

舟山地区海产品汞含量及居民汞暴露风险

赵宇航^{1,2} 陈敏³ 涂瑞³ 杨爱江^{1,4} 李平^{2*}

(¹贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; ²中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

³贵州医科大学公共卫生学院, 贵阳 550025; ⁴贵州大学环境工程规划设计研究院, 贵阳 550025)

摘要 为评估舟山地区居民的汞暴露水平及暴露来源,对舟山地区市售海产品和居民头发汞含量进行采样分析。海产品样品采集自舟山市定海区和普陀区菜场,随机购买 22 种共 150 份样品。舟山地区海产品的总汞含量(湿重)范围为 3.73~789 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值为 43.9 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;海产品的总汞含量总体较低,均未超过我国水产品食用安全标准。不同类别的海产品汞含量差异显著,而且鱼体汞含量与其体长和体重具有显著相关性。采集舟山普陀区、定海区居民头发样品 136 份,其总汞含量范围为 0.13~8.18 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值为 1.77 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,84.6% 的发汞超过美国环保署限值 1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,7.4% 超过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限值 2.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。居民发汞含量有随年龄增长的趋势,而且男性居民发汞含量显著高于女性。上述结果表明,舟山地区海产品汞含量水平总体较低,但由于当地居民海产品的大量摄入,部分居民仍面临汞暴露的健康风险。

关键词 舟山; 头发; 鱼肉; 汞暴露

Mercury concentrations in seafood and health risks of human mercury exposure in Zhoushan area. ZHAO Yu-hang^{1,2}, CHEN Min³, TU Rui³, YANG Ai-jiang^{1,4}, LI Ping^{2*} (¹College of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; ²State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; ³School of Public Health, Guizhou Medical University, Guiyang 550025, China; ⁴Institute of Environmental Engineering Planning and Design, Guizhou University, Guiyang 550025, China).

Abstract: To assess level of human mercury exposure in Zhoushan area, the total mercury (THg) concentrations in 150 samples of seafood and 136 human hair samples were analyzed. THg concentrations in the seafood ranged 3.73–789 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in wet weight with an average of 43.9 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, which was lower than the national limit of China. There were significant differences of THg concentrations among different species in the seafood. Fish THg concentration was correlated with the body length and weight. The THg concentrations in human hair samples ranged 0.13–8.18 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ with an average of 1.77 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. There was 84.6% of population with hair THg concentrations higher than 1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ set by USEPA, and 7.4% higher than 2.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ set by the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Hair THg concentrations showed an increasing trend with the age of studied population and males showed significantly higher hair THg concentrations than females. The results suggested that THg concentrations in the seafood in Zhoushan area were relatively low, but local residents still might have health risk of mercury exposure because of large consumption of seafood.

Key words: Zhoushan; human hair; fish; mercury exposure.

汞是一种全球性污染物,可以随着大气进行长距离传输,并通过大气沉降等途径进入自然生态系

统,造成全球生态系统的汞污染(冯新斌等,2009)。排放至环境中的无机汞可以通过微生物的甲基化作用转化为毒性更强的甲基汞,并在水生食物链生物富集。而甲基汞具有脂溶性,易于穿透生物膜,可在

国家自然科学基金项目(41573132)资助。

收稿日期: 2016-12-29 接受日期: 2017-02-18

* 通讯作者 E-mail: ping_ligyig@163.com

生物体中积累,从而损伤人体的神经系统、心血管及肾脏(Tchouwou *et al.* 2012)。为控制和减少全球的环境汞污染,联合国环境规划署通过了国际公约《水俣公约》,而我国于2013年10月作为首批签约国已经签署《水俣公约》。

一般人群甲基汞暴露的主要途径是食用鱼类及其他水产品(NRC 2000)。鱼类含有的大量优质动物蛋白,是人类维持机体健康的重要营养素,是智力发育的必需品。20世纪50年代日本的“水俣病事件”、70年代我国第二松花江“渔民汞中毒”等污染事件的出现,使得居民对水产品的消费所带来的汞暴露成为研究者和公众关注的焦点问题(Shang *et al.* 2010)。人群的甲基汞暴露水平可以通过人体的血液和头发的汞含量来进行评价,而头发样品由于其化学组分稳定、汞含量相对较高、易采集和便于保存的特点,是表征人体甲基汞暴露的理想标志物(Li *et al.* 2011)。

舟山市位于我国长江口南部,是中国最大的海产品生产、加工和销售基地,其水产品年产量达到176万t(浙江省统计局 2015)。居民膳食结构调查表明舟山居民饮食消费以海产品为主且食用量较大(陈瑜等 2010),为了解舟山市区普通居民的汞暴露水平,本研究系统采集舟山市场售卖的常见海产品和居民头发样品并进行汞含量分析,以评价舟山地区居民可能面临的汞暴露风险。

1 材料与方法

1.1 样品的收集与处理

海产品样品采集自定海区的东河菜场和普陀区的南珍菜场,这两个菜场均为当地两区最大和最具代表性的菜场。在菜场不同售点随机购买常见的25种海产品,样品采集后置冰袋冷鲜保存。带至实验室,测量体长,称量体重。鱼类样品用不锈钢刀片刮去鳞片,然后用蒸馏水冲洗干净并除去鱼皮,用刀片沿着鱼侧线切开取可食用背部肌肉组织。非鱼类样品解剖除去外壳,取其可食用软组织或肌肉组织作为分析样品。为了保证样品的均匀性,样品于 -80°C 下冷冻干燥,研磨过100目筛装入干净聚乙烯自封袋中保存。

头发样品采集自舟山定海区和普陀区的5个地点,采集及保存方法采用美国EPA-7473规定的方法。用清洁的不锈钢剪刀取后枕部距头皮3cm的1~2g样品,装入纸袋后置于聚乙烯自封袋保存。

头发样品经洗洁剂超声波清洗、超纯水清洗和丙酮冲洗,置于阴凉通风处晾干后粉碎保存备用(Li *et al.* 2011)。

1.2 汞含量分析及质量控制

准确称取适量的鱼肉样品,置于25mL硼硅玻璃比色管中,加入5mL工艺超纯浓 HNO_3 ,比色管口放上干净的玻璃球,然后水浴 95°C 加热消解约3h,消解澄清定容。采用 SnCl_2 还原、金管富集、冷原子荧光法(Tekran 2500测汞仪,加拿大)测定总汞含量(闫海鱼等,2005)。头发样品总汞采用LUMEX测汞仪(RA-915+塞曼效应汞分析仪和配套PYRO-915热解装置,俄罗斯)热解法直接测定(王翠萍等,2010)。

采用空白试验、标准物质和平行试验对数据质量进行严格的控制。冷原子荧光法测定鱼样总汞的最低检测限为 $0.013\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,LUMEX测汞仪测定发汞的最低检测限为 $0.5\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。采用鱼样标准参考物质(NRC-TORT2)和人发标准物质(IAEA-086)进行质量控制;鱼样标准参考物质的回收率为96%~108%,人发标准物质的回收率为91%~106%。鱼样和头发样品平行测定的相对标准偏差分别为4.7%和3.8%。

1.3 统计分析

数据均采用SPSS 22.0进行统计分析。数据表示为平均值±标准偏差(SD)。数据的正态分布利用非参数Kolmogorov-Smirnov检验,变量间差异性采用Mann-Whitney检验,利用Spearman相关系数检验变量之间的相关性。分析过程中显著性水平设为0.05。

2 结果与分析

2.1 海产品总汞含量分布

本研究中收集到的海产品共22种,共计150份样品。22种海产品的总汞含量如表1所示,海产品总汞含量的频数分布如图1所示。舟山市市售海产品的总汞含量(湿重)均值为 $43.9\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,中值为 $26.6\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,含量范围为 $3.73\sim 789\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与我国食品安全国家标准(GB 2762—2012)中所规定的限值(非肉食性鱼类 $500\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,肉食性鱼类 $1000\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)相比,舟山市场采集的市售海产品均未超过我国水产品食用安全标准。

2.2 人发总汞含量分布

采集舟山地区普通居民头发样品136份,收集

表 1 舟山地区不同种类海产品的总汞含量分布 ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 湿重)Table 1 THg concentrations in seafood collected in Zhoushan area ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, wet weight)

种类	名称	拉丁名	数量	中值	均值	范围	
鱼类	大黄鱼	<i>Johnius dussumeri</i>	12	27	27	22~35	
	小黄鱼	<i>Pseudosciaena polyactis</i>	16	29	29	14~79	
	带鱼	<i>Trichiurus lepturus</i>	13	39	51	20~145	
	海鳗	<i>Muraenesox cinereus</i>	6	116	152	20~456	
	蓝点马鲛鱼	<i>Scomberomorus niphonius</i>	4	21	18	7.7~24	
	鲷鱼	<i>llisha elongata</i>	8	48	44	22~66	
	花鲈	<i>Lateolabrax maculatus</i>	8	12	18	7.6~35	
	银鲳	<i>Pampus argenteus</i>	14	11	13	3.7~28	
	褐菖鲈	<i>Sebastes marmoratus</i>	9	33	39	23~120	
	带纹条鲷	<i>Zebrias zebra</i>	4	11	11	7.4~15	
	黄鲛鲷	<i>Lophius litulon</i>	5	29	31	20~55	
	龙头鱼	<i>Harpodon nehereus</i>	6	9.1	8.9	6.1~10	
	黄鳍马面鲀	<i>Thamnaconus hypargyreus</i>	8	29	30	15~48	
	灰鲭鲨	<i>Isurus oxyrinchus</i>	3	360	439	169~789	
	凤鲚	<i>Coilia mystus</i>	6	15	15	10~23	
	虾类	口虾蛄	<i>Oratosquilla oratoria</i>	2	26	26	26~26
		哈氏仿对虾	<i>Parapenaeopsis hardwickii</i>	3	33	33	30~35
中华管鞭虾		<i>Solenocera crassicornis</i>	3	14	14	11~16	
软体类	太平洋褶柔鱼	<i>Todarodes pacificus</i>	4	88	94	71~128	
	日本枪乌贼	<i>Loligo japonica</i>	8	33	33	12~59	
	短蛸	<i>Octopusocellatus</i>	4	19	19	15~22	
	金乌贼	<i>Sepiaesculenta</i>	4	52	59	37~93	
合计		150	26	43	3.7~789		

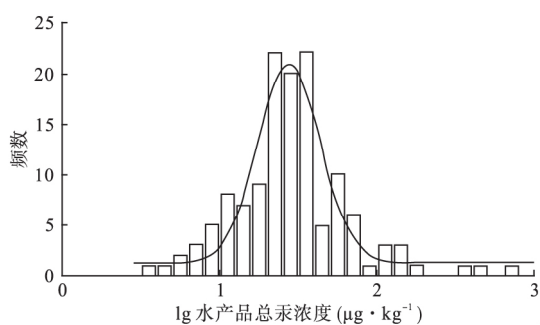


图 1 海产品总汞含量频率分布

Fig.1 Frequency distribution of THg concentrations in the seafood

有效调查问卷 136 份, 调查对象的基本统计信息如

表 2 调查对象的基本信息

Table 2 Basic information of the study population

年龄	男	女	平均身高 (cm)	平均体重 (kg)	吸烟	饮酒	使用美白产品	染发	补牙
6~18	6	4	145	53.5	0	0	0	0	1
19~44	10	13	164	62.8	0	1	6	2	1
45~59	26	20	166	65.5	6	11	4	3	2
≥60	30	27	163	64.3	8	13	1	2	3
合计	72	64	163	63.7	14	25	11	7	7

表 2 所示。在所有的调查对象中, 男性 72 人, 占 53%, 女性 64 人, 占 47%。平均年龄为 52 岁, 平均身高为 163 cm, 平均体重为 63.7 kg。头发样品总汞含量的中值为 $1.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $1.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 浓度范围为 $0.13 \sim 8.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与美国环境保护署 (EPA) 的发汞参考值 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 相比, 有 84.6% 的调查对象发汞含量超出该限值 (USEPA, 1997); 与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) 提出的 $2.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 限值相比, 有 10 人发汞含量超出该限值, 超出比例为 7.4% (JECFA 2003)。

表3 不同地区水产品汞含量的对比

Table 3 Comparison of aquatic product mercury levels in different areas

国家	地区	数量	平均值 ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	范围 ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	参考文献
中国	广东	518	37.2	0.1~317	Li <i>et al.</i> 2013
	青岛	102	96	49~157	张磊 2009
	海南	96	94	8~293	Liu <i>et al.</i> 2014
	湖南	73	35	3~243	Fu <i>et al.</i> 2010
	北京	32	18.9	1~78	孙瑾等 2006
	吉林	56	18.8	1~54	Zhu <i>et al.</i> 2012
	舟山	150	43.9	4~789	本研究
日本	Tokyo	360	494	10~5250	Nagakawa <i>et al.</i> 1997
加拿大	Ontario	851	670	-	Kinghorn <i>et al.</i> 2007
西班牙	Catalunya	-	97	-	Llobet <i>et al.</i> 2003

3 讨论

3.1 海产品总汞含量

3.1.1 海产品总汞含量水平 舟山地区海产品的汞含量与国内外其他地区研究结果的对比如表3所示。舟山地区鱼汞含量高于我国部分内陆城市,与国内一些沿海城市相比差别不大。这可能是因为海洋鱼类较淡水鱼类具有完整的海洋食物链和较长的生长周期(Wang *et al.* 2013),富集了环境中更多的重金属。对比国外的水产品汞含量研究可见,舟山地区海产品汞含量低于日本、加拿大、西班牙等国家,这与不同国家的市售水产品种类和鱼类生存环境的污染程度有关。

3.1.2 海产品汞含量的影响因素 海产品总汞含量的影响因素包括体重、体长、种类等。本研究中鲨鱼总汞含量相对较高(436 ± 259) $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$),因此分析除了鲨鱼之外的鱼类总汞含量与体长和体重的相关性。鱼类总汞含量与体长显著正相关(图2, $r=0.52$, $P=1.8 \times 10^{-9}$),与体重也显著正相关(图3, $r=0.20$, $P=0.001$)。这是由于个体大的鱼类多为食物链顶端的捕食者,食物链的生物放大作用使其体内积累较多的汞。而且鱼在生长过程中,汞的吸收速率大于排泄速率,导致鱼类体内累积的汞含量随着鱼的生长而增加(朱艾嘉等 2014)。

舟山地区市售海产品总汞含量见表1,其中鱼类总汞含量为(44.5 ± 87.7) $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,软体类总汞含量为(47.9 ± 31.6) $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,虾类的汞含量为(24.4 ± 8.62) $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。软体类总汞含量显著高于鱼类和虾类(图4 $P=0.038$ 和 $P=0.049$),而鱼类和虾类总汞含量无显著差异。海产品总汞含量的水平与其食性密切相关(Hall *et al.* 1997),以日本金乌贼为代

表的软体动物的食物链等级比鱼类和虾类高,主要以小鱼和虾为食;而虾类主要以有机碎屑和浮游动物等为食。

舟山地区海产品总汞含量处于较低水平,因此食用舟山地区的海产品所引起的汞暴露风险较低,当地居民的饮食不需要限制海产品的摄入。但是对于总汞含量较高的鲨鱼、海鳗、太平洋褶柔鱼等,应限量食用。尽管如此,鉴于汞对胎儿和幼儿的潜在危害,孕妇和幼儿等敏感人群还是要以海产品中汞含量较低的银鲳、花鲈、龙头鱼等为主,尽量不食用汞含量较高的海产品。

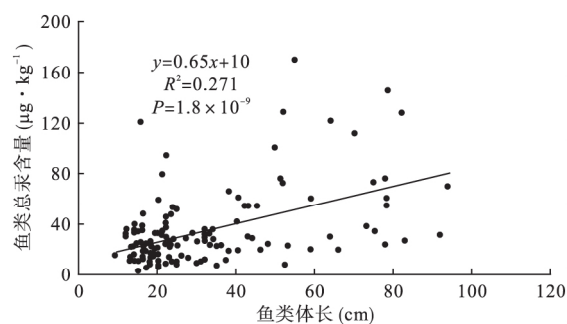


图2 鱼类体长与汞含量关系

Fig.2 Relationship between fish THg and length

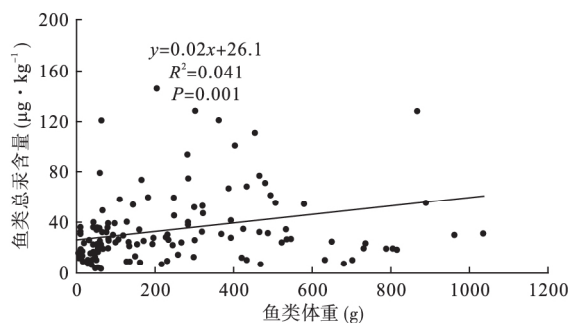


图3 鱼类体重与汞含量关系

Fig.3 Relationship between fish THg and weight

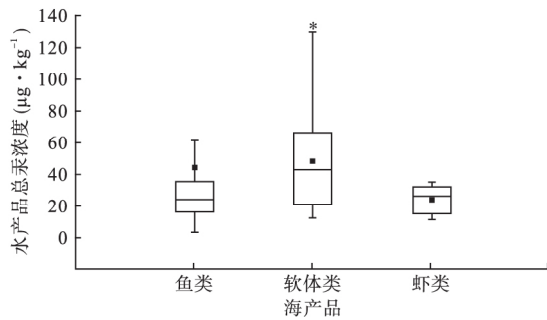


图4 海产品汞浓度(不同类别)

Fig.4 THg concentrations in the seafood between different types

* $P < 0.05$, 与鱼类比较。

3.2 头发总汞含量

3.2.1 头发总汞含量水平 舟山地区居民发汞含量与国内外其他地区研究结果比较如表4所示。其发汞含量略高于国内其他沿海地区,远高于内陆地区居民。可能原因是沿海地区居民的水产品消费量高于内陆居民。而舟山地区居民的发汞含量明显低于日本、西班牙等国家居民发汞含量,高于加拿大居民和日本非食鲸人群。这和不同国家地区居民的水产品消费水平和食用水产品类别有关。近年来我国居民的水产品消费量一直稳步增长,但与国际平均水平相比还有较大的差距。2007年我国的水产品人均消费量为9.4 kg,舟山市水产品人均消费量为29.2 kg(舟山市统计局,2010),而日本则高达38.5 kg(胡求光等,2009)。

3.2.2 发汞含量的影响因素 不同性别的发汞含量分析表明,男性发汞含量显著高于女性(图5, $P = 0.007$)。这与Hsiao等(2011)和Liu等(2008)分别在哈萨克斯坦和中国沿海城市居民的研究一致,

可能原因是男性的水产品摄入量显著高于女性。舟山调查问卷统计结果表明舟山地区男性平均每周吃鱼11.5次,而女性仅为9.7次。

不同年龄段居民的发汞含量统计结果表明,45~59年龄组和 ≥ 60 年龄组的发汞含量显著高于19~44年龄组($P = 0.048$ 和 $P = 0.008$),而19~44和10~18年龄组无显著差异(图6)。Dickman等(1998)和Lee等(2000)的研究也表明,不同年龄段居民发汞具有显著差异,原因是不同年龄群体水产品的食用量存在较大的区别(Zhang *et al.*, 2005)。在舟山地区,高年龄的居民更加偏向于本地传统的饮食习惯(陈瑜等,2010),作为主菜的海产品消费量较大,导致发汞含量较高。

影响舟山地区居民发汞含量水平的因素还包括海产品消费量、身高、体重、美容、染发、补牙及吸烟饮酒。舟山地区居民的发汞浓度随食鱼频次的增加呈现出增高的趋势(图7),对其进行相关性分析发现,居民发汞浓度与食鱼频次呈显著正相关($r = 0.313$, $P = 2.4 \times 10^{-4}$),可见居民的发汞含量随着食鱼次数的增加而升高。对其他影响居民发汞的因素进行分析,吸烟人群的发汞含量显著高于不吸烟人群($P = 0.005$),饮酒人群的发汞含量显著高于不饮酒人群($P = 0.032$),与身高、体重、美容、染发和补牙无显著相关性。说明海产品消费和吸烟饮酒对发汞的含量具有明显的影响,这与牛小丽等(2014)和Zhang等(2005)研究结果一致。

综上所述,舟山市售海产品均未超过我国水产品食用安全标准,总汞的平均含量为 $43.9 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,处于较低水平。舟山居民的发汞平均含量为 $1.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,84.6%的居民发汞含量超过美

表4 不同地区发汞含量的对比

Table 4 Comparison of hair mercury levels in different areas

国家	地区	样本数量	发汞含量平均值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	参考文献
中国	上海	163	男0.60,女0.41	Liu <i>et al.</i> , 2008
	厦门	42	男0.78,女0.93	
	广州	-	0.94	田文娟, 2011
	河南	101	男0.22,女0.23(0.07~1.42)	牛小丽, 2012
	武汉	56	男0.47,女0.42(0.07~1.76)	
	松花江	360	1.82(0.03~116)	Zhang <i>et al.</i> , 2011
日本	舟山	136	男1.82,女1.27(0.13~8.18)	本研究
	Taiji	50	食鲸24.6 非食鲸4.3	Endo <i>et al.</i> , 2010
加拿大	Nunavut	361	0.66	Tian <i>et al.</i> , 2011
西班牙	Mining Area	170	2.64(0.2~935)	Díez <i>et al.</i> , 2011

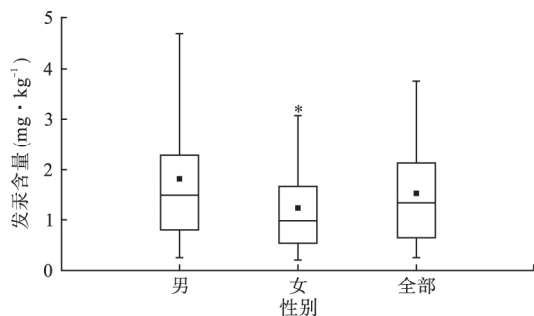


图5 居民发汞含量的性别差异

Fig.5 Hair THg concentrations between male and female

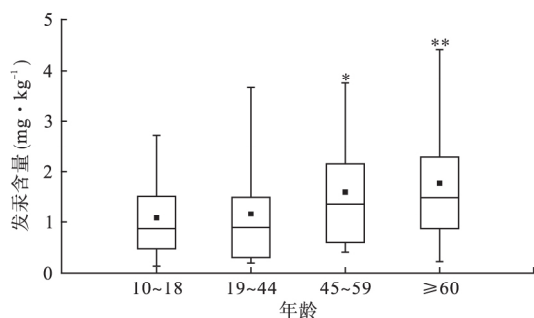
* , $P < 0.05$ 与男性比较。

图6 居民发汞含量的年龄差异

Fig.6 Hair THg concentrations in different age groups

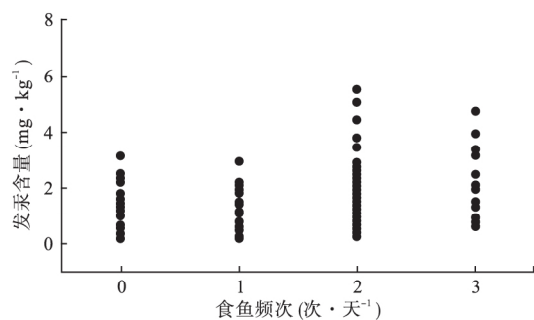
* , $P < 0.05$; * * , $P < 0.01$; 与 19~44 年龄组比较。

图7 不同食鱼频次居民发汞含量

Fig.7 Hair THg concentrations in different consumption groups

国 EPA 限值 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 7.4% 超过 JECFA 限值 $2.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表明舟山地区普通居民可能面临汞暴露的健康风险。

参考文献

- 陈瑜, 管婧婧, 夏明. 2010. 舟山海岛居民膳食习惯的调查分析. 中国食物与营养, (12): 72-76.
- 冯新斌, 仇广乐, 付学吾, 等. 2009. 环境汞污染. 化学进展, 21(2): 436-457.
- 胡求光, 王艳芬. 2009. 我国水产品的消费特征及其影响因素分析. 农业经济问题, 30(4): 97-102.

- 牛小丽, 孙青, 郭梅, 等. 2014. 大连市区普通居民的汞暴露风险研究. 生态毒理学报, 9(5): 940-949.
- 牛小丽. 2012. 膳食来源的人群汞暴露水平的定量分析及评价(硕士学位论文). 大连: 大连理工大学.
- 孙瑾, 陈春英, 李柏, 等. 2006. 北京市场4种食用淡水鱼的总汞和甲基汞的含量分析. 卫生研究, 35(6): 722-725.
- 田文娟. 2011. 珠江三角洲地区总汞和甲基汞人体暴露水平与风险评价(硕士学位论文). 广州: 暨南大学.
- 王翠萍, 闫海鱼, 刘鸿雁, 等. 2010. 使用 Lumex 测汞仪快速测定固体样品中总汞的方法. 地球与环境, 38(3): 378-382.
- 闫海鱼, 冯新斌, 李仲根, 等. 2005. 半封闭溶样冷原子荧光测定鱼体中总汞分析方法的建立. 地球与环境, 33(1): 89-92.
- 朱艾嘉, 许战洲, 柳圭泽, 等. 2014. 黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究. 环境科学, 35(2): 764-769.
- 张磊. 2009. 青岛市鱼产品汞污染初步研究. 中国农学通报, 25(3): 293-296.
- 浙江省统计局. 2015. 浙江统计年鉴. 北京: 中国统计出版社.
- 舟山市统计局. 2010. 舟山统计年鉴. 北京: 中国统计出版社.
- Dickman MD, Leung CKM, Leong MKH. 1998. Hong Kong male subfertility links to mercury in human hair and fish. *Science of the Total Environment*, 214: 165-174.
- Díez S, Esbrí JM, Tobias A, et al. 2011. Determinants of exposure to mercury in hair from inhabitants of the largest mercury mine in the world. *Chemosphere*, 84: 571-577.
- Endo T, Haraguchi K. 2010. High mercury levels in hair samples from residents of Taiji, a Japanese whaling town. *Marine Pollution Bulletin*, 60: 743-747.
- Fu Z, Wu F, Amarasiriwardena D, et al. 2010. Antimony, arsenic and mercury in the aquatic environment and fish in a large antimony mining area in Hunan, China. *Science of the Total Environment*, 408: 3403-3410.
- Hall BD, Bodaly RA, Fudge RJP, et al. 1997. Food as the dominant pathway of methylmercury uptake by fish. *Water, Air, & Soil Pollution*, 100: 13-24.
- Hsiao HW, Ullrich SM, Tanton TW. 2011. Burdens of mercury in residents of Temirtau, Kazakhstan: I: Hair mercury concentrations and factors of elevated hair mercury levels. *Science of the Total Environment*, 409: 2272-2280.
- JECFA(Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives). 2003. Summary and conclusions of the sixty-first meeting of the joint FAO/WHO expert committee on food additives. Rome, Italy: Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives.
- Kinghorn A, Solomon P, Chan HM. 2007. Temporal and spatial trends of mercury in fish collected in the English-Wabigoon river system in Ontario, Canada. *Science of the Total Environment*, 372: 615-623.
- Lee WC, Lee MJ, Lee SM, et al. 2000. An observation on the

- mercury contents of scalp hair in the urban residents of South Korea. *Environmental Toxicology & Pharmacology*, **8**: 275-278.
- Li P, Feng X, Qiu G, et al. 2011. Hair can be a good biomarker of occupational exposure to mercury vapor: Simulated experiments and field data analysis. *Science of the Total Environment*, **409**: 4484-4488.
- Li P, Feng X, Liang P, et al. 2013. Mercury in the seafood and human exposure in coastal area of Guangdong province, South China. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **32**: 541-547.
- Liu JL, Xu XR, Yu S, et al. 2014. Mercury contamination in fish and human hair from Hainan Island, South China Sea: Implication for human exposure. *Environmental Research*, **135C**: 42-47.
- Liu X, Cheng J, Song Y, et al. 2008. Mercury concentration in hair samples from Chinese people in coastal cities. *Journal of Environmental Sciences*, **20**: 1258-1262.
- Llobet JM, Falcó G, Casas C, et al. 2003. Concentrations of arsenic, cadmium, mercury, and lead in common foods and estimated daily intake by children, adolescents, adults, and seniors of Catalonia, Spain. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, **51**: 838-842.
- Nakagawa R, Yumita Y, Hiromoto M. 1997. Total mercury intake from fish and shellfish by Japanese people. *Chemosphere*, **35**: 2909-2913.
- NRC. 2000. Toxicological Effects of Methylmercury. Washington, DC: National Academy Press.
- Shang XH, Li XW, Zhang L, et al. 2010. Estimation of methylmercury intake from the 2007 Chinese Total Diet Study. *Food Additives & Contaminants: Part B Surveillance*, **3**: 236-245.
- Tchounwou PB, Yedjou CG, Patlolla AK, et al. 2012. Heavy metals toxicity and the environment. *EXS*, **101**: 133-164.
- Tian W, Egeland GM, Sobol I, et al. 2011. Mercury hair concentrations and dietary exposure among Inuit preschool children in Nunavut, Canada. *Environment International*, **37**: 42-48.
- USEPA. 1997. Health Effects of Mercury and Mercury Compounds. Mercury Study Report to the Congress. Vol. V. Washington, DC, USA: USEPA.
- Wang HS, Xu WF, Chen ZJ, et al. 2013. In vitro estimation of exposure of Hong Kong residents to mercury and methylmercury via consumption of market fishes. *Journal of Hazardous Materials*, **248-249**: 387-393.
- Zhang L, Wang Q, Shao Z. 2005. Human hair mercury levels in the residents living along the Second Songhuajiang River and the influencing factors. *Research of Environmental Sciences*, **18**: 113-115.
- Zhang L, Zhang L. 2011. Total mercury and methyl mercury concentration of hair in the residents in Di'er Songhua River Region, Northeast China: Influencing factors and health risk. *International Conference on Bioinformatics & Biomedical Engineering*, **2011**, DOI: 10.1109/icbibe.2011.5781335.
- Zhu L, Yan B, Wang L, et al. 2012. Mercury concentration in the muscle of seven fish species from Chagan Lake, Northeast China. *Environmental Monitoring & Assessment*, **184**: 1299-1310.
-
- 作者简介 赵宇航,男,1993年生,硕士研究生,主要从事环境污染评价及控制方面的研究工作。E-mail: zhaoyhchn@foxmail.com
责任编辑 魏中青
-