

# 环境铅污染所致儿童健康风险评估方法探讨

施婕, 刘茂\*

(南开大学环境科学与工程学院城市公共安全研究中心, 天津 300071)

**摘要:** 目的 对我国某重工业城市内工业区铅污染带来的健康风险进行评价。方法 利用美国环保署 (EPA) 开发的 EUBKwin 软件计算某城市工业区的儿童血铅水平; 并通过世界卫生组织《铅的环境疾病负担指南》中介绍的方法计算该地区儿童由血铅引起轻度精神发育迟滞的发病率。结果 通过美国环保署的软件计算得出儿童血铅水平高于铅的毒性阈值  $10 \mu\text{g}/\text{dl}$  的概率为 65.04%, 与国内和世界范围内的相关数据进行比较可以发现, 发达国家的儿童血铅水平相对较低, 发展中国家, 尤其是工矿业地区的儿童血铅问题则要严重得多, 而相对于国内, 计算得到的结果也要高于全国的一般水平。另外, 根据世界卫生组织的指南计算得出该地区的轻度精神发育迟滞的发病率同样高于世界其他地区, 且等于世界卫生组织针对东亚国家给出的发病率的最佳估计的 3.2 倍, 上限的 1.7 倍。结论 该地区的铅污染问题已经相当严重。由此带来的儿童健康风险过大, 必须及时采取措施, 控制铅污染的进一步发展。

**关键词:** 铅污染; 血铅; 轻度精神发育迟滞

中图分类号: X18 R994.6 文献标识码: A 文章编号: 1002-221X(2009)01-0031-04

Investigation on health risk by environmental lead pollution in children

SHI Jie LIU Mao\*

(Research Center for Urban Public Safety Nankai University Tianjin 300071 China)

**Abstract:** Objective To assess the health risk of children living in lead polluted city of China. Methods The blood lead levels of children in certain industrialized city were calculated using EUBKwin software developed by Environmental Protection Agency US. Then the incidence of mild mental retardation was obtained with the method introduced in "Lead-Assessing the Environmental Burden of Disease at National and Local Levels" published by World Health Organization. Results The probability that the blood lead level over  $10 \mu\text{g}/\text{dl}$  (toxicity threshold) was up to 65.04%, which was higher than the average level in China. Otherwise, the incidence of mild mental retardation was also higher than that of other cities in China, which was 3.2 times higher than the estimated incidence for East Asia by WHO. Conclusions It was suggested that the lead pollution in this city was quite serious, and the health risk caused by lead pollution was quite big in children. Consequently, the control measures must be taken for blocking the development of lead pollution in this area.

**Key words:** Lead pollution; Blood lead level; Mild mental retardation

铅对人类健康具有很大的威胁。尤其对于儿童, 当长期暴露在铅浓度较高的环境中时, 就可能会导致生长发育、行为心理的损伤, 带来不可逆转的严重后果。鉴于此, 各国的专家学者针对铅污染可能带来的影响都展开了广泛而深入的讨论。在我国, 由于不同地区的铅污染程度相差很大, 因此特定地区的血铅水平调查具有很强的地域性, 而成本问题也限制了流行病学调查在全国范围内的普及, 与之相比, 环境介质中铅含量的监测数据则更加丰富。因此, 有必要针对环境中铅含量与血铅水平之间的关系展开讨论。

美国环保署 (EPA) 对铅污染问题及其带来的影响开展了全面而深入的研究, 许多的研究成果已经为各国所认同并加以应用<sup>[1]</sup>。2002年, EPA整合了多年的研究成果, 编制出

了根据环境中的铅含量计算城镇儿童血铅水平的软件——EUBKwin<sup>[2]</sup>。同年, 世界卫生组织 (WHO) 提出了环境疾病负担 (EBD) 的概念, 用来评价环境暴露带来的健康影响<sup>[3]</sup>。在第四次卫生与环境部长会议上, 确认了该方法在环境与卫生领域发挥的作用<sup>[4]</sup>。而铅的 EBD 计算作为疾病负担方法中的一个部分, 已经在许多国家得到了应用, EPA 对铅污染的问题的研究较为深入且具有权威性, 因此可以认为其开发的 EUBKwin 软件具有借鉴意义。而目前在国内尚没有看到相关的文献。所以, 本文将根据我国某重工业城市工业区的环境监测数据通过 EUBKwin 软件计算儿童中的血铅水平分布, 并利用 WHO 的方法对计算结果加以分析评价。

## 1 对象与方法

### 1.1 方法

1.1.1 暴露评估——血铅的计算方法 铅进入环境后, 可以通过土壤、水、大气等环境介质暴露于儿童。在城区, 汽油排放和含铅油漆使环境中的铅含量大幅度提高, 随之而来的铅暴露已经成为研究重点。

收稿日期: 2008-05-27 修回日期: 2008-11-03

基金项目: 国家科技支撑计划 (课题编号: 200603746006)

作者简介: 施婕 (1984-) 女, 硕士研究生, 主要研究方向为健康风险。

\*: 通讯作者, E-mail: jsaifei@nankai.edu.cn

EPA针对儿童血铅水平与环境中的铅含量的问题开展了大量研究。其中的暴露模型与生物动力学模型已经得到了广泛的应用, 现对其进行简要介绍:

暴露模型, 采用 Marcu 的模型来计算儿童通过各种渠道的摄入而带来的铅的暴露量<sup>[2]</sup>。其公式为:

$$U_i = C_i \times Q_i \times A_i$$

其中  $U_i$  是介质的暴露量,  $C_i$  是介质中的铅浓度 (可由环境监测数据获得),  $Q_i$  是儿童换气率或摄入土壤或灰尘的量 (见表 1、2),  $A_i$  是儿童对介质中的铅的吸收因子<sup>[3]</sup>。

表 1 EPA儿童暴露参数 不同年龄段儿童换气率

	0~1岁	1~2岁	2~3岁	3~4岁	4~5岁	5~6岁	6~7岁
换气率 (m <sup>3</sup> /d)	2	3	5	5	5	7	7

表 2 EPA儿童暴露参数 不同年龄段儿童土壤和灰尘摄入量之和

	0~1岁	1~2岁	2~3岁	3~4岁	4~5岁	5~6岁	6~7岁
摄入量 (g/d)	0.085	0.135	0.135	0.135	0.100	0.090	0.085

生物动力学模型, 该模型将铅在体内的迁移传输分成几个不同的部分, 分别计算不同部分的体液、器官重量以及铅的传输时间, 最后通过循环运算综合得出儿童体内的血铅含量<sup>[9]</sup>。应当指出, 本模型基本采用欧美儿童的生理数据, 而种族差异的存在使得其中的一些参数并不完全符合我国儿童的实际情况, 因此会对最后的结果产生一定的影响。

基于上述模型, EPA于 2002年整合了多年的研究成果, 开发了 IEUBKw软件, 用四个相关的模块 (暴露、吸收、生物动力学以及概率分布) 来估算暴露于含铅环境中的儿童的血铅水平。

1.1.2 风险计算——发病率的计算方法 WHO关于铅的环境疾病负担方法指南中提到, 智商分数值的降低与血铅含量呈线性关系, 在 5~20 μg/d 的范围内, 每 5 μg/d 的血铅会带来 1.3 分的智商降低。而当血铅水平高于 20 μg/d 时, 智商分数的降低值就一直维持在 3.5 分不变<sup>[3]</sup>。

当智商位于 50~70 分之间时, 被定义为轻度精神发育迟滞 (MMR)。因此, 以 5 μg/d 的血铅含量为区间, 计算对应的儿童比例, 以及可能出现 MMR 的智商区间所对应的儿童比例。两者相乘即可得到由血铅引起的 MMR 的发病率<sup>[3]</sup>。

然而, 有研究指出, 在发达地区和发展中地区之间 MMR 的患病率存在差异<sup>[3]</sup>。因此, WHO 给出了各个地区所对应的修正比率, 中国的修正比率值为 3.03 则有:

$$I (MMR) = AR \times [ (R_1 \times P_1) + (R_2 \times P_2) + (R_3 \times P_3) + (R_4 \times P_4) ]$$

其中, AR 为修正比率, 等于 3.03,  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  和  $R_4$  分别代表血铅水平位于 5~10 μg/d、10~15 μg/d、15~20 μg/d 以及 20 μg/d 以上区间内儿童所占的比例;  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  和  $P_4$  则表示智商水平在 70~70.65、70~71.95、70~73.25 和 70~73.5 之间的人群比例, 分别为 0.0024、0.008、0.0145 和 0.00159。

### 1.2 研究对象

我国针对铅污染问题开展了大量的研究工作, 如: 王春梅等人于 2001 年分析了沈阳市 1996~2000 年空气中铅浓度的监测数据, 得出了沈阳地区大气铅含量的时空变化规律<sup>[7]</sup>。符娟林等人则于 2004 年分析研究了杭州市土壤铅的化学形态与可溶性<sup>[8]</sup>。任慧敏等人于 2005 年在沈阳市区设 51 个采样点, 采集土壤、灰尘和大气样品, 测得其中的铅含量, 并利用 Monte Carlo 方法得出了儿童环境铅暴露量<sup>[9]</sup>。李敏、林玉锁于 2006 年总结了我国不同城市的土壤、大气、饮食以及饮用水中铅的污染特征和污染水平<sup>[9]</sup>。

历史悠久的某重工业城市具有明显的铅累积效应, 受到的铅污染相当严重。本文中采用了李敏、林玉锁论文中针对该城市工业区的相关数据展开讨论。

## 2 结果与分析

### 2.1 儿童的血铅水平

根据参考文献 [9] 中给出的我国某重工业城市工业区各种环境介质中的铅含量的平均值 (见表 3) 输入 IEUBKw 软件中, 得出了如图 1 所示的输出结果。

表 3 我国某城市工业区不同环境介质中的铅含量

	大气 (μg/m <sup>3</sup> )	土壤 (μg/g)	灰尘 (μg/g)
铅含量 (平均值)	1.877	1047.12	1206.74

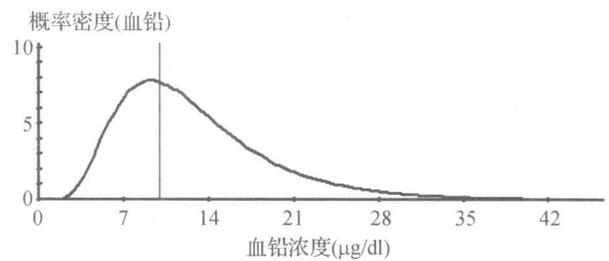


图 1 IEUBK 模型输出图

图 1 中的曲线为概率密度曲线。图上平行于 Y 轴的直线为观测线, 通过设定观测线所对应的血铅浓度, 可以得到一定暴露条件下, 儿童体内血铅含量高于指定水平的概率。

由前文可知, 当血铅含量高于 5 μg/d 时, 会对智商分数产生影响, 且每 5 μg/d 的血铅会带来 1.3 分的智商降低, 而当血铅水平高于 20 μg/d 时, 智商降低的分值将会维持在一定的水平而不继续增大。因此, 本文分别以 5 μg/d 和 20 μg/d 的血铅含量为起点和终点, 以 5 μg/d 为区间, 来考察血铅含量高于相应浓度水平的概率。

在这里, 我们关心的是高于指定的血铅浓度水平的概率, 通过设定不同血铅浓度的观测线, 分别考察血铅水平高于 5、10、15、20 μg/d 所对应的概率, 如表 4 所示。

表 4 给定血铅浓度对应的概率

	5 μg/d	10 μg/d	15 μg/d	20 μg/d
概率 (%)	96.881	65.040	31.780	13.875

中国国情调研中心对该城市儿童铅污染的调查显示, 全市有 40% 儿童的血铅水平高于 10 μg/d<sup>[10]</sup>。同时还有文献表明, 该城市工业污染最为严重的西部地区有 85.97% 的儿童血铅浓度高于该水平, 与上述数据进行对比, 可以认为较为符

合实际情况,但仍存在一定差异,产生这些差异的原因可能有:(1)调查区域的差异,国情调研中心调查的是某城市的全市儿童,文献的研究对象是该城市工业污染最严重的西部地区的儿童,而本文的讨论区域为该城市的工业区,功能分区不同可能对铅污染水平产生较大的影响,进而影响儿童的血铅水平;(2)种族差异,IEUBK<sup>wi</sup>软件主要以欧美儿童的数据为基础进行计算,而我国儿童在暴露参数(如换气率、摄入量等)和代谢参数(如红细胞中的铅含量、血容量)等方面可能与欧美儿童存在差异,进而为计算结果引入误差;(3)监测手段不同,由于我国的环境监测手段与欧美国家存在差异,不同的监测方法可能会影响环境铅浓度的监测结果,并为儿童血铅的计算带来误差。

### 2.2 MMR发病率

将 IEUBK<sup>wi</sup>软件的计算结果与发病率的计算参数进行汇总,得到了表 5 根据前文给出的公式与表 5 中的数据,计算每 1 000 人中 MMR 发病率。得到:

$$I(MMR) = 3.03 \times [(318.24 \times 0.0024) + (333.46 \times 0.008) + (178.72 \times 0.0145) + (138.22 \times 0.0159)] \\ = 24.908 \text{ (人 / 1 000 儿童)}$$

表 5 具有铅健康风险的儿童数量

血铅区间 ( $\mu\text{g/d}$ )	具有风险的 儿童的比例	健康效应	每 1 000 儿童 中的比率	智商区间内的 标准人数(%)
5~10	0.317 51	智商降低 0.65 分	317.51	0.24
10~15	0.333 50	智商降低 1.95 分	333.50	0.80
15~20	0.179 05	智商降低 3.25 分	179.05	1.45
>20	0.138 75	智商降低 3.50 分	138.75	1.59

## 3 讨论

### 3.1 儿童血铅水平

美国疾病预防控制中心(CDC)于 1991 年同国际上 30 多个国家一起,将  $10 \mu\text{g/d}$  作为儿童血铅水平的限值,用来诊断儿童铅中毒<sup>[11]</sup>。之后,世界各国的学者们都据此开展了有关儿童血铅水平的研究调查(见表 6<sup>[12-17]</sup>)。

表 6 世界范围内的儿童血铅水平

地区	年份	血铅水平高于 $10 \mu\text{g/d}$ 的儿童所占比例	参考文献
加拿大安大略省的多伦多市	1992	8% (小于 6 岁)	Langlois 等人 <sup>[12]</sup>
芬兰首都赫尔辛基	1992	7%	Rönkä 等人 <sup>[13]</sup>
澳大利亚悉尼	1992~1994	16%	Mir 等人 <sup>[14]</sup>
波兰西里西亚	2003	13%	Dorota Jarońska 等人 <sup>[15]</sup>
美国	2003	2.2%	P. A. Meyer 等人 <sup>[16]</sup>
巴西圣保罗和 Paran 地区接壤的某采矿区	2002	59.6%	Clarice Umbeliao de Freijas 等人 <sup>[17]</sup>
巴西圣保罗西部 Bauru 地区	2002	36.6%	Clarice Umbeliao de Freijas 等人 <sup>[17]</sup>

近年来,我国的许多地区陆续开展了有关儿童血铅的流行病学调查。结果表明,总体上我国有 33.8% 的儿童血铅水平超过了  $10 \mu\text{g/d}$  的限值。而在对我国 9 省 19 个城市的 6 502 名儿童开展的调查中,则有 29.91% 的城市儿童的血铅含量超过了该限值<sup>[9]</sup>。

从上面的数据可以看出,世界范围内不同地区的铅暴露程度差异很大,即使是在同一国家,不同地区儿童的血铅水平也存在着显著的差异。同时,伴随着含铅汽油的禁用,相同地区儿童的血铅水平也会随之呈现下降趋势。可以看出,发展中国家,尤其是矿区与工业区儿童的血铅水平,要远远高于发达国家。根据前面给出的数据,我国儿童的血铅含量已经高于世界上的许多国家,而某重工业城市的工业区其环境介质中铅的积累量相当高,前文通过模拟得出该地区儿童的血铅水平超过  $10 \mu\text{g/d}$  的比例已经高达 65.04%,远远高于我国普通城市的平均水平,可见该地区铅污染造成的问题已经相当严重。

### 3.2 MMR 发病率

自 WHO 提出了计算铅的疾病负担的指南以来,许多国家和机构都依据此方法开展了相应的工作,得出了各自的由环境铅暴露带来的 MMR 发病率。

Dorota Jarońska 等人在 2006 年分别计算了波兰地区在 2001 年和 2005 年的铅疾病负担,儿童 MMR 发病率各自为 2.1% 和 1.0%<sup>[14]</sup>。O'Connell 于 2006 年计算了爱尔兰的铅疾病负担,当地儿童的 MMR 发病率较低,为 0.25%<sup>[18]</sup>。世界银行环境与社会发展南亚处 (South Asia Environment and Social Development Unit) 于 2006 年对巴基斯坦地区开展了铅的疾病负担调查,得出了当地儿童铅暴露带来 MMR 的发病率为 16.5%<sup>[19]</sup>。

WHO 对包括中国、菲律宾、韩国等在内的东亚国家在 2000 年的铅疾病负担进行了估算,给出了这些地区由铅引发的儿童 MMR 发病率的上、下限以及最佳估计,分别为 14.6%、3.4% 和 7.7%<sup>[14]</sup>,而本文计算得出的某重工业城市工业区儿童 MMR 的发病率则高达 24.9%,是 WHO 给出的最佳估计的 3.2 倍,上限的 1.7 倍。由此可见,该地区的铅污染已经带来了相当严重的后果,因此必须及时采取措施,控制铅污染的发展及其带来的后果。

此外,由于 IEUBK<sup>wi</sup> 软件与 WHO 推荐的儿童 MMR 发病率推算模型,都是以欧美地区的监测结果与生理数据为基础,而监测手段的不同以及种族差异的存在,使得此类方法在我国的实用性、准确性都有待进一步验证。

### 3.3 不足

研究过程中还存在许多不足与待解决的问题,例如美国儿童的生活习惯和生理参数与我国存在的差异对 IEUBK 软件模拟结果的影响;另外,由于固定污染源的存在与变化,使得同一地区的环境铅浓度时空变化较大,如何在这样的条件下计算出合理的血铅水平,还有待进一步的思考和解决。

## 4 结论

本文根据各种环境介质中的铅含量,利用美国环保署开

发的 IEUBK<sup>win</sup>软件计算了某重工业城市工业区的儿童血铅水平, 利用 WHO提出的环境疾病负担方法计算了该地区的儿童因铅污染而罹患轻度精神发育迟滞 (MMR) 的风险, 对比了世界各国的数据, 对铅污染状况及其后果并展开了讨论, 认为该地区的铅污染已经大大超过国家的平均水平, 更远远超过世界范围内的污染水平, 因此应当及时采取措施, 遏制污染的发展并对环境进行改善。

#### 参考文献:

- [ 1 ] US EPA Guidelines for the health risk assessment of chemical mixtures [ OL]. [http://www.epa.gov/ncea/raf/Pdfs/chem\\_mix\\_chem\\_mix\\_1986.Pdf](http://www.epa.gov/ncea/raf/Pdfs/chem_mix_chem_mix_1986.Pdf) 1986
- [ 2 ] US EPA User's guide for the integrated exposure uptake biokinetic model for lead in children (IEUBK) [ OL]. <http://www.epa.gov/superfund/health/contaminants/lead/index.htm> 2004-06
- [ 3 ] World Health Organization. Lead— assessing the environmental burden of disease at national and local levels [ OL]. [http://www.who.int/yquantifying\\_chimpacts/publications/en/lead/chd.Pdf](http://www.who.int/yquantifying_chimpacts/publications/en/lead/chd.Pdf) 2003
- [ 4 ] Jarosinska D, Bjesjada M, Graca M M. Environmental burden of disease due to lead in urban children from Silesia, Poland [ J]. Science of the Total Environment 2006; 367: 71-79.
- [ 5 ] 任慧敏, 王金达, 张学林, 等. 沈阳市儿童环境铅暴露评价 [ J]. 环境科学学报, 2005; 25 (9): 1236-1241
- [ 6 ] US EPA Technical support document: Parameters and equations used in the integrated exposure uptake biokinetic model for lead in children [ OL]. <http://www.epa.gov/superfund/lead/products/tsd.Pdf> 1994
- [ 7 ] 王春梅, 王金达, 刘景双, 等. 沈阳市环境空气中铅的污染特征分析 [ J]. 环境与开发, 2001; 16 (3): 26-29.
- [ 8 ] 符娟林, 章明奎, 厉仁安. 杭州城市土壤铅的化学形态和可溶性研究 [ J]. 浙江大学学报, 2004; 30 (3): 305-310
- [ 9 ] 李敏, 林玉锁. 城市环境铅污染及其对人体健康的影响 [ J]. 环

境监测管理与技术, 2006; 18 (5): 6-10

- [ 10 ] 任慧敏, 王金达, 王国平, 等. 沈阳市土壤铅对儿童血铅的影响 [ J]. 环境科学, 2005; 26 (6): 153-158
- [ 11 ] Chiodo L M, Covington C, Skolir R J, et al. Blood lead levels and specific attention effects in young children [ J]. Neurotoxicology and Teratology 2007; 29: 538-546
- [ 12 ] Langlois P, Smith L, Fleming S, et al. Blood lead levels in Toronto children and abatement of lead-contaminated soil and house dust [ J]. Archives of Environmental Health 1996; 51: 59-67
- [ 13 ] Rönkä A, Salminen E, Ahonen S. Lead in the ambient air and blood specimens of children in Helsinki [ J]. Science of the Total Environment 1993; 138: 301-308.
- [ 14 ] Mia M, Smith J B, Cause J, et al. Blood lead concentration of preschool children in Central and Southern Sydney [ J]. Medical Journal of Australia 1996; 164: 399-402.
- [ 15 ] Jarosinska D, Peddada S, Rogan W J. Assessment of lead exposure and associated risk factors in urban children in Silesia, Poland [ J]. Environmental Research 2004; 95: 133-142.
- [ 16 ] Meyer P A, Pivetz T, Dignan T A, et al. Surveillance for elevated blood lead levels among children— United States, 1997— 2001 [ J]. MMWR Surveillance Summary 2003; 52 (10): 1-21.
- [ 17 ] Freijas C U, Capitan E M, Gourveja N, et al. Lead exposure in an urban community: Investigation of risk factors and assessment of the impact of lead abatement measures [ J]. Environmental Research 2007; 103: 338-344.
- [ 18 ] O'Connell E, Staines A, J Fry. Environmental burden of disease from exposure to lead in Ireland [ J]. Epidemiology 2006; 17 (6): 499.
- [ 19 ] South Asia Environment and Social Development Unit. Pakistan strategic country environmental assessment. Volume 2 [ OL]. <http://www.environment.gov.pk/publications.htm> 2006.

## 基于生理毒代动力学模型和剂量-反应模型的 苯暴露健康风险评价方法

王阳, 刘茂

(南开大学城市公共安全研究中心, 天津 300071)

**摘要:** 目的 建立一种基于生理毒代动力学 (PBTK) 模型和剂量-反应模型来评价职业暴露导致的健康风险的定量方法, 为我国职业健康风险的定量研究提供理论依据。方法 利用生理毒代动力学模型, 模拟预测苯暴露人群在环境暴露水平下有害物质的体内分布转化代谢数据。将得到的内剂量数据 (如, 总代谢量) 代入适当的内剂量-反应模型, 求解致癌风险值。通过将由此方法计算得到的两个流行病学实例的风险值与实际白血病发病率进行比较, 来验证本方法。结果 由本方法计算得到, 中国苯暴露工人的致癌风险值为  $1.52 \times 10^{-4} \sim 1.19 \times 10^{-3}$ , 土耳其制鞋工人的致癌风险值为  $1.34 \times 10^{-3} \sim 2.47 \times 10^{-3}$ 。而这两个职业暴露人群的白血病实际发病率分别为  $1.05 \times 10^{-3}$  和  $1.79 \times 10^{-3}$ 。结论 本方法可以定量评估对人体有害的职业暴露危险源, 比较准确地预测暴露工人的致癌概率, 可为职业伤害的预防和管理提供科学依据。

**关键词:** 健康风险; 苯; 职业暴露; 生理毒代动力学模型; 剂量-反应模型

中图分类号: O625.14; R994.6 文献标识码: A 文章编号: 1002-221X(2009)01-0034-04

收稿日期: 2008-05-27 修回日期: 2008-10-15

作者简介: 王阳, (1983-) 女, 硕士, 研究方向: 职业健康风险。