

汞污染及人体负荷研究进展*

陈 影 邵玉芳**

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州, 310058)

摘 要 汞污染是个全球性的问题,汞在一些厌氧微生物的作用下会生成毒性较大的甲基汞,对人体健康产生威胁.本文综述了汞污染以及人体负荷的一些研究进展,包括汞对人体的危害、生物学指标、普通人群甲基汞暴露的两条主要途径等.之前普遍认为食用鱼贝类等水产品是造成人体甲基汞暴露的主要途径,但最近有研究发现大米中甲基汞含量偏高,食用大米会造成潜在甲基汞暴露风险.目前大米甲基汞暴露研究大多集中在我国贵州地区,未来非常有必要在更多的地区开展大米中甲基汞水平的调查,评价大米中低剂量甲基汞长期暴露的风险,以保障大米的安全性.

关键词 甲基汞暴露,水产品,大米.

汞是全世界范围内污染最为普遍的重金属之一,汞污染在世界各地分布较广,自 19 世纪 50 年代日本九州水俣市附近地区爆发轰动世界的“水俣病”之后,美洲、欧洲、非洲都相继出现了汞污染问题^[1-4].汞具有持久性、易迁移性和高度的生物富集性等特点,且毒性很强,环境中任何形式的汞均可在一定条件下转化为甲基汞,在生物体内积累引发神经毒性^[5].汞污染很多是人为造成的,目前认为煤炭燃烧是汞污染的最主要来源.根据 2003 到 2006 年的数据统计,全球每年因煤炭燃烧排放到大气中的汞大约为 810 t,占了人为排放量的 35%.其次是小规模金矿开采,每年排放汞约 400 t^[6].另外,有色金属冶炼、水泥生产、氯碱制造、电子垃圾处理等行业在生产和工作过程中都会向环境排放大量的汞污染物^[7-9].也有一些汞污染是自然产生的,如火山活动、自然风化、土壤排放和植被释放等.

1 甲基汞对人体的危害

汞化合物进入人体的方式可分为由消化道吸收、经呼吸进入肺部吸收或直接经皮肤吸收 3 个途径.环境或农产品中的金属汞几乎不被吸收,无机汞吸收率低,而有机汞的消化吸收率最高,如甲基汞 90% 以上可被人体吸收^[10].甲基汞(MeHg)进入人体后,大部分蓄积在肝和肾中,并可通过血脑屏障进入脑干组织,分布于脑组织的甲基汞约占 15%^[10],脑组织受损害先于身体的其它组织器官,主要损害部位为大脑皮层、小脑和末梢神经.甲基汞的脂溶性很强,又易于与体内巯基结合,故易于扩散进入组织细胞中,除了在肝和肾中蓄积外,甲基汞还容易在头发中蓄积.甲基汞在体内的半衰期很长,大约 70—80 d^[11],以还原形式的谷胱甘肽复合物从肝脏细胞转移到胆汁,再经胆汁随粪便排出,排出时间很慢.

至今世界上汞的使用与扩散已多次造成人类及生物“伤害”,其中最严重的就是 20 世纪 50 年代在日本水俣湾发生的甲基汞中毒事件.甲基汞对人体的毒害作用包括神经毒性、肾脏毒性、心血管毒性、生殖毒性以及免疫系统毒性等.其中以神经毒性最为严重,影响人群包括成年人、儿童、婴儿和新生儿.症状包括:感觉末梢紊乱、视觉下降、运动失衡、语音困难、幻听和颤抖等^[12].甲基汞也会通过血脑屏障,从而影响胎儿的神经系统发育.产前暴露会对胎儿的中枢神经带来不可逆的损害,因为胎儿对甲基汞的毒性比成年人更敏感^[13].国外一些学者做了研究,得出了产前暴露量与婴儿 IQ 下降之间的剂量-效应关系. Budtz-Jorgensen 等^[14]认为孕妇头发中的甲基汞浓度增加一倍会使其孩子的 IQ 值下降 1.5 个百分点. Cohen 等^[15]得出的结论是孕妇头发中的甲基汞浓度每上升 1 mg·kg⁻¹,其孩子的 IQ 值平均会下降 0.7 个百分点.对于耐受性较强的成年人,世界卫生组织(WHO)估计血汞浓度达 200 μg·L⁻¹的成年人会有神经毒性反应^[11].

2012 年 3 月 14 日收稿.

* 国家公益性行业(农业)专项(200903009)资助.

** 通讯联系人, E-mail: shaoyf@zju.edu.cn

2 甲基汞暴露的生物学指标

检测人体甲基汞含量时,通常采集人群中头发或者血液样本^[11],血汞浓度和发汞含量是评价和衡量甲基汞暴露水平的主要手段和生物指标,常见的指标还有尿汞,但它主要用于检测人体中元素汞和无机汞,反映的是近期暴露。

2.1 头发

头发中的汞浓度与饮食中的汞暴露密切相关,并且头发样本的采集比较简单,不需要侵入人体。无机和有机汞都能在头发组织中存在,因此,根据头发中汞的甲基化程度以及发丝长度可以获得汞暴露持续时间以及属于何种暴露等信息^[16-17]。美国国家研究委员会(NRC)^[12]认为距离人体中心越远的组织样本就越能反映出长时间暴露的相关信息,包括暴露量大小以及最高暴露水平等。对于元素汞暴露量不是特别大的人群,检测出头发中的总汞量可以近似看作是甲基汞的暴露量^[12],这种估算不会造成太大的误差。理论上来说,头发样本的采集需要选择枕骨附近靠近头皮的发丝,采样工具是不锈钢剪刀。样本采集好之后放进聚丙烯袋子在室温下保存,在采集样本之前需要清洗头发以除去外来的污染物,保证检测结果的准确性^[18-20]。

2.2 血液

血汞水平表示的是近期暴露,它能同时反映元素汞和甲基汞暴露量。鱼类体内甲基汞的含量约占总汞含量的70%—90%^[21],如果一个群体食用较多鱼类等水产品,则其血汞中有很一部分属于有机的甲基汞,因此可以将血汞浓度作为该人群甲基汞暴露的一个衡量指标。但是伴有元素汞暴露的人群,其血液样本除了要检测总汞量外,还需要另外做甲基汞检测。WHO认为头发中的汞含量大约是血液中汞含量的250倍。这个倍数关系并不是固定的,会因为人群差异而发生变化,大致在140—370倍之间浮动^[13]。如果研究人群的发汞和血汞数据都可用的话,需要根据该人群具体情况使用这个关系倍数,得到汞暴露水平。如果上述数据缺失,则由血汞浓度估计发汞浓度时采用250这个值^[22]。

3 汞以及甲基汞的限量规定

GB 15618—1995^[23]根据土壤应用功能和保护目标,将土壤划分为3类:Ⅰ类主要适用于国家规定的自然保护区(原有背景重金属含量高的除外)、集中式生活饮用水源地、茶园、牧场和其它保护地区的土壤,土壤质量基本上保持自然背景水平;Ⅱ类主要适用于一般农田、蔬菜地、茶园、果园、牧场等土壤;Ⅲ类主要适用于林地土壤及污染物容量较大的高背景值土壤和矿产附近等地的农田土壤(蔬菜地除外)。而根据土壤中的汞的含量,可将土壤分成3个级别,一级、二级、三级土壤汞含量分别小于0.15、1.0和1.5 mg·kg⁻¹。其中Ⅰ类土壤环境质量执行一级标准;Ⅱ类土壤环境质量执行二级标准;Ⅲ类土壤环境质量执行三级标准。我国根据《中华人民共和国环境保护法》所制定的生活饮用水和农田灌溉水的水质标准,规定Hg含量不超过0.001 mg·L⁻¹。GB2762—2005^[24]对粮食(成品粮)、薯类、蔬菜、水果、鲜乳、肉、蛋(去壳)的总汞限量(MLs)做了规定,粮食的总汞(以Hg计,下同)不应超过0.02 mg·kg⁻¹,薯类、蔬菜、水果、鲜乳的总汞不应超过0.01 mg·kg⁻¹,肉、蛋(去壳)的总汞量不应超过0.05 mg·kg⁻¹。对非食肉鱼类以及其它水产品的甲基汞限量规定为0.5 mg·kg⁻¹,对食肉鱼类(如鲨鱼、金枪鱼等)的甲基汞限量规定为1.0 mg·kg⁻¹。FAO/WHO联合食品添加剂专家委员会(JECFA)规定甲基汞的暂定每周可耐受摄入量(PTWI)为1.6 μg·kg⁻¹体重,相当于每天0.23 μg·kg⁻¹体重,规定发汞浓度最大值为2 mg·kg⁻¹^[25]。美国环保署(USEPA)规定人体每日摄入甲基汞的参考剂量(RfD)为0.1 μg·kg⁻¹,发汞浓度最大限值为1 mg·kg⁻¹^[26]。澳大利亚规定孕妇汞每周可耐受摄入量为2.8 μg·kg⁻¹^[27],日本规定暂定甲基汞每日可耐受摄入量为0.48 μg·kg⁻¹^[28],不同的参考水平采用了不同的风险评估假设、数据集以及不确定因子。

4 甲基汞的主要暴露途径

甲基汞大部分都是在水体环境中产生,所以鱼贝类等水产品中甲基汞含量比较高,是人类甲基汞暴露的一个重要来源。另外,近年来也有一些研究表明水稻的根系对于甲基汞有很强的捕获能力,大米是我国居民的主食之一,因此评估以大米作为甲基汞暴露源的风险也非常必要。

4.1 鱼贝类等水产品甲基汞暴露

鱼类和贝类等水产品由于富含高品质蛋白和其它必需营养素而成为人类健康膳食必不可少的一部分。许多海鱼中含有丰富的不饱和脂肪酸,已经被证实对人类心脏有保护作用,并且对孩童的健康成长发育有益。然而,由于工业污染造成了汞及其化合物在水生生物中富集,给食用水产品带来了健康隐患。通常进入水域的汞是无机态,甲基汞是水底的微生物将无机汞甲基化的结果^[29]。甲基汞经过一系列生物放大过程,最后在生命周期长的肉食性鱼类的肌肉组织中积累,如淡水中的梭子鱼和海里的鲨鱼。有研究发现在无污染的海水里,食草的暗礁鱼肌肉组织中的甲基汞含量只有 $0.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而同样环境中的鲨鱼却高达 $4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[11]。

根据 FDA1990—2004、EPA 以及美国海洋渔业局的检测数据^[30-32],含汞水平最高的 4 种海产品分别是墨西哥湾的马头鱼、剑鱼、鲨鱼以及大王鲭,这些鱼体内的平均总汞含量都接近 $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (WHO 规定的限量),其中马头鱼的平均总汞含量达到 $1.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,凤尾鱼、鲱鱼、鲣鱼、海蟹等的含汞水平低一些,都在 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右。虽然没有得到甲基汞含量的数据,但是鱼肉组织中的汞主要以有机态的甲基汞为主,约占总汞含量的 70%—90%^[21],所以可从总汞含量中估计出甲基汞含量。亚马逊河流域地区自 20 世纪 80 年代开始金矿开采,采矿活动给当地的水域系统带来了严重的汞污染。Rabbito 等^[33]检测了亚马逊河流域一个水库中的鱼体内含汞水平。该水库没有直接受金矿开采影响,但结果却发现多雨期和干旱期水库中分别有 48.2% 和 33% 的样本甲基汞浓度超过 WHO 设定的安全值($0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。Soto-Jimenez 等^[34]分析了加尼福尼亚湾南部 17 种旗鱼与 13 种条纹四旗鱼体内的 Hg 浓度,发现其中 65%—90% 的样本汞含量超标。对于不同地区鱼类的汞含量,我国国内的学者也做了很多研究,通常淡水鱼中汞含量低于海鱼。王凤芳^[35]以上海地区出产的食用淡水鱼为试样,通过冷原子吸收光度法检测了鱼体中的汞含量,发现淡水鱼中总汞含量远低于国家规定的水产品汞限量标准($\leq 0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。而寇叙等^[36]对辽宁锦州地区 8 种市售海产品(黄花鱼、鲭鱼、鲅鱼、带鱼、海虾、扇贝、牡蛎、海蟹)进行的汞含量分析表明鲅鱼和扇贝体内汞含量平均值分别为 $0.577 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.597 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均超出了水产品中汞的限量标准。此外,张磊^[37]等检测了青岛地区 16 种鱼体内的总汞含量,发现两个采样点鱼体内的总汞含量呈现八带鱼、小黄花、沙丁鱼、鲣鱼大于鲫鱼、草鱼的趋势,进一步证实了底栖鱼类的总汞含量高于生活在水层中上部的鱼类,肉食性鱼类的汞含量高于杂食性和植食性鱼类的规律。

由于各地区环境、人群饮食习惯差异比较大,所以不同地区人群甲基汞暴露程度也不同。一般来说,海边食鱼性人群的暴露情况比较严重。非沿海地区的人群,如果居住地汞污染比较严重或者有消费甲基汞含量比较高的鱼类(如金枪鱼)的习惯,也存在甲基汞过量摄入的风险^[38-39]。一些学者做过不同国家和地区人体发汞(总汞)含量的调查,见表 1,由于鱼肉组织中的汞主要以有机态的甲基汞为主,所以食鱼人群头发中的总汞量可以近似看作是甲基汞的暴露量^[12]。通常汞污染河流或者海域附近居民体内的甲基汞负荷较重,如突尼斯加贝湾地区、日本 5 个地区以及我国第二松花江下游地区,这些地区部分人群发汞含量显著高于 USEPA 规定的限值 $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,可能存在潜在的健康风险。目前发现受鱼类中甲基汞毒害最大的群体是儿童和孕妇,甲基汞会通过产前暴露使胎儿的神经系统发育受损,产前暴露的指标一般用血汞表示。Miranda 等^[40]检测了美国卡罗莱纳州北部 Durham County 孕妇血液样本,发现有 30% 的孕妇血汞含量超过 $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,有 2% 的血汞浓度超过孕期限值 $3.5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。通过对这部分人群的饮食研究发现,她们的血汞水平高跟摄入大量鱼类有关,甲基汞的产期暴露可能影响到胎儿的脑部发育,导致新生儿智力下降。Gao 等^[41]研究了我国舟山地区孕妇产前汞暴露对婴儿神经发育的影响。发现产妇产发汞浓度与婴儿的脐带血汞浓度呈显著正相关,通过对新生儿神经行为学评估,认为产前汞暴露水平上升可能导致婴儿的行为能力下降。对于成年人的甲基汞暴露情况,目前大多数研究停留在检测血汞和发汞含量是否超过限量,如果超过限量,则认为存在相应的风险。也有一些学者做了鱼贝类等水产品中低剂量的甲基汞长期暴露对成年人的毒害研究,得出的结果差别很大^[42-46],目前还不能确定鱼贝类等水产品中低剂量的甲基汞暴露是否会危害成年人的健康。

鱼贝类等水产品中虽然可能含有较高的甲基汞,但另一方面,它们富含蛋白质以及多种不饱和脂肪酸,在膳食中加入一些水产品有助于人体健康以及儿童的智力发育,所以我们在给出水产品的参考摄入量时需要权衡利益与风险。美国食品药品监督管理局(FDA)和环保署(USEPA)认为食物链低端的鱼贝类

含有相对较低的甲基汞以及较高的 n-3 脂肪酸,因此建议孕妇、哺乳期妇女以及儿童在日常膳食中多摄入这部分水产品^[53].

表 1 部分食用水产品地区人群体内的汞负担水平

Table 1 The body burden of mercury in the population who consume aquatic products

国家或地区	样本数(个)	发汞浓度水平 /(mg·kg ⁻¹)	数据来源
美国路易斯安那州	398	0.81 ^b (0.02—10.7)	Lincoln R A (2011) ^[38]
加拿大安大略省	22	0.42 ^{a,f} (0.12—1.7)	Schoeman K, et al. (2010) ^[47]
欧洲	>200	1.2 ^b	WHO (1990) ^[22]
突尼斯加贝斯湾地区	55	6.5 ^b (1.3—14)	Mezghani-Chaari S A (2011) ^[48]
日本 5 个地区 Minamata Kumamoto Tottori Wakayama Chiba	3686	2.55 ^{a,m} 1.43 ^{a,f}	Yasutake A, et al. (2003) ^[49]
中国香港地区	200	3.3 ^b	Dickman M D, et al. (1998) ^[50]
中国沿海 5 城市 福建厦门 浙江舟山 浙江宁波 上海 辽宁大连	659	0.83 ^b	Liu X J (2008) ^[51]
中国第二松花江下游地区	360	0.030—116.634	张磊,等 (2008) ^[52]

注: a. 几何平均值; b. 算术平均值; m. 男性; f. 女性.

4.2 大米甲基汞暴露

大米是世界上产量第二大的谷物,仅次于小麦,年产量达 4.1×10^8 t. 亚洲地区大米产量最高,占全世界总产量的 90%. 全世界超过一半人口的主食是大米,它不但提供了人体 80% 的必需能量^[54],且人体中所需的很大一部分蛋白质和微量营养素都来自于大米^[55]. 通常汞在很多食物中的含量都低于 $0.020 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,并且主要以无机汞形式存在^[56]. 最近有报道发现中国贵州地区大米中甲基汞含量偏高,有些地区大米中甲基汞占到总汞含量的一半以上. 食用大米可能是人群甲基汞暴露的另一条重要途径^[57].

大米中甲基汞含量过高可能与含汞的污染水灌溉稻田有关. 在稻田中,水几乎存在于水稻生长的所有时期,毒性不大的无机汞在水生环境中容易被厌氧微生物转化为甲基汞^[58-59]. Yu 等^[60]研究了美国弗吉尼亚州河流沉积物中甲基汞转化机制,利用基因鉴定技术,发现沉积物中硫酸盐还原细菌(SRB)以及铁还原细菌(IRB)活性较强. 两类细菌通过将土壤中的某些无机盐离子还原使 Hg^{2+} 甲基化,见图 1. 而在水稻田中,有研究已经证实硫酸盐细菌是最主要的甲基汞转化者^[61-62]. 水稻田中影响汞甲基化的因素比较多,Frohne 等^[63]发现湿地土壤中溶解性有机碳(DOC)含量是促进汞甲基化的一个重要因素,MeHg(甲基汞)/Hg 与 DOC/总 Hg 之间存在非常显著的相关关系, E_{H} (氧化还原电势)、pH 值、 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 以及 Cl^{-} 等在汞的甲基化过程中发挥较弱的作用. Graham 等^[64]研究了土壤溶解性有机质(DOM)对于汞甲基化的促进机制,发现聚合形态的 $\beta\text{-HgS}$ 不容易被微生物转化为甲基汞,而 DOM 能抑制 $\beta\text{-HgS}$ 的聚合,使得多数 $\beta\text{-HgS}$ 能以纳米颗粒的形态存在,从而能被微生物转化利用. 水稻根系吸收甲基汞,通过转移在水稻植株的不同部位分布,Zhang 等^[65]发现甲基汞在水稻植株中的分布依次为:稻米 > 根系 > 谷壳 > 茎 > 叶,Meng 等^[66]的研究也证实了这一点,相对于水稻的其它组织,稻米对甲基汞有更强的富集能力. Qiu 等^[67]调查了山西省汞矿区大米甲基汞污染程度,发现精米和谷壳中甲基汞的含量分别为 $78 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $30 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碾米过程能去掉谷粒中近一半的甲基汞. 甲基汞在肉食性鱼类中的生物积聚因子(BAFs)约为 10^6 ,水稻中 BAFs 可能在 0.71 到 50 之间^[65],虽然水稻中的积聚水平比较低,但对于以大米为主食的人群来说,大米中甲基汞含量上升可能比鱼贝类甲基汞暴露更严重.

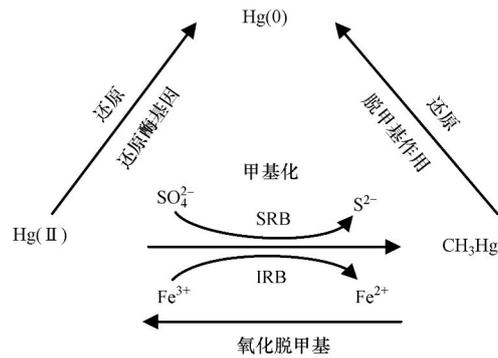


图 1 不同形态汞的转化关系图

Fig. 1 The conversion of different forms of mercury

目前大米中甲基汞污染的研究大多集中在贵州等汞污染严重地区,见表 2. 全国各地针对大米中甲基汞含量的研究相对较少,国内大多数研究都停留在对大米总汞 (THg) 含量的监测上面^[68-70], GB2762—2005^[24]也只对粮食中的总汞含量作了规定 (THg $\leq 20 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$),没有粮食中甲基汞含量的相关规定.

表 2 贵州部分汞矿地区大米中甲基汞含量

Table 2 Methylmercury concentration in rice from some Hg mining areas in Guizhou Province

地区	样本数/个	MeHg/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	(MeHg/THg)/% ^c	数据来源	
贵州万山地区	重污染区	59	11.3 ^a	17.3 ^a	Zhang H, et al. (2010) ^[65]
	轻污染区		5.8 ^a	20.8 ^a	
	对照区		4.7 ^a	18.3 ^a	
贵州 4 个地区	万山	—	9.3 ^a	11.9 ^a	Zhang H, et al. (2010) ^[71]
	清镇		2.2 ^a	40.0 ^a	
	威宁		1.6 ^a	69.6 ^a	
	雷公		2.1 ^a	65.6 ^a	
贵州万山 5 个矿区	70	1.61—174.0 ^b	1.4—93.0 ^b	Qiu G L, et al. (2008) ^[72]	
贵州万山 3 个村庄	70	1.9—27.6 ^b	17.4 ^a	李平,等. (2011) ^[73]	
务川	—	7.8 ^a	40.2 ^a	Li P, et al. (2008) ^[74]	

注: a. 算术平均值; b. 最小值—最大值; c. THg 总汞.

根据表 2 所示, MeHg/THg 比值大多在 11% 到 70% 之间,按照这个比例计算,贵州汞矿地区相当一部分大米总汞含量超标. 根据我国平均膳食消费结构,中国人均年消费稻麦等谷类粮食 206 kg,假设谷物均为大米,得出我国成人每天消费大米约 0.564 kg^[68]. 贵州地区经济发展比较落后,当地居民的膳食中以自产粮为主,因此米饭的消费量略高于其它地区,估计成人每日大米消费量为 600 g. 假设成人体重以 60 kg 计,根据表 2 大米甲基汞含量数据,可以计算得到当地人群甲基汞日暴露量最高可达 1.8 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,远高于 JECFA 的推荐值每天 0.23 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 贵州处于内陆地区,当地居民鱼类摄入量较少,所以大米摄入是当地居民甲基汞暴露的最主要途径,有学者估计大米甲基汞暴露约占总暴露量的 94%—98%^[57]. 对当地人群发汞含量的研究数据也确证了这一结论. Li 等^[75]检测了万山采矿地区 DSX 和 XCX 居民头发中甲基汞含量,发现两个地区居民头发中甲基汞含量分别是 (1.9 \pm 0.9) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 (1.2 \pm 0.5) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,这个水平高于 USEPA 的推荐剂量 (THg $\leq 1 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Feng 等^[57]发现万山汞矿地区 DSX、XCX 和 BX 地区居民头发中的甲基汞平均含量分别是 0.8、0.6 及 0.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,明显高于对照组,这 3 个地方距离汞矿依次渐远,说明距离矿源越近,污染越大,居民甲基汞暴露风险越高. 贵州汞矿地区居民体内的甲基汞负荷几乎与我国沿海食鱼人群相当,大米作为甲基汞暴露的另一重要途径,其危害不可小视.

5 结论

汞污染是一个全球性问题,汞污染进入土壤、水体,在厌氧细菌的作用下形成甲基汞,对人体健康产生威胁。甲基汞的主要作用靶点是神经系统,胎儿、儿童、孕妇等是甲基汞暴露的敏感人群。人们通常认为水产品摄入是人体甲基汞暴露的主要来源,但是水产品含有丰富的蛋白质及人体必需的长链多不饱和脂肪酸,所以在制定水产品的参考摄入量时需要权衡利弊。近年来,有研究表明大米对甲基汞具有很强的捕获能力,尤其是在内陆汞矿开采地区,大米中甲基汞占了总汞含量的一半以上。大米是世界上超过一半人口的主食,长期食用汞污染大米会导致严重的甲基汞暴露风险。目前国内的大部分研究还停留在大米中总汞含量的检测,对大米中甲基汞含量的研究大多集中在贵州汞矿地区,食用大米造成的甲基汞负荷风险评价方面的研究还不多。未来非常有必要在更多的地区开展大米中甲基汞水平的调查,以评价大米中低剂量甲基汞长期暴露对人群健康造成的风险。

参 考 文 献

- [1] Anonymous. Mercury stirs more pollution concern[J]. Chemical & Engineering News, 1970, 48(26): 36-37
- [2] Aberg B. Mercury problem in Sweden today. 2. Preventive measures[J]. Nordisk medicin, 1968, 79(8): 258-258
- [3] Lisitzin P. On steps taken by the authorities in Finland to avert the hazards to man due to the amounts of mercury detected in nature[J]. Nordisk hygienisk tidskrift, 1969, 50(2): 190-192
- [4] Letcher T M. Mercury pollution-Effect of covering mercury with water and other liquids[J]. South African Journal of Science, 1979, 75(2): 80-81
- [5] 胡月红. 国内外汞污染分布状况研究综述[J]. 环境保护科学. 2008, 34(1): 38-41
- [6] Pirrone N, Cinnirella S, Feng X, et al. Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources[J]. Atmos Chem Phys, 2010(10): 5951-5964
- [7] 李平, 冯新斌, 仇广乐. 贵州省务川汞矿区汞污染的初步研究[J]. 环境化学, 2008, 27(1): 96-99
- [8] Hylander L D. Global mercury pollution and its expected decrease after a mercury trade ban[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2001, 25(1): 331-344
- [9] 于敏, 牛晓军, 魏玉芹, 等. 电子垃圾拆卸区域重金属污染的空间分布特征[J]. 环境化学, 2010, 29(3): 553-554
- [10] 滕葳, 柳琪, 李倩, 等. 重金属污染对农产品的危害与风险评估[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010, 9: 35
- [11] Li P, Feng X B, Qiu G L. Methylmercury exposure and health effects from rice and fish consumption: A review[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2010, 7(6): 2666-2691
- [12] National Research Council. Toxicological effects of methylmercury[R]. Washington, DC: National Research Council, 2000
- [13] WHO/IPCS. Safety Evaluation of Certain Food Additives and Contaminants, Geneva: Sixty-first meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives[R]. WHO Food Additives Series, No. 52, 2004
- [14] Budtz-Jorgensen E, Debes F, Weihe P, et al. Adverse mercury effects in 7 year-old children as expressed as loss in "IQ." Odense: University of Southern Denmark, 2004
- [15] Cohen J T, Bellinger D C, Shaywitz B A. A quantitative analysis of prenatal methylmercury exposure and cognitive development[J]. Am J Prev Med, 2005, 29: 353-365
- [16] Phelps R W, Clarkson T W, Kershaw T G, et al. Interrelationships of blood and hair mercury concentrations in a north American population exposed to methylmercury[J]. Arch Environ Health, 1980, 35: 161-168
- [17] USEPA. Volume IV: An Assessment of Exposure to Mercury in the United States. Mercury Study. Report to Congress[R]. 1997
- [18] UNEP, WHO, IAEA. The determination of methylmercury, total mercury and total selenium in human hair//Reference Methods for Marine Pollution Studies[R]. 1987
- [19] Bos A J, van der Stap C C, Valkovic V, et al. Incorporation routes of elements into human hair, implications for hair analysis used for monitoring[J]. Sci Total Environ, 1985, 42: 157-169
- [20] Kijewski H. The Forensic Impact of the Concentration of Mineral Nutrients in Human Scalp Hair[R]. Lübeck: Verlag Schmidt-Römhild, 1993
- [21] Xue F, Holzman C, Rahbar M H, et al. Maternal fish consumption, mercury levels, and risk of preterm delivery[J]. Environ Health Perspect, 2007, 115(1): 42-47
- [22] WHO. Methylmercury, Environmental Health Criteria 101 Geneva[R]. Switzerland, 1990
- [23] GB15618—1995. 土壤环境质量标准[S]. 1995
- [24] GB2762—2005. 食品中污染物限量[S]. 2005
- [25] JECFA. Summary and Conclusions of the Sixty-First Meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives[R]. Rome, Italy, 2003
- [26] USEPA. Mercury Study Report to the Congress, Volume V: Health Effects of Mercury and Mercury Compounds[R]. Washington, DC, USA, 1997

- [27] 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): 77-81
- [28] Yasutake A, Matsumoto M, Yamaguchi M, et al. Current hair mercury levels in Japanese for estimation of methylmercury exposure[J]. *Neurotoxicology*, 2004, 25(4): 711-712
- [29] Gaskill C. Veterinary toxicology basic and clinical principles[J]. *Can Vet J*, 2008, 49(6): 591
- [30] FDA. National Marine Fisheries Service Survey of Trace Elements in the Fishery Resource[R]. 1990—2004
- [31] NMFS. National Marine Fisheries Service Survey of Trace Elements in the Fishery Resource Report[R]. 1978
- [32] USEPA. The Occurrence of Mercury in the Fishery Resources of the Gulf of Mexico[R]. 2000
- [33] Rabitto I D, Bastos W R, Almeida R, et al. Mercury and DDT exposure risk to fish-eating human populations in Amazon[J]. *Environment International*, 2011, 37(1): 56-65
- [34] Strom S, Helmfriid I, Glynn A, et al. Nutritional and toxicological aspects of seafood consumption-An integrated exposure and risk assessment of methylmercury and polyunsaturated fatty acids[J]. *Environmental Research*, 2011, 111(2): 274-280
- [35] 王凤芳. 淡水鱼中汞含量的分析测定[J]. 食品工业, 2007, (4): 50-52
- [36] 寇叙, 董强, 刘秀萍, 等. 锦州地区部分海产品中汞含量检测[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(14): 7576-7579
- [37] 张磊. 青岛市水产品汞污染初步研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(3): 293-296
- [38] Lincoln R A, Shine J P, Chesney E J, et al. Fish consumption and mercury exposure among Louisiana Recreational Anglers[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2011, 119(2): 245-251
- [39] Holloman E L, Newman M C. A community-based assessment of seafood consumption along the lower James River, Virginia, USA: Potential sources of dietary mercury exposure[J]. *Environmental Research*, 2010, 110(3): 213-219
- [40] Miranda M L, Edwards S, Maxson P J. Mercury levels in an urban pregnant population in Durham County, North Carolina[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2011(8): 698-712
- [41] Gao Y, Yan C H, Tian Y, et al. Prenatal exposure to mercury and neurobehavioral development of neonates in Zhoushan City, China[J]. *Environmental Research*, 2007, 105(3): 390-399
- [42] Auger N, Kofman O, Kosatsky T, et al. Low-level methylmercury exposure as a risk factor for neurologic abnormalities in adults[J]. *Neurotoxicology*, 2005, 26: 149-157
- [43] Johansson N, Basun H, Winblad B, et al. Relationship between mercury concentration in blood, cognitive performance, and blood pressure, in an elderly urban population[J]. *Biometals*, 2002(15): 189-195
- [44] Lebel J, Mergler D, Branches F, et al. Neurotoxic effects of low-level methylmercury contamination in the Amazonian Basin[J]. *Environ Res*, 1998(79): 20-32
- [45] Yokoo E M, Valente J G, Grattan L, et al. Low level methylmercury exposure affects neuropsychological function in adults[J]. *Environ Health*, 2003, 2: 8
- [46] Weil M, Bressler J, Parsons P, et al. Blood mercury levels and neurobehavioural function[J]. *JAMA*, 2005, 293: 1875-1882
- [47] Schoeman K, Tanaka T, Bend J R. Hair mercury levels of women of reproductive age in Ontario, Canada: Implications to fetal safety and fish consumption[J]. *Journal of Pediatrics*, 2010, 157(1): 127-131
- [48] Mezghani-Chaari S, Hamza A, Hamza-Chaffai A. Mercury contamination in human hair and some marine species from Sfax coasts of Tunisia: levels and risk assessment[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 180(1/4): 477-487
- [49] Yasutake A, Matsumoto M, Yamaguchi M, et al. Current hair mercury levels in Japanese: Survey in five districts[J]. *Tohoku Journal of Experimental Medicine*, 2003, 199(3): 161-169
- [50] Dickman M D, Leung K. Mercury and organochlorine exposure from fish consumption in Hong Kong[J]. *Chemosphere*, 1998, 37(5): 991-1015
- [51] Liu X J, Cheng J P, Song Y L, et al. Mercury concentration in hair samples from Chinese people in coastal cities[J]. *Journal of Environmental Science -China*, 2008, 20(10): 1258-1262
- [52] 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
- [53] FDA. What You Need to Know About Mercury in Fish and Shellfish (Brochure)[R]. 2004
- [54] Tetens I, Hels O, Khan N L, et al. Rice based diets in rural Bangladesh: How do different age and sex groups adapt to seasonal changes in energy intake[J]. *Am J Clin Nutr*, 2003, 78: 406-413
- [55] Hels O, Hassan N, Tetens I, et al. Food consumption, energy, and nutrient intake and nutritional status in rural Bangladesh: Changes from 1981-1982 to 1995-1996[J]. *Eur J Clin Nutr*, 2003, 57: 586-594
- [56] WHO. International Programme on Chemical Safety; Environmental Health Criteria 118-Inorganic Mercury[R]. Geneva, 1991
- [57] Feng X B, Li P, Qiu G L. Human exposure to methylmercury through rice intake in mercury mining areas, Guizhou Province, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(1): 326-332
- [58] Benoit J M, Gilmour, C C, Heyes A, et al. Geochemical and biological controls over MeHg production and degradation in aquatic systems//Cai Y, Braids O C. Biochemistry of environmentally important trace elements[J]. American Chemical Society, Washington, DC, 2003: 262-297
- [59] Barrett J R. Rice is a significant source of methylmercury research in China assesses exposures[J]. *Environmental Health Perspectives*[J]. 2010, 118(9): 398
- [60] Yu R Q, Flanders J R, Mack E E, et al. Contribution of coexisting sulfate and iron reducing bacteria to methylmercury production in

- Fresh-water river sediments[J]. *Environmental Science Technology*, 2012, 46: 2684-2691
- [61] Wind T, Conrad R. Sulfur compounds, potential turnover of sulfate and thiosulfate, and numbers of sulfate-reducing bacteria in planted and unplanted paddy soil[J]. *FEMS Microbiol Ecol*, 1995, 18 (4): 257-266
- [62] Stubner S, Wind T, Conrad R. Sulfur oxidation in rice field soil: Activity, enumeration, isolation and characterization of thiosulfate-oxidizing bacteria[J]. *Syst Appl Microbiol*, 1998, 21(4): 569-578
- [63] Frohne T, Rinklebe J, Langer U, et al. Biogeochemical factors affecting mercury methylation rate in two contaminated floodplain soils[J]. *Biogeosciences*, 2012(9):493-507
- [64] Graham, A M, Aiken G R, Gilmour C C. Dissolved organic matter enhances microbial mercury methylation under sulfidic conditions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(5): 2715-2723
- [65] Zhang H, Feng X B, Larssen T, et al. Bioaccumulation of methylmercury *versus* inorganic mercury in rice (*Oryza sativa* L.) Grain[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(12): 4499-4504
- [66] Meng B, Feng X B, Qiu G L, et al. Distribution patterns of inorganic mercury and methylmercury in tissues of rice (*Oryza sativa* L.) plants and possible bioaccumulation pathways[J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 2010, 58: 4951-4958
- [67] Qiu G L, Feng X B, Meng B. Methylmercury in rice (*Oryza sativa* L.) grown from the Xunyang Hg mining province, northwestern China [J]. *Pure Appl Chem*, 2012, 84(2): 281-289
- [68] 常建军. 西宁市售大米汞、砷污染状况及健康风险评价[J]. *江苏农业科学*, 2010(3): 390-391
- [69] 许遥. 安徽省市售大米铅、镉、汞污染状况及健康风险评价[J]. *江西食品工业*, 2011(3):32-33
- [70] 庞洁, 施向东, 李必斌, 等. 南宁市主要食品中重金属污染状况的调查[J]. *中国卫生检验杂志*, 2011, 21(9): 2305-2306
- [71] Zhang H, Feng X B, Larssen T, et al. In inland China, rice, rather than fish, is the major pathway for methylmercury exposure[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2010, 118(9): 1183-1188
- [72] Qiu G L, Feng X B, Li P, et al. Methylmercury accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) grown at abandoned mercury mines in Guizhou, China[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008,56: 2465-2468
- [73] 李平, 冯新斌, 仇广乐, 等. 贵州汞矿区居民食用大米的甲基汞暴露及健康风险评价[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(5): 914-921
- [74] Li P, Feng X B, Qiu G L, et al. Mercury exposure in the population from Wuchuan mercury mining area, Guizhou, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 395(2/3): 72-79
- [75] Li P, Feng X B, Qiu G L, et al. Human hair mercury levels in the Wanshan mercury mining area, Guizhou Province, China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2009, 31(6): 683-691

A review of mercury pollution and human health burden

CHEN Ying SHAO Yufang*

(School of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou, 310058, China)

ABSTRACT

The mercury pollution is a global problem. Mercury can be transformed into methylmercury (MeHg) by anaerobic microorganisms in aquatic systems, which is highly toxic and has caused adverse health effect on human. This article reviews the progress in the research on the health effect, the biomarkers and two major pathways of MeHg exposure. Aquatic products consumption is generally considered the primary pathway of MeHg exposure for most people around the world. However, recent studies have reported elevated levels of MeHg in rice and confirmed the potential risk of MeHg exposure to residents in mercury polluted regions. Given that the research of MeHg exposure has been mostly conducted in Guizhou, China, further investigation of MeHg levels in rice in less polluted areas is critical. More emphasis should be given to assessing the health effects of low level MeHg exposure in the long term to ensure the safety of rice-eating population.

Keywords: methylmercury exposure, aquatic products, rice.