方面,可能是不同鱼体内汞的存在形态和不同形态汞的可溶性程度有差异<sup>[22, 24]</sup>。

### 2.3 健康风险评价

文中研究的鲚鱼、多宝鱼和老虎斑 3 种鱼汞的每日摄入量 and 目标风险系数,见表 4。

表 4 鱼肉中汞的每日摄入量(EDI)和目标风险系数(THQ)

| 鱼类    | EDI/ $\mu g \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$ |         | THQ   |       | 备注            |
|-------|---|---------|-------|-------|---------------|
|       | 成人                                      | 小孩      | 成人    | 小孩    |               |
| 鲚鱼(大) | 0.004 9                                 | 0.006 2 | 0.027 | 0.034 | 以鱼肉中汞初始浓度计算   |
| 多宝鱼   | 0.016 7                                 | 0.021 1 | 0.093 | 0.117 |               |
| 老虎斑   | 0.044 3                                 | 0.055 9 | 0.246 | 0.311 |               |
| 鲚鱼(大) | 0.003 1                                 | 0.003 9 | 0.017 | 0.022 | 以鱼肉中生物可给汞浓度计算 |
| 多宝鱼   | 0.010 8                                 | 0.013 6 | 0.060 | 0.076 |               |
| 老虎斑   | 0.035 1                                 | 0.044 3 | 0.195 | 0.246 |               |

以生物可给汞的浓度计算得到的每日汞摄入量均小于以鱼肉中汞的初始浓度计算得到的值。计算得到的 THQ 值小于 1。在广州,成人和小孩通过鲚鱼、多宝鱼和老虎斑每日摄入汞的量分别为 0.19~2.11  $\mu g/d$  和 0.13~1.44  $\mu g/d$ ,占 JEC-FA 规定的暂定每周可耐受摄入量(PTWI),1.3  $\mu g/kg$  的 1.9%~19.5% 和 1.2%~13.3%。因此,对于不同年龄的人群,汞在这 3 种鱼类中的

暴露风险都是安全的。

### 3 结论

针对广州市售的 3 种鱼中汞的生物可给性进行了研究,结果表明鱼肉中 62.36%~79.21% 的汞生物可给。并在生物可给浓度的基础上对每日摄入量和目标风险系数进行了计算。在广州,成人和小孩通过这 3 种鱼摄入汞最大量分别为 2.11

和  $1.44 \mu\text{g}/\text{d}$ , 占 JECFA 规定的暂定每周可耐受摄入量的 19.5% ~ 13.3% 因此, 汞在这 3 种鱼类中的暴露风险都是安全的。

文章只单独考察了 3 种鱼类总汞的摄入, 下一步应考察甲基汞的生物可给性, 综合其他食品中汞的生物可给性以及通过水、土壤等环境介质摄入的汞进行人体汞暴露风险评价。

## 参考文献

- [1] Choi A L, Grandjean P. Methylmercury exposure and health effects in humans[J]. *Environmental Chemistry* 2008, 5(2): 112 - 120.
- [2] 孔志明. 环境毒理学(第 2 版)[M]. 南京: 南京大学出版社, 2004.
- [3] Food and Agriculture Organization(FAO). The state of world fisheries and aquaculture opportunities and challenges[M]. Rome: Food and Agriculture Organization 2014.
- [4] Schmidt L, Bizzi C A, Duarte F A, et al. Evaluation of Hg species after culinary treatments of fish[J]. *Food Control* 2015, 47: 413 - 419.
- [5] Grandjean P, Budtz-Jørgensen E, Jørgensen P J, et al. Umbilical cord mercury concentration as biomarker of prenatal exposure to methylmercury[J]. *Environmental Health Perspectives* 2005, 113(7): 905 - 908.
- [6] Mergler D, Anderson H A, Chan L H, et al. Methylmercury exposure and health effects in humans: a worldwide concern[J]. *Ambio* 2007, 36(1): 3 - 11.
- [7] Liu J L, Xu X R, Yu S, et al. Mercury pollution in fish from South China Sea: Levels, species-specific accumulation, and possible sources[J]. *Environmental Research* 2014, 131: 160 - 164.
- [8] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GB 2762 - 2017 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国质检出版社, 2017.
- [9] Liu J L, Xu X R, Yu S, et al. Mercury contamination in fish and human hair from Hainan Island, South China Sea: Implication for human exposure[J]. *Environmental Research* 2014, 135: 42 - 47.
- [10] EFSA. Scientific opinion on the risk for public health related to the presence of mercury and methylmercury in food[EB/OL]. <http://www.efsa.europa.eu/it/efsajournal/pub/2985>.
- [11] 马文军, 邓峰, 许燕君, 等. 广东省居民膳食营养状况研究[J]. *华南预防医学* 2005, 1(01): 1 - 5.
- [12] 唐洪磊. 广东省沿海城市居民膳食结构及食物污染状况的调研——对持久性卤代烃和重金属的人体暴露水平评价[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2008.
- [13] 蔡文华, 胡曙光, 苏祖俭, 等. 2007 ~ 2014 广东省膳食中铅、镉、砷、汞元素的人群健康风险评估. *食品安全质量检测学报*[J] 2015, 6(6): 2308 - 2316.
- [14] 付瑾, 崔岩山. 食物中营养物质及污染物的生物可给性研究进展[J]. *生态毒理学报* 2011, 6(2): 113 - 120.
- [15] Wang H S, Xu W F, Chen Z J, et al. *In vitro* estimation of exposure of Hong Kong residents to mercury and methylmercury via consumption of market fishes[J]. *Journal of Hazardous Materials* 2013, 248 - 249: 387 - 393.
- [16] Shao D D, Wu S C, Liang P, et al. A human health risk assessment of mercury species in soil and food around compact fluorescent lamp factories in Zhejiang Province, PR China[J]. *Journal of Hazardous Materials* 2012, 221 - 222: 28 - 34.
- [17] Liang Peng, Feng Xinbin, Zhang Chan, et al. Human exposure to mercury in a compact fluorescent lamp manufacturing area: By food (rice and fish) consumption and occupational exposure[J]. *Environmental Pollution* 2015, 198: 126 - 132.
- [18] Afonso C, Costa S, Cardoso C, et al. Benefits and risks associated with consumption of raw, cooked, and canned tuna (*Thunnus* spp.) based on the bioaccessibility of selenium and methylmercury[J]. *Environmental Research* 2015, 143 (Pt B): 130 - 137.
- [19] Mieiro C L, Coelho J P, Dolbeth M, et al. Fish and mercury: Influence of fish fillet culinary practices on human risk[J]. *Food Control* 2016, 60: 575 - 581.
- [20] Calatayud M, Devesa V, Virseda J R, et al. Mercury and selenium in fish and shellfish: Occurrence, bioaccessibility and uptake by Caco-2 cells[J]. *Food and Chemical Toxicology* 2012, 50(8): 2696 - 2702.
- [21] Laird B D, Shade C, Gantner N, et al. Bioaccessibility of mercury from traditional northern country foods measured using an *in vitro* gastrointestinal model is independent of mercury concentration[J]. *Science of the Total Environment* 2009, 407(23): 6003 - 6008.
- [22] Moreda-Piñeiro J, Moreda-Piñeiro A, Romarís-Hortas V, et al. *In vivo* and *in vitro* testing to assess the bioaccessibility and the bioavailability of arsenic, selenium and mercury species in food samples[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 2011, 30(2): 324 - 345.
- [23] He M, Wang W X. Factors affecting the bioaccessibility of methylmercury in several marine fish species[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2011, 59(13): 7155 - 7162.
- [24] Klaue B, Blum J D. Trace analyses of arsenic in drinking water by inductively coupled plasma mass spectrometry: high resolution versus hydride generation[J]. *Analytical Chemistry* 1999, 71(7): 1408 - 1414.
- [25] 曹红斌. 化学物质健康风险评价的理论与应用[M]. 北京: 气象出版社, 2012.
- [26] FAO/WHO. Summary and conclusion by joint FAO/WHO expert committee on food additives, seventy-second meeting, Rome[R]. [EB/OL]. [2014-02-12]. [http://www.who.int/foodsafety/chem/summary72\\_rev.pdf](http://www.who.int/foodsafety/chem/summary72_rev.pdf)
- [27] 马文军. 2002 年广东省居民膳食营养与健康状况研究[M]. 广东: 广东人民出版社, 2004.