

南京市某区中小學生飲用水重金屬含量及健康風險評估

周睿婧^{1,2}, 陳敏健¹, 夏彥愷^{1*}

(¹南京醫科大學公共衛生學院, 江蘇 南京 211166; ²南京市鼓樓區疾病預防控制中心, 江蘇 南京 210003)

[摘要] 目的: 評價飲用水中重金屬元素對中小學生健康的潛在危害。方法: 檢測南京市某區中小學生住宅和學校的飲用水中重金屬元素含量, 採用美國國家環境保護署(EPA)推薦的分析方法建立風險分析模型, 對 8 種重金屬元素(As、Cr、Cd、Pb、Hg、Zn、Sb、Cu)經飲用水途徑對中小學生引起的健康風險作出評估, 並以蒙特卡羅模擬法分析評估的不確定性。結果: 致癌物(As、Cr、Cd)的年致癌風險均值分別為 1.6×10^{-6} 、 1.5×10^{-7} 、 1.4×10^{-7} , 非致癌物(Hg、Pb、Sb、Zn、Cu)的年健康風險均值分別為 1.0×10^{-10} 、 8.0×10^{-11} 、 6.8×10^{-7} 、 4.0×10^{-11} 、 3.9×10^{-9} , 重金屬元素總健康風險均值為 2.5×10^{-6} 。結論: 重金屬經飲用水途徑產生的健康風險超過最大可接受風險水平(1×10^{-6}), 對中小學生健康存在潛在不良影響。敏感度分析提示飲用水中重金屬元素含量是健康風險的主要影響因素之一。

[關鍵詞] 重金屬; 飲用水; 健康風險; 敏感度分析

[中圖分類號] R123

[文獻標志碼] A

[文章編號] 1007-4368(2016)07-886-07

doi: 10.7655/NYDXBNS20160725

Heavy metal contamination and human health risk assessment in drinking water in primary and middle school students from a District of Nanjing City

Zhou Ruijing^{1,2}, Chen Minjian¹, Xia Yankai^{1*}

(¹School of Public Health, NJMU, Nanjing 211166; ²Center for Disease Control and Prevention of Nanjing GuLou District, Nanjing 210003, China)

[Abstract] **Objective:** To evaluate the potential hazards of heavy metal in drinking water in primary and middle school students. **Methods:** We detected heavy metal elements in residential and school drinking water of primary and middle school students, and assessed risk of 8 kinds of heavy metals (As, Cr, Cd, Pb, Hg, Zn, Sb, Cu) using method recommended by the United States Environmental Protection Agency (EPA), and used Monte Carlo simulation method to analyze and evaluate the uncertainty. **Results:** The annual carcinogenic risks for carcinogenic elements, As, Cr, Cd were 1.6×10^{-6} , 1.5×10^{-7} , 1.4×10^{-7} , respectively. For non carcinogens (Hg, Pb, Sb, Zn, Cu), the annual carcinogenic risks were 1.0×10^{-10} , 8.0×10^{-11} , 6.8×10^{-7} , 4.0×10^{-11} , and 3.9×10^{-9} respectively. The total health risk was 2.5×10^{-6} . **Conclusion:** The health risk of heavy metals caused by drinking water is more than the maximum acceptable risk level (1×10^{-6}), and exerts potential adverse effects on health of primary and middle school students. The sensitivity analysis showed that the content of heavy metal elements in drinking water is the main factor affecting the health.

[Key words] heavy metal; drinking water; health risk; sensitivity analysis

[Acta Univ Med Nanjing, 2016, 36(07): 886-892]

飲用水安全是全球範圍內最受關注的公共衛生問題之一。近年來,某些重金屬元素在各種環境介質中屢屢被檢出^[1-4],且其含量遠高於環境本底。目前,中國居民的飲用水主要為水廠集中供應的自來水。然而,多數自來水廠的淨化工藝流程並不能

有效、徹底地去除自來水中的無機或有機污染物。據報道,世界各地的自來水中均曾檢出某些金屬元素或有機化合物^[5-6]。

飲用水中重金屬元素對人類健康的影響正日益受到重視^[7-9]。銅(Cu)、鉻(Cr)、鋅(Zn)為必需微量元素,對維持生命活動至關重要,但人體對其需求量很低,一旦過量攝入,反而會對健康產生不良影響^[10-11]。銅沉積於肝臟可導致慢性肝炎、肝硬化甚至

[基金項目] 江蘇省高校優勢學科建設工程資助

*通信作者(Corresponding author), E-mail: yankaixia@njmu.edu.cn

造成肝功⼾能衰竭,銅過量會引起肝豆狀核變性(Wilson's disease,WD)、印度兒童肝硬化(Indian childhood cirrhosis,ICC)、流行性 Tyrolean 嬰兒肝硬化(endemic Tyrolean infantile cirrhosis,ETIC)和特發性銅中毒(idiopathic copper toxicosis,ICT)^[12]。鋅過量會抑制機體生長發育及免疫功能,還會引起雄性動物不育^[13]。而砷(As)、汞(Hg)、鉛(Pb)、鎘(Cd)、銻(Sb)為非必需微量元素,對人體健康危害極大,低劑量攝入即可導致多種疾病,包括出生缺陷、心血管疾病、神經系統疾病甚至各種類型的腫瘤^[14]。砷、鉻、鎘已被國際癌症研究機構(IARC)列為人類致癌物(I類致癌物)。汞、鉛可對消化系統、血液系統等造成嚴重損害^[15],汞、鉛、鎘還是目前已篩選出的環境內分泌干擾物的重要組成部分,會干擾人體生殖腺和雌性激素的分泌功能^[16]。銻的毒性和砷類似,對人體免疫、神經系統、基因、發育等都具有潛在不良影響^[17],已被美國環境保護總局(EPA)和歐盟列為優先控制的污染⼾物,而我國是世界上銻產量最大的國家,土壤、水源的銻污染不容忽視。

兒童青少年時期處於個體生長發育的特殊階段,對某些重金屬元素毒性作用較成年人更為敏感,這些元素的長期慢性暴露,易引發嚴重的發育障礙^[18],甚至影響其終身健康。據報道,砷暴露對 5~15 歲兒童的神經系統發育有顯著的不良影響,導致 IQ 評分降低,具體表現為語言表達能力、執行能力以及記憶力減退^[19]。汞暴露影響神經系統發育,環境中汞的含量與兒童特殊教育服務需求及兒童自閉症患病率呈正相關,環境中汞排放量每增加 1 000 lb(1 lb=453.6 g),兒童特殊教育服務需求增加 43%,孤獨症患病率升高 61%^[20]。因此,有必要了解中小學生飲用水中重金屬元素的含量,評估由其導致的潛在健康風險,並制定嚴格的飲用水標準,從而保證兒童青少年的飲水安全。

本研究採用电感耦合等離子質譜(ICP-MS)方法測定南京市某區中小學直飲水和住宅自來水中重金屬元素的含量,採用 EPA 推薦的“四步法”^[21],評估 8 種過量攝入對人體危害較大的重金屬元素(As、Cr、Cd、Pb、Hg、Zn、Sb、Cu)經飲用水途徑攝入產生的健康風險,以蒙特卡羅模擬法對健康風險評價中的不確定性進行分析,從而綜合了解該地區中小學生飲用水重金屬元素暴露狀況及其對學生健康的潛在影響。本研究以中小學生飲用水為研究對象,重點關注了以往研究未能覆蓋到的與青少年兒童身體健康密切相關的新領域,拓展了國內水環境健康風

險評估的研究範圍,為衛生、環保、水利等相關職能部門制定下一步水質治理政策提供理論依據。

1 材料和方法

1.1 材料

濃硝酸(優級純;默克公司,美國);純水(密理博公司,美國);標準溶液(錳、鈷、鎳、銅、鋅、硒、鉻、砷、鎘、銻、汞和鉛)購於中國計量學院;超純氬氣(99.999%)作為載氣。

1.2 方法

1.2.1 樣品採集

採集當地中小學生家中自來水水樣 38 份,學校直飲水水樣 57 份。自來水採樣點覆蓋了向該區域供水的三大水廠(上元門水廠、北河口水廠、城北水廠)的主要管網系統。為了觀察自來水中各元素的季節性波動,分別於 2015 年的 4 月(枯水期)和 9 月(豐水期)各採集 19 份水樣。直飲水經過過濾處理,水樣中重金屬元素含量受季節因素影響較弱,不分季節採樣。水樣採樣前提前打開水龍頭(不少於 2 min)排空管道內殘余水,用塑料瓶採集 1 L 水樣,加入 10 mL 硝酸,4℃保存,7 d 內檢測。

1.2.2 儀器設備與質量控制

电感耦合等離子質譜儀(ICP-MS, 型號:iCAP Qc, Thermo Scientific 公司,美國)。真空腔壓力監測: 5.53×10^{-7} ; 等離子體功率:1 550 W; 霧化室溫度:2.7℃; 輔助氣流速:0.8 L/min; 冷卻氣流速:14 L/min; 霧化器氣流速:1.19 L/min; 蠕動泵轉速:40 r/min; 矩管垂直位置:-1; 碰撞池氣體流速:He 5.075 mL/min; 碰撞池:3 V。

工作曲線的含⼾分別為 0、0.01、0.05、0.10、0.50、1.0、5.0、10.0、50.0、100.0、200.0 $\mu\text{g/L}$ 。為驗證檢測方法的穩定性,採用國家標準中心提供的標準物質進行上機測定,待測元素的相對偏差(RSD)均低於 10%。各元素曲線的相關係數(r^2)和檢出限(LOD)見表 2。LOD 值為對試劑空白測定 21 次所得結果的 3 倍標準偏差^[22]。

1.3 數據分析

飲用水中對人體健康危害較大的重金屬元素可分為致癌物(Cr、As、Cd)和非致癌物(Pb、Hg、Sb、Zn、Cu)。

致癌物健康風險模型為 $R_i = [1 - \exp(-D_i q_i)] / 70$ 。 R_i 為化學致癌物經攝入途徑產生的年平均個人致癌風險; q_i 為化學致癌物經攝入途徑致癌強度係數 [$\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$]; 70 為平均期望壽命。

表 2 待测元素曲线的相关系数(r^2)和检出限(LOD)
Table 2 Correlation coefficients (r^2) and the limits of detection(LOD) of standard curves

元素	检出限 LOD($\mu\text{g/L}$)	线性 r^2
Mn	0.013 2	0.999 949
Cr	0.009 6	0.999 383
Co	0.000 6	0.999 095
Ni	0.085 7	0.999 357
Cu	0.008 7	0.999 329
Zn	0.323 9	0.998 510
As	0.004 3	0.999 994
Se	0.065 9	0.999 992
Cd	0.002 2	0.999 939
Sb	0.600 7	0.997 500
Hg	0.052 6	0.999 524
Pb	0.043 0	0.996 160

非致癌物所致健康危害的风险模型为 $R_j = D_j \times 10^{-6} / (RfD_j \cdot 70)$ 。 R_j 为化学非致癌物经摄入途径产生的年平均个人健康风险; RfD_j 为化学非致癌物经摄入途径参考剂量 [$\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$]; 70 为平均期望寿命^[23-24]。

D_i 为学生经饮用水途径单位体重日平均暴露剂量 [$\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$] = 日单位体重摄入饮水量 [$\text{mL}/(\text{kg} \cdot \text{d})$] \times [学校直饮水中暴露元素含量 ($\mu\text{g/L}$) $\times R$ + 住宅自来水中暴露元素含量 ($\mu\text{g/L}$) $\times (1-R)$] $\times 10^{-6}$ 。 R 为学生在学校摄入饮水量占饮用水摄入总量的比值, 可依据暴露时间(日在校时间)和暴露频率(年入学天数)计算。据研究显示我国城市中小生日单位体重摄入饮水量约在 13~30 $\text{mL}/(\text{kg} \cdot \text{d})$, 均值约为 24 $\text{mL}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ^[25]。

饮用水中重金属元素的毒性作用为相加作用, 总健康风险 $R_{\text{总}} = R_i + R_j$ 。致癌物的致癌强度系数及非致癌物的参考剂量来源于 IARC 和 WHO 编制的分类系统(表 3)。此外, 本研究采用蒙特卡罗模拟法, 在 Excel 环境下, 运行 Oracle Crystal Ball 11.1.2.4 软件进行运算, 对暴露及健康风险评价的不确定性进行评估。

2 结果

2.1 饮用水中重金属元素含量

饮用水中共检出 12 种重金属元素, 各元素含量见表 4, 各元素数据通过 Oracle Crystal Ball 软件的拟合分布(Batch Fit Tool)功能检测, 均符合对数正态分布。自来水样品中, Cr、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Sb 8 种元素在全部样品都有检出, Mn、Se、Hg、Pb 4 种元素仅在部分水样中被检出, 而在直饮水样品

表 3 致癌强度系数及参考剂量
Table 3 Carcinogenic intensity coefficient and reference dose value

经饮用水途径		经饮用水途径	
致癌物	致癌强度系数 $qi[\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})]$	非致癌物	致癌强度系数 $RfDi[\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})]$
Cr	41.0	Pb	1.4×10^{-3}
As	15.0	Hg	1×10^{-4}
Cd	6.1	Sb	8.6×10^{-4}
		Zn	0.3
		Cu	5×10^{-3}

中, Cr、Co、Ni、Cu、Zn 5 种元素在所有水样中被检出, 其余元素只在部分样品中被检出。与北京、上海及江苏省总体水质情况比较可见, 自来水和直饮水中的 As、Zn 含量都超过江苏省饮用水含量均值^[26] ($0.5 \mu\text{g/L}$ 、 $5 \mu\text{g/L}$), 自来水中 Cu 含量较高 ($9.456 \mu\text{g/L}$ 、 $25.68 \mu\text{g/L}$), 超过北京城区^[27] ($3.37 \mu\text{g/L}$) 和上海市主要饮用水中 Cu 含量^[28] (黄浦江上游 $6.61 \mu\text{g/L}$, 陈行水库 $1.35 \mu\text{g/L}$)。有研究表明, 地表水中元素的含量受季节变化的显著影响^[29]。本研究也发现, 不同季节水量大小变化对自来水中某些元素(Mn、Cu、Zn)的含量有一定影响。

2.2 饮用水中重金属元素健康风险评价

选取 As、Cr、Cd、Hg、Pb、Sb、Zn、Cu 这 8 种对人体危害较大的重金属元素, 根据饮用水中重金属元素的致癌、非致癌健康风险计算模型, 结合学校、住宅重金属元素含量的分布函数、经饮用水途径的致癌强度系数参考剂量以及学生饮用水摄入量及各暴露参数, 运用 Crystal Ball 软件中的蒙特卡罗模拟法, 模拟次数 10 000 次, 可得到以下分析结果。

致癌物(As、Cr、Cd)和非致癌物(Hg、Pb、Sb、Zn、Cu)经饮用水途径单位体重日暴露剂量的累计概率分布见图 1。As、Cr、Cd、Hg、Pb、Sb、Zn、Cu 日暴露剂量的均值分别为 17.9、1.72、1.62、0.723、7.70、40.4、835、1 322 $\text{ng}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 。As 和 Zn、Cu 的日暴露剂量在致癌物中和非致癌物中高于其他元素, 这与它们在饮用水的浓度较高有关。

饮用水 As、Cr、Cd、Hg、Pb、Sb、Zn、Cu 和总健康年风险值概率分布情况及各元素年健康风险累计概率分布情况见图 2、3。致癌物(As、Cr、Cd)的年致癌风险均值分别为 1.6×10^{-6} 、 1.5×10^{-7} 、 1.4×10^{-7} 。在概率为 95% 时, 饮用水中 As 的致癌风险最大, 风险值为 2.9×10^{-6} 。致癌物对学生的致癌风险在 95% 概率条件下风险值的大小顺序排列为 As > Cd > Cr。非致癌物(Hg、Pb、Sb、Zn、Cu)的年健康风险均值分别 $1.0 \times$

表 4 南京市某區中小學生飲用水中暴露元素濃度

Table 4 Element concentration in drinking water in primary and middle schools in a District of Nanjing City ($\mu\text{g/L}$)

元素	4 月自來水(n=19)		9 月自來水(n=19)		直飲水(n=57)	
	中位數	範圍	中位數	範圍	中位數	範圍
Mn	0.820	0.042~3.359	0.331	0.016~0.859	0.121	<LOD~1.534
Cr	0.071	0.014~0.117	0.084	0.012~0.147	0.072	0.022~0.190
Co	0.023	0.001~0.065	0.021	0.001~0.050	0.013	0.001~0.065
Ni	0.745	0.250~7.092	0.700	0.279~36.220	0.448	0.170~5.500
Cu	9.456	0.058~91.080	25.680	0.251~93.590	0.759	0.026~89.810
Zn	44.540	3.581~124.800	26.270	3.194~1.302	13.920	2.056~98.570
As	0.846	0.006~1.396	0.978	<LOD~1.610	0.614	<LOD~2.255
Se	0.153	<LOD~0.321	0.159	<LOD~0.432	0.130	<LOD~0.314
Cd	0.038	<LOD~0.694	0.028	<LOD~0.759	0.012	<LOD~2.699
Sb	1.957	1.333~2.333	1.899	1.146~5.782	1.278	<LOD~1.974
Hg	<LOD	<LOD~0.089	<LOD	<LOD~0.079	<LOD	<LOD~0.087
Pb	0.223	<LOD~2.232	0.161	<LOD~0.775	0.035	<LOD~2.129

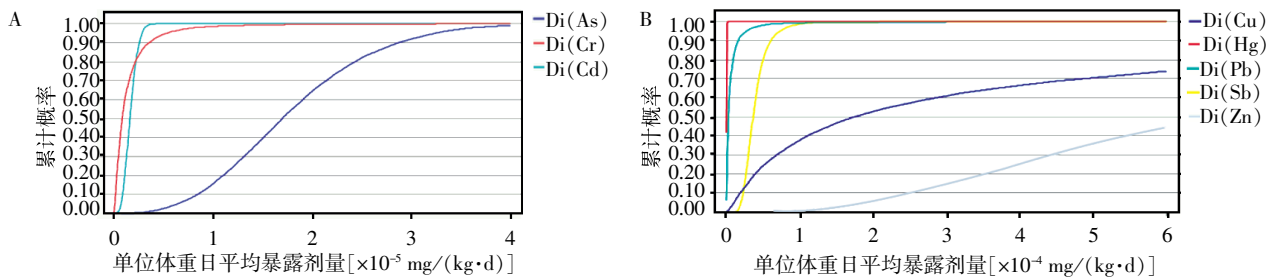


圖 1 致癌物(A)、非致癌物(B)經飲用水途徑單位體重日平均暴露劑量

Figure 1 The average exposure dose of carcinogen(A) and non-carcinogen(B) by drinking water

10^{-10} 、 8.0×10^{-11} 、 6.8×10^{-7} 、 4.0×10^{-11} 、 3.9×10^{-9} ，在概率為 95% 時，Sb 的非致癌健康風險最大，風險值為 1.2×10^{-6} 。非致癌物對學生的健康風險在 95% 概率條件下風險值的大小順序排列為 $\text{Sb} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Hg} > \text{Zn}$ 。重金屬元素的總健康風險均值為 2.5×10^{-6} ，範圍為 $5.2 \times 10^{-7} \sim 8.5 \times 10^{-5}$ 。

2.3 敏感度分析

為了分析健康風險評價模型中各參數的不確定性對評價結果的影響，本研究對健康風險進行了敏感度分析，分析結果見圖 4。水樣中重金屬元素的濃度對健康風險貢獻率最高（住宅水樣 As 含量占 38.3%，學校水樣 As 含量占 7.1%，住宅水樣 Sb 含量占 5.3%，住宅水樣 Cd 含量占 2.0%，學校水樣 Sb 含量占 0.4%）。其次是學生飲用水攝入量，占 41.5%。此外，Cd 的致癌強度係數占 3.9%，Sb 的參考劑量，占 0.6%。

3 討論

飲用水衛生問題對公眾健康影響巨大，近年來，已有研究者對我國某些地區飲用水重金屬健康風險進行了評估。深圳市飲用水源水中健康風險從

大到小排列為 $\text{Cr}^{6+} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Se} > \text{Pb} > \text{Hg}$ ^[30]。上海市黃浦江上游地區和陳行水庫重金屬類致癌物的年健康風險遠大於非致癌物，其中黃浦江上游地區 Cr 風險最大，As 次之，陳行水庫 As 的風險最大，Cr 次之。嘉陵江重慶段各主要飲用水水源地水體中 Cr^{6+} 的致癌風險最高，As 和 Cd 次之^[31]。廣西省某市飲用水水源地水體中非致癌物健康風險遠低於致癌物，致癌物健康風險由高到低排列順序為 $\text{Cr} > \text{As} > \text{Cd}$ ^[32]。本研究發現，與國內其他地區飲用水狀況相似，南京市某區中小學生飲用水致癌物的年健康風險高於非致癌物。非致癌物中 Sb 的年健康風險略高，接近 1×10^{-6} ，Hg、Pb、Zn、Cu 的年健康風險都遠低於 1×10^{-6} ，造成的潛在健康風險較小。而致癌物中 As 的年致癌風險超過 1×10^{-6} ，這表明，飲用水中的 As 對中小學生造成的致癌風險較高，需引起重視。有研究顯示，砷的致癌機制與導致染色體異常、干擾 DNA 甲基化和誘發活性氧(ROS)等有一定關係，可造成肺癌、肝癌、皮膚癌、腎癌和膀胱癌等多種腫瘤^[33]，危害人體健康。飲用水中重金屬元素的總健康風險均值为 2.5×10^{-6} ，超過國外一些機構(瑞典環境保護局、英國皇家協會)推薦的環境化學污染物最大可接受年

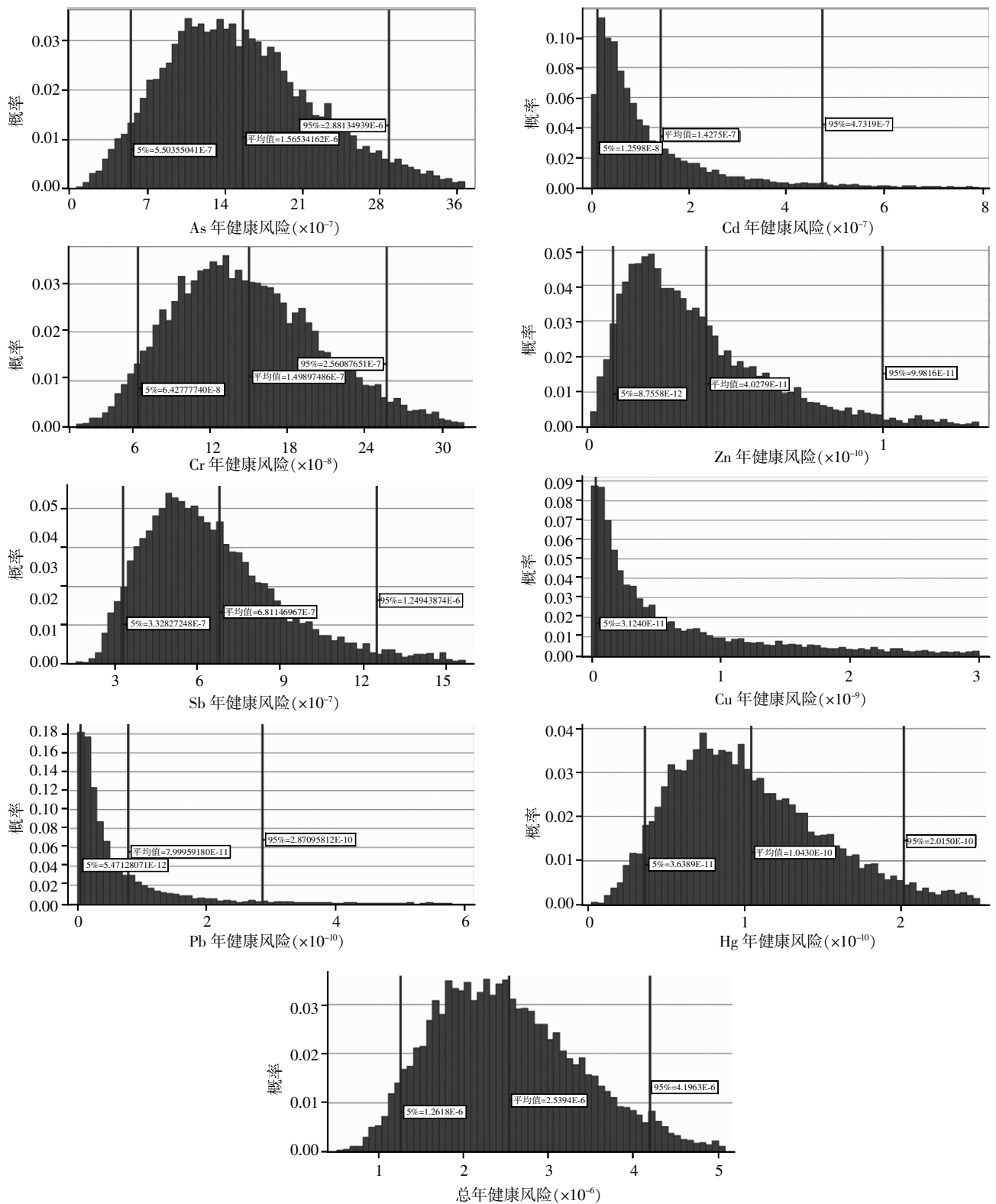


图 2 饮用水中金属类金属元素健康年风险概率分布图

Figure 2 Distribution of annual risk health probability of metal and metalloid elements in drinking water

健康风险水平(1×10^{-6}),由此可见,饮用水中的重金属元素对南京市某区中小学生的健康有潜在不良影响。而由敏感度分析结果可知,饮用水中重金属元素的浓度,是健康风险的主要影响因素之一,只要采取相应

措施,降低饮用水中重金属元素的含量,就可以使学生的健康风险显著降低,从而为中小学生的健康成长提供更优质的环境条件。因此,相关职能部门应采取有效措施,加强水源地环境保护,优化水厂处理工艺,

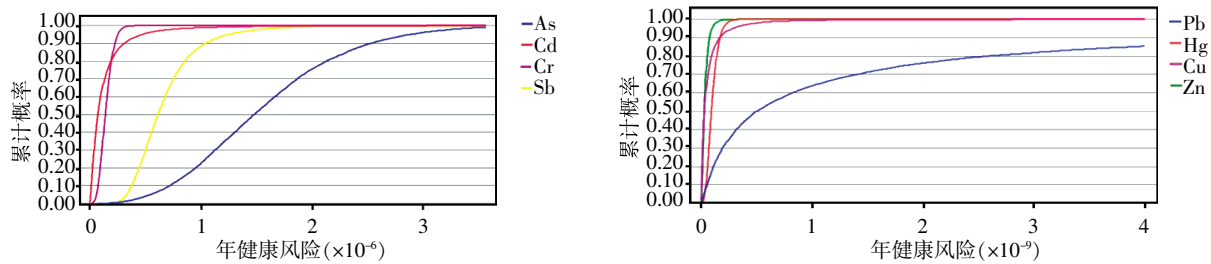


图 3 各元素年健康風險累積概率分布

Figure 3 Distribution of annual risk health probability of each element

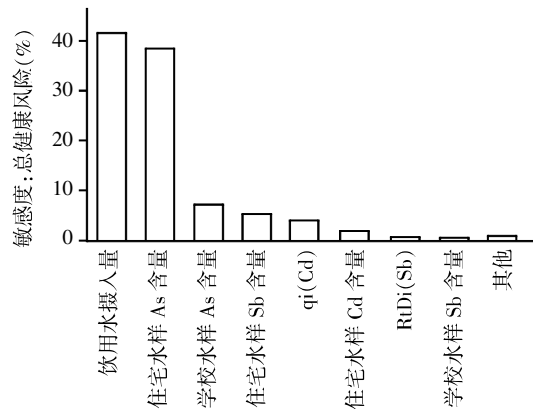


图 4 年健康風險敏感度分析

Figure 4 Sensitivity analysis of annual health risk

加大水質監測力度,進一步降低飲用水中重金屬元素特別是 As、Sb 的含量。需要注意的是,本研究僅考慮了經飲用水途徑暴露的重金屬元素對學生的健康風險,而實際生活中學生經吸入、食入、皮膚接觸等途徑也會攝入重金屬元素,因此重金屬的總暴露劑量和導致的健康風險應該高於本研究的評估值,需要在後續研究中進一步探討。

[參考文獻]

[1] Fu J, Hu X, Tao X, et al. Risk and toxicity assessments of heavy metals in sediments and fishes from the Yangtze River and Taihu Lake, China [J]. Chemosphere, 2013, 93 (9): 1887-1895

[2] Hao Y, Chen L, Zhang X, et al. Trace elements in fish from Taihu Lake, China: levels, associated risks, and trophic transfer [J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2013, 90: 89-97

[3] Liu X, Song Q, Tang Y, et al. Human health risk assessment of heavy metals in soil-vegetable system: a multi-medium analysis [J]. Sci Total Environ, 2013, 463-464: 530-540

[4] Yi YJ, Zhang SH. Heavy metal (Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) concentrations in seven fish species in relation to fish size and location along the Yangtze River [J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2012, 19(9): 3989-3996

[5] Alomary A. Determination of trace metals in drinking water in Irbid City-Northern Jordan [J]. Environ Monit As-

sess, 2013, 185(2): 1969-1975

[6] Li S, Zhang Q. Risk assessment and seasonal variations of dissolved trace elements and heavy metals in the Upper Han River, China [J]. J Hazard Mater, 2010, 181(1/3): 1051-1058

[7] Chaudhari PR, Gupta R, Gajghate DG, et al. Heavy metal pollution of ambient air in Nagpur City [J]. Environ Monit Assess, 2012, 184(4): 2487-2496

[8] Lu Y, Khan H, Zakir S, et al. Health risks associated with heavy metals in the drinking water of Swat, northern Pakistan [J]. J Environ Sci (China), 2013, 25(10): 2003-2013

[9] Salazar MJ, Rodriguez JH, Leonardo Nieto G, et al. Effects of heavy metal concentrations (Cd, Zn and Pb) in agricultural soils near different emission sources on quality, accumulation and food safety in soybean [Glycine max (L.) Merrill] [J]. J Hazard Mater, 2012, 233-234: 244-253

[10] Magge H, Sprinz P, Adams WG, et al. Zinc protoporphyrin and Iron deficiency screening: trends and therapeutic response in an urban pediatric center [J]. JAMA Pediatr, 2013, 167(4): 361-367

[11] Zoni S, Lucchini RG. Manganese exposure: cognitive, motor and behavioral effects on children: a review of recent findings [J]. Curr Opin Pediatr, 2013, 25(2): 255-260

[12] 趙桂亮, 吳志英. COMMD1/MURR1 基因及其與銅代謝疾病關係的研究進展 [J]. 中華神經科雜誌, 2009, 42(5): 346-348

[13] 丁小波, 文利新, 牛同利. 微量元素鋅的毒性研究 [J]. 微量元素與健康研究, 2007, 24(6): 64-66

[14] Calderon RL. The epidemiology of chemical contaminants of drinking water [J]. Food Chem Toxicol, 2000, 38 (1 Suppl): S13-S20

[15] Brodtkin E, Copes R, Mattman A, et al. Lead and mercury exposures: interpretation and action [J]. CMAJ, 2007, 176 (1): 59-63

[16] 任仁, 黃俊. 哪些物質屬於內分泌干擾物 (EDCs) [J]. 安全與環境工程, 2004, 11(3): 7-10

[17] 劉飛, 王馨, 祝鵬飛. 淮北礦區塌陷湖水中鎘分布和環境評價分析 [J]. 中國科學技術大學學報, 2012, 42 (1): 26-30

- [18] Grandjean P, Landrigan PJ. Developmental neurotoxicity of industrial chemicals[J]. *Lancet*, 2006, 368(9553): 2167-2178
- [19] Rodríguez-Barranco M, Lacasaña M, Aguilar-Garduño C, et al. Association of arsenic, cadmium and manganese exposure with neurodevelopment and behavioural disorders in children; a systematic review and meta-analysis [J]. *Sci Total Environ*, 2013, 454-455: 562-577
- [20] Palmer RF, Blanchard S, Stein Z, et al. Environmental Mercury release, special education rates, and autism disorder: an ecological study of Texas[J]. *Health Place*, 2006, 12(2): 203-209
- [21] Jederberg WW, Still KR, Briggs GB. The utilization of risk assessments in tactical command decisions[J]. *Sci Total Environ*, 2002, 288(1/2): 119-129
- [22] Lu SY, Zhang HM, Sojinu SO, et al. Trace elements contamination and human health risk assessment in drinking water from Shenzhen, China[J]. *Environ Monit Assess*, 2015, 187(1): 4220
- [23] 高继军, 张力平, 黄圣彪, 等. 北京市饮用水源水重金属污染物健康风险的初步评价[J]. *环境科学*, 2004, 25(2): 47-50
- [24] The US EPA. Available information on assessment exposure from pesticides in food[R]. U.S. Environmental Protection Agency Office of Pesticide Programs, 2000
- [25] 刘佳心. 我国四城市儿童少年饮水量及影响因素研究[D]. 重庆: 重庆医科大学, 2014
- [26] 郑浩, 于洋, 丁震, 等. 江苏省饮用水重金属污染物健康风险评价[J]. *江苏预防医学*, 2012, 23(4): 5-7
- [27] 高继军, 刘玲花, 周怀东, 等. 北京地区饮用水重金属污染物浓度分布研究[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(z1): 436-439
- [28] 孙超, 陈振楼, 张翠, 等. 上海市主要饮用水源地水重金属健康风险初步评价[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(1): 60-65
- [29] Cidu R, Biddau R. Transport of trace elements under different seasonal conditions; Effects on the quality of river water in a Mediterranean area[J]. *Appl Geochem*, 2007, 22(12): 2777-2794
- [30] 周国宏, 彭朝琼, 余淑苑, 等. 深圳市饮用水源水中重金属污染物健康风险评价[J]. *环境与健康杂志*, 2011, 28(1): 50-52
- [31] 刘跃晨, 王云, 吴树宝, 等. 重庆嘉陵江干流饮用水源地水质分析与健康风险评价[J]. *水文*, 2013, 33(3): 91-96, 46
- [32] 黄睿智, 班美玲, 苏相琴, 等. 广西某城市饮用水源地重金属健康风险评价[J]. *工业安全与环保*, 2015, 41(6): 21-24
- [33] 郭秀琴, 郭小娟, 刘志跃. 砷致癌机制的研究进展[J]. *中华地方病学杂志*, 2015, 34(1): 74-75

[收稿日期] 2016-03-27

(上接第 879 页)

- [19] Chen Z, Wang J, Bao L, et al. Human monoclonal antibodies targeting the haemagglutinin glycoprotein can neutralize H7N9 influenza virus [J]. *Nat Commun*, 2015, 6(3): 6714
- [20] Kellner C, Derer S, Valerius T, et al. Boosting ADCC and CDC activity by Fc engineering and evaluation of antibody effector functions [J]. *Methods*, 2014, 65(1): 105-113
- [21] Tan GS, Krammer F, Eggink Det al. A pan-H1 anti-hemagglutinin monoclonal antibody with potent broad-spectrum efficacy in vivo[J]. *J Virol*, 2012, 86(11): 6179-6188
- [22] To KK, Zhang AJ, Chan AS, et al. Recombinant influenza A virus hemagglutinin HA2 subunit protects mice against influenza A (H7N9) virus infection[J]. *Arch Virol*, 2015, 160(3): 777-786
- [23] Varecková E, Mucha V, Kostolansk F, et al. HA2-specific monoclonal antibodies as tools for differential recognition of influenza A virus antigenic subtypes[J]. *Virus Res*, 2008, 132(1/2): 181-186

[收稿日期] 2016-01-17