

# 中国部分地区汞暴露对儿童健康风险评价

沈路路,胡建英\*,董兆敏,刘俊 (北京大学城市与环境学院,北京 100871)

**摘要:** 结合人体血汞浓度分布和最高无影响作用浓度(NOAEL)分布,以汞暴露量超过 NOAEL 的概率为评价指标,计算了中国部分地区汞引起的儿童健康风险.研究表明,中国大部分地区风险较低,超过 NOAEL 的概率为  $10^{-7}$ ~ $10^{-5}$ ;而在受到污染的第二松花江流域的松原和长春风险较高,分别为  $2.24 \times 10^{-3}$  和  $3.30 \times 10^{-5}$ ;贵州汞矿区附近的儿童也面临着很高的汞暴露风险,最高达到  $6.87 \times 10^{-3}$ .中国儿童汞健康风险呈现明显的区域性特征.

**关键词:** 汞; 儿童; 健康风险评价

中图分类号: X503.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2009)12-1323-04

**Health risk assessment of mercury on children's health in some regions of China.** SHEN Lu-lu, HU Jian-ying\*, DONG Zhao-min, LIU Jun (College of Urban Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China). *China Environmental Science*, 2009,29(12): 1323~1326

**Abstract:** Due to the domestic situation of China, the researches on health risk of mercury were limited. In this study, health risk of mercury for children in China (some regions) were assessed by intergrating the probabilities of both blood mercury and no observed adverse effect levels(NOAEL) in some parts of China. The health risk in most parts of China was in the range of  $10^{-7}$  to  $10^{-5}$ , the risk in Songyuan and Changchun located at Dier Songhuajiang River basin were  $2.24 \times 10^{-3}$  and  $3.30 \times 10^{-5}$ , respectively. Especially, residents in Guizhou mining areas were faced to risk as high as  $6.87 \times 10^{-3}$ . The health risk of mercury showed a regional characteristics.

**Key words:** mercury; children; health risk assessment

汞可以损害人的中枢神经系统,特别对婴儿的神经发育产生危害,是全球关注的优先控制污染物<sup>[1]</sup>.由于人的血脑屏障要到出生后 1 年才发育完全,在血脑屏障完全形成之前,甲基汞很容易穿过该屏障,在较低的浓度下就能影响婴儿的神经发育<sup>[2]</sup>.近年来,汞的健康影响主要体现在儿童智力影响上.美国环境保护署(EPA)根据凡尔赛岛的流行病调查获得发汞无影响作用浓度为 12mg/kg,EPA 根据单相模型计算得出最大人体无影响摄入量为  $1.1 \mu\text{g}/(\text{kg bw}\cdot\text{d})$ <sup>[3]</sup>.EPA 在计算该日可耐摄入量(ADI)时,考虑到被调查区域的人种可能和美国人的差异,采用了 3.16 的种间差,并引入了 3.16 的个体间代谢能力差异的不确定系数.因此 EPA 的 ADI 为  $0.1 \mu\text{g}/(\text{kg bw}\cdot\text{d})$ ,所对应的发汞安全浓度为  $1 \text{mg}/\text{kg}$ <sup>[3-4]</sup>.但国际上不同组织采用的不确定系数并不统一,如日本食品安全委员会采用的不确定系数为 4<sup>[5]</sup>,而 FAO/WHO 联合食品添加剂专家委员会采用的不确定系数为

6.4<sup>[6]</sup>,最终得出的安全阈值也各不相同.采用不同的不确定系数,会得到不同的风险结果.

2000 年中国汞的人为排放量已达到 604.7t,占世界(2190t)的 28%<sup>[7]</sup>.迄今为止,对中国汞污染导致的儿童健康风险尚缺乏足够的研究,给与汞相关的环境管理和政策制定造成了困难.本研究采用的风险评价方法综合考虑人群暴露分布和最高无影响作用浓度(NOAEL)分布,在此基础上收集中国部分地区的人群汞暴露数据,以汞暴露量超过 NOAEL 的概率为评价指标,对汞污染导致的儿童健康风险进行评价,旨在为我国汞污染管理提供科学依据.

## 1 研究方法

参考日本学者的评价方法<sup>[8]</sup>,由于人群血汞

收稿日期: 2009-04-14

基金项目: 国家“973”项目(2007CB407304)

\* 责任作者, 教授, hujy@urban.pku.edu.cn

浓度和人群 NOAEL 往往呈现一个分布,因此考虑个体之间存在的暴露量差异、代谢差异和敏感性差异的影响,风险大小用式(1)表示.

$$Risk = \int_0^{\infty} f(x)G(x)dx \quad (1)$$

式中:  $f(x)$ 为血汞的概率分布密度函数; $G(x)$ 为人群 NOAEL 分布的累积分布函数; $Risk$  为人群血汞浓度超过 NOAEL 的概率.

如果人群的血汞分布和 NOAEL 分布服从对数正态分布,那么 Risk 可以通过标准正态分布的累积分布函数  $F(x)$ <sup>[8]</sup>[式(2)]计算得到.

$$F\left(\frac{\mu_1 - \mu_2}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}\right) = \int_{-\infty}^{\frac{\mu_1 - \mu_2}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (2)$$

式中:  $f(x)$ 为平均值  $\mu_1$  和标准差  $\sigma_1$  的血汞分布函数; $G(x)$ 为平均值  $\mu_2$  和标准差  $\sigma_2$  的 NOAEL 分布的累积分布函数.

计算主要应用 Crystal Ball 7 软件.

## 2 结果与讨论

### 2.1 资料来源与汞暴露水平

我国不同地区的发汞数据<sup>[9-18]</sup>见表 1.2003 年 FAO/WHO 联合专家委员会考虑了凡尔赛岛和塞舌尔岛 2 个岛的流行病学调查结果,取发汞最高无影响作用浓度为 14mg/kg,并采纳了 6.4 的不确定系数,将安全发汞浓度设定为 2.2mg/kg<sup>[6]</sup>.从表 1 可知,中国大部分地区都远低于该阈值,但是香港地区接近该安全浓度,贵州万山汞矿区和吉林松原五家站地区居民的发汞浓度已经超过安全浓度.

香港和舟山地区母亲血汞符合对数正态分布.泸州、北京、无锡和长春地区文献没有给出汞暴露浓度分布类型.贵州对照区发汞浓度符合正态分布,其他地区报道的汞浓度水平均符合对数正态分布.根据文献所给出的平均值和方差,采用对数正态分布对长春人群的发汞和血汞数据进行拟合.沿海城市缺乏几何标准差,考虑到沿海城市与舟山地区的地理相似性,故采用了舟山地区的血汞分布的几何标准差 1.66.舟山和香港地区同时有发汞和血汞数据,而其他地区只有发汞数据.只有发汞数据的地区根据 WHO 推荐的发汞和血汞的比例 250<sup>[19]</sup>

进行转换得到血汞的浓度分布.

表 1 不同地区居民的发汞浓度

Table 1 Hair mercury content of residents in some regions in China

地区	发汞浓度算术平均值(mg/kg)	发汞分布 (mg/kg)	血汞浓度水平(μg/L)	血汞分布 GSD
四川泸州 <sup>[11]</sup>	0.104*			
北京 <sup>[12]</sup>	0.42*			
江苏无锡 <sup>[13]</sup>	0.452*			
吉林长春 <sup>[14]</sup>	0.474*	0.09~10.4*	1.90	4.36
香港 <sup>[15]</sup>	1.99		5.58	1.60
浙江宁波 <sup>[16]</sup>	1.154*	0.22~2.98*	4.62	1.61
浙江舟山 <sup>[17]</sup>	1.38		6.32	1.66
福建厦门				
沿海 浙江舟山				
五城 浙江宁波市 <sup>[9]</sup>	0.94	0.03~8.70*	3.76	1.66
上海				
辽宁大连				
松原五家站地区 <sup>[18]</sup>	2.92*	0.16~74*	11.68	5.73
汞矿区 1	10.74	2.1~58.5*	42.96	2.41
贵州 <sup>[10]</sup> 汞矿区 2	2.17	0.6~6.5*	8.68	1.67
汞矿区 3	2.75	1.0~9.7*	11.00	1.82
对照区	0.75	0.32~1.72*		

注: \* 为文献原始数据

### 2.2 毒性评价

20 世纪在凡尔赛岛、塞舌尔岛和新西兰有 3 次大规模的关于儿童智力影响的流行病学调查<sup>[1]</sup>.美国国家研究委员会(NRC)利用基准剂量(BMD)方法对凡尔赛岛的 Boston 命名测验数据进行统计分析,得出人体血汞 NOAEL(BMD0.5,95%的置信区间的下限)为 58mg/kg<sup>[20]</sup>.即不同的个体有不同的 NOAEL,其值呈现对数正态分布,累积分布密度为 0.05(5%)时所对应的浓度即为 NOAEL.根据对数正态分布方程,可以获得式(3)<sup>[8]</sup>.

$$NOAEL = GM/GSD^{2.6} \quad (3)$$

式中:GM 为几何平均值;GSD 为几何标准差, Nordberg 等<sup>[21]</sup>经过对甲基汞的毒性数据进行分析后得出人群 NOAEL 分布的 GSD 为 2.7,可以计算得到汞的 NOAEL 的 GM 为 0.767mg/L.而在对数正态分布的概率密度函数中,  $\sigma = \ln(GSD)$ ,  $\mu = \ln(GM)$ ,能确定人体 NOAEL 的分布函数[公式(4)].

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}, \mu = -0.265, \sigma = 0.993 \quad (4)$$

结合当地的血汞分布,可以对该地区做出风险健康评价,图 1 为香港地区人群的血汞分布和 NOAEL 累积概率分布。

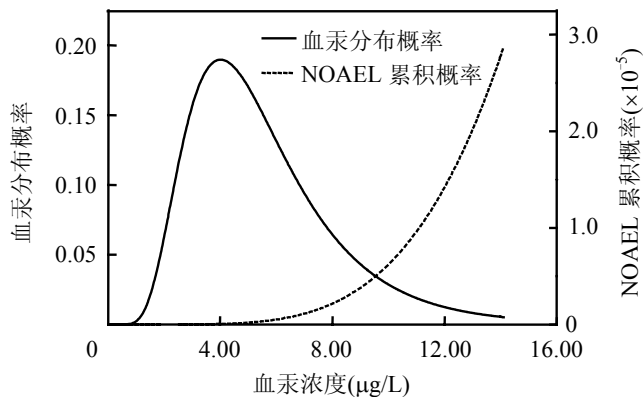


图 1 香港地区血汞分布、人群 NOAEL 概率累积分布  
Fig.1 Probability function of blood mercury and cumulative distribution function of no observed adverse effect levels

### 2.3 健康风险评价

根据式(2)并结合表 1 中的汞暴露数据和式(3),计算了中国一些城市和地区的儿童汞健康风险(表 2),其中贵州对照区的风险是采用小区间概率累积计算得到。

表 2 我国部分地区儿童的汞暴露风险

Table 2 Children's health risk of exposing to mercury in some regions of China

地区	风险	地区	风险
舟山	$4.97 \times 10^{-6}$	沿海五城市	$5.19 \times 10^{-7}$
香港	$2.31 \times 10^{-6}$	汞矿区 1	$6.87 \times 10^{-3}$
松原五家站	$2.24 \times 10^{-3}$	汞矿区 2	$1.84 \times 10^{-5}$
长春	$3.30 \times 10^{-5}$	汞矿区 3	$6.83 \times 10^{-5}$
宁波	$1.05 \times 10^{-6}$	对照区	$3.94 \times 10^{-8}$

根据本研究方法,大部分城市儿童的汞暴露导致的神经毒性的风险都 $<10^{-5}$ ,但是在松原五家站地区、贵州万山汞矿区附近,风险值分别高达 $2.24 \times 10^{-3}$ 和 $6.87 \times 10^{-3}$ .造成不同地区风险值不同的原因主要是,在受到汞污染的地区(如贵州汞矿区、第二松花江流域的松原市和长春),发汞的

分布范围比较宽,在 0.16~74mg/kg 之间,几何标准差 GSD 为 1.67~5.73;而在其他地区(如沿海城市)的发汞分布范围较窄,在 0.03~8.70mg/kg 范围之内,几何标准差 GSD 为 1.60~1.66,远低于污染地区(表 1)。

在沿海地区(如舟山、香港)和江河流域(如松花江流域),水产品的摄入是人体甲基汞暴露的主要途径<sup>[22]</sup>.统计显示,1999 年香港地区居民的食鱼量在世界排第六<sup>[23]</sup>.在舟山地区的调查发现,该地区渔民占人口的比例非常高,市场鱼价也低于其他地区.同时,舟山地区鱼片非常普及,居民食鱼量非常高<sup>[9]</sup>.而在松原地区,当地居民 97%的汞暴露都来自水产品的摄入<sup>[24]</sup>.为了降低这些地区的汞暴露风险,应该科学引导当地人群特别是孕妇控制鱼类的摄入量.贵州是我国汞矿的主要产地,汞矿储量居全国第一,有 600 多年的开采历史,产汞量约占全国的 70%<sup>[25]</sup>.贵阳土壤中的汞浓度是全国背景浓度的 11 倍<sup>[26]</sup>,在贵州地区的调查还发现,当地居民 73%的汞的摄入来自稻米,18%来自蔬菜,大气占到了 6%<sup>[27]</sup>.为了降低贵州地区的汞风险,土壤中汞污染控制是最有效的途径。

### 3 结语

综合考虑人群汞暴露分布和人体的最高无作用浓度分布,对我国部分地区的儿童汞污染风险进行评价.通过对不同地区的汞暴露风险进行分析后发现,除了贵州汞矿区附近、松花江沿岸等地区存在非常高的汞暴露风险(风险达到 $10^{-3}$ 数量级),其他地区处于较低的风险水平.由于我国的汞污染存在很大的地区差异,制定区域性汞的环境管理措施尤为必要。

### 参考文献:

- [1] Castoldi Anna F, Johansson Carolina, Onishchenko Natalia, et al. Human developmental neurotoxicity of methylmercury: Impact of variables and risk modifiers [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2008,51:201-214.
- [2] Rodier P M. Developing brain as a target of toxicity [J]. Environ. Health Perspect, 1995,103:73-76.
- [3] U.S. EPA (Environmental Protection Agency). Water quality

- criterion for the protection of human health: methylmercury (EPA-823-R-01-001) [R/OL]. 2001-01. <http://www.epa.gov/waterscience/criteria/methylmercury/document.html>.
- [4] U.S. EPA (Environmental Protection Agency). Mercury study report to congress. EPA-452/R-97-003. [R/OL]. 1997-11. <http://www.epa.gov/mercury/report.htm>.
- [5] Food Safety Commission, Japan. Food safety risk assessment related to methylmercury in seafood [R/OL]. 2005-08-04. <http://www.fsc.go.jp/english/topics/methylmercury.html>.
- [6] JECFA (Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives), Sixty-first meeting, summary and conclusions [R/OL]. 2003-06-10. <ftp://ftp.fao.org/es/esn/jecfa/jefcs61sc.pdf>.
- [7] Elisabeth G Pacyna. Global anthropogenic mercury emission inventory for 2000 [J]. Atmospheric Environment, 2006,40:4048-4063.
- [8] 中西準子,益永茂樹,松田裕之.演習環境リスクを計算する [M]. 日本:岩波書店,2004:11-12,90-91.
- [9] LIU Xiaojie, CHENG Jinping, Song Yuling, et al. Mercury concentration in hair samples from Chinese people in coastal cities [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008,20:1258-1262.
- [10] Feng Xinbin, Li Ping, Qin Guangle, et al. Human exposure to methylmercury through rice intake in mercury mining areas, Guizhou Province, China [J]. Environ. Sci. Technol., 2008, 42:326-332.
- [11] 陈志群,张青碧,甘仲霖,等.泸州地区孕产妇及其新生儿头发中总汞含量调查分析与评价 [J]. 泸州医学院学报, 2004,27(2): 119-120.
- [12] 陈清,卢国程.微量元素与健康 [M]. 北京:北京大学出版社, 1989:199.
- [13] 陈洪敏,郭俊良,钱俊,等.无锡地区新生儿脐血汞和发汞相关性分析 [J]. 江苏医药, 2007,33(9):953.
- [14] Li Zhibo, Wang Qichao, Luo Yongming. Exposure of the urban population to mercury in Changchun city, Northeast China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2006,28:61-66.
- [15] Tai F Fok. Fetal methylmercury exposure as measured by cord blood mercury concentrations in a mother-infant cohort in Hong Kong [J]. Environment International, 2007,33:84-92.
- [16] 宋玉玲,杨君予,励佳,等.宁波市262例居民发汞含量的调查 [J]. 职业与健康,2007,23(4):282-283.
- [17] Gao Yu. Prenatal exposure to mercury and neurobehavioral development of neonates in Zhoushan City, China [J]. Environmental Research, 2007,105:390-399.
- [18] Zhang Lei. Preliminary study on health risk from mercury exposure to residents of Wujiazhan town on the Di'er Songhua river, Northeast China [J]. Environmental Geochemistry and Health,2006,28:67-71.
- [19] WHO. Environmental health criteria 101: Methylmercury [R]. Geneva: World Health Organization, 1990.
- [20] Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Blood mercury levels in young children and childbearing-aged women-United States, 1999-2002 [J]. Morb. Mortal. Wkly. Rep., 2004, 53(43):1018-1020.
- [21] Nordberg G F, Strangert P. Estimation of a dose-response curve for long-term exposure to methylmercuric compounds in human beings taking into account variability of critical organ concentration and biological half-time [M]// Nordberg G F. Effects and dose-response relationships of toxic metals. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976:273-282.
- [22] U.S. EPA. An assessment of exposure to mercury in the United States, in: Environmental Protection Agency (US) [R]. Mercury Study Report to Congress, vol. IV. EPA, Washington, 1990.
- [23] World Wide Fund For Nature Hong Kong (WWF). Hong Kong ranked 6th in global fish consumption in the WWF living planet report 1999 [EB/OL]. [www.wwf.org.hk/eng/pdf/references/pressreleases\\_hongkong/prhk090999.PDF](http://www.wwf.org.hk/eng/pdf/references/pressreleases_hongkong/prhk090999.PDF).
- [24] 张磊,王起超.松原地区居民汞暴露途径的初步研究 [J]. 微量元素与健康研究, 2008,25(3):30-32.
- [25] 丁振华,王文华,瞿丽,等.贵州万山汞矿区汞的环境污染及对生态系统的影响 [J]. 环境科学, 2004,25(2):111-114
- [26] Zhang L, Wong M H. Environmental mercury contamination in China: Sources and impacts [J]. Environment International, 2007,33:108-121.
- [27] 仇广乐.贵州省典型汞矿地区汞的环境地球化学研究 [D]. 贵州:中国科学院地球化学研究所, 2005.

**作者简介:** 沈路路(1987-),男,湖北荆门人,北京大学城市与环境学院本科生,研究方向为化学物质的风险评价。