

考虑参数不确定性的地下饮用水源地水质健康风险评价

郑德凤¹, 赵锋霞¹, 孙才志^{1,2}, 臧 正¹, 苏 琳¹

(1. 辽宁师范大学城市与环境学院, 辽宁 大连 116029; 2. 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 辽宁 大连 116029)

摘要:首先引入环境健康风险评价模型,考虑模型中部分参数的不确定性,采用三角模糊数表征暴露参数的区间范围,选取风险管理易接受的可信度水平对暴露参数的区间数进行转化,建立基于三角模糊数的水质健康风险评价模型,对饮用水源地地下水中化学致癌物和非致癌污染物通过饮水途径、皮肤接触和呼吸途径所致健康危害的风险率进行了分析与计算。以盘锦市6个地下饮用水源地的水质分析资料为例,应用上述水质健康风险评价模型,分别对水中化学致癌物和非致癌物经饮水、皮肤接触和呼吸途径所致人体健康风险进行评价。结果表明致癌物对人体健康危害远大于非致癌物,非致癌物所致人体健康风险不受关注。污染物经饮水途径所致人体健康危害大于呼吸途径和皮肤接触途径,呼吸途径和皮肤接触途径所致人体健康风险可以忽略。化学致癌物所致人体健康危害排序为 $\text{Cr}^{6+} > \text{As} > \text{Cd}$,非致癌物所致人体健康风险排序为氟化物>铅>铜>锰>锌>铁>汞>氨氮>氰化物>挥发酚。水源地上大洼水源地存在的致癌风险率最大,其次是兴一和兴南水源地,石山、高升和盘东水源地存在的致癌风险最小。据此可确定各饮用水源地水中污染物的主次及治理的优先顺序,为饮用水源污染的风险管理提供依据。

关键词:健康风险;饮用水源;三角模糊数;致癌物;非致癌物

中图分类号:X820.4

文献标识码:A

文章编号:1000-0690(2015)08-1007-07

近年来,中国水环境污染问题十分突出,越来越多的饮用水源地受到不同程度污染,饮用水源水质安全受到严重威胁。饮用水中部分毒害物质如化学致癌物即使含量甚微,也会对人体健康造成严重危害甚至危及生命。因此在常规的生活饮用水源水质评价中,逐步引入水污染物的健康风险评价,不仅定性分析污染物的毒性和污染物是否严重,而且将污染程度与人体健康定量联系起来,以风险值大小来直观表达其对人体危害,对饮用水源地水质健康风险进行合理评价具有重要的现实意义和应用价值。

水质健康风险评价多以风险度作为评价指标计算某项污染组分可能对人体健康产生危害效应的几率,并依据风险表征标准确定风险程度与风险等级。美国较早地开展了环境健康风险方面的研究,先后制定了一系列健康风险评价的指导性

文件、准则和指南^[1,2],加拿大、瑞典和波兰等国在其基础上构建了适合本国的健康风险评价体系。中国自1990年开始对水环境健康风险进行评价并取得一定的研究成果。胡二邦论述了水环境健康风险评价的定义、内容与评价程序^[3];曾光明、耿福明、钱家忠、李如忠、陈炼钢、苏伟等分别针对某一地区(城市)或某河段的水质污染状况,对部分污染物进行了健康风险评价^[4-14];金菊良、李如忠等提出随机模拟与三角模糊数耦合的地下水环境系统综合风险评价模型^[15,16];邹滨等评价了水源地污染物对人体健康危害的时空差异和污染源特点^[17]。此外还就健康风险评价中的暴露途径、暴露参数及性别年龄等方面进行了相关研究^[18-20]。本文引入环境健康风险评价模型,对盘锦市地下饮用水源地水中致癌物和非致癌污染物通过饮水途径、皮肤接触和呼吸途径所致健康危害的风险率进行

收稿日期:2014-02-28; **修订日期:**2014-05-13

基金项目:教育部人文社会科学研究规划基金项目(14YJAZH112);辽宁省教育厅人文社会科学重点研究基地项目(ZJ2014034);辽宁经济社会发展立项课题(2015lslktxjc-03)资助。

作者简介:郑德凤(1970-),女,黑龙江伊春人,副教授,博士,主要从事水资源评价与管理研究。E-mail: defengzheng@lnnu.edu.cn

了分析与计算。评价过程中对部分参数考虑其不确定性,采用三角模糊数对评价参数的区间数进行转化,进而计算出相应风险率的区间范围,确定各饮用水源地地下水中污染物所致健康危害的风险大小、污染物的主次及治理顺序,为水源污染风险管理提供依据。

1 水质健康风险评价模型与标准

水质健康风险评价主要针对水体中对人体有毒有害的物质进行评价,包括化学致癌物、放射性污染物和非致癌污染物,其中放射性污染物在水体中含量甚微可忽略其健康风险。饮用水源中这些毒害物质主要通过直接饮用、呼吸蒸汽和皮肤接触3种暴露途径对人体造成危害。鉴于不同污染物经不同暴露途径所致人体健康危害的机理不同,可建立相应不同的风险评价模型。

1.1 化学致癌物风险率计算模型

化学致癌物风险率是指人体暴露于某种致癌物且超过正常接受水平的致癌发病概率,计算公式为:

$$R_i = 1 - \exp(-E_i \times Q_i) \quad (1)$$

式中, R_i 为致癌物 i 经某种暴露途径导致人体终生患癌的风险,无量纲; E_i 为某种暴露途径下单位体重人体日均摄入致癌污染物 i 的质量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; Q_i 为化学致癌物 i 的致癌强度系数,表示人体终生暴露于剂量为每日每公斤体重 1mg 化学致癌物时的终生患癌风险度, $[\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})]^{-1}$ 。

1.2 非致癌污染物风险率计算模型

非致癌物风险率用风险指数表示,即长期日摄入量与非致癌物参考剂量的比值。计算公式为:

$$R_i = E_i \times 10^{-6} / RfD_i \quad (2)$$

式中, R_i 为非致癌物 i 经某种暴露途径导致人体健康危害的终生风险,无量纲; E_i 为某种暴露途径下单位体重人体日均摄入非致癌污染物 i 的质量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; 10^{-6} 为个体终生暴露于剂量为 RfD 时发生某种健康危害的概率;非致癌污染物为有阈化合物, RfD_i 为非致癌物 i 的参考剂量,表示人群终生暴露于污染物后不会产生有害效应的日均暴露水平估计值, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 。

1.3 污染物日均摄入量计算模型

由风险率计算模型可知,单位体重人体日均摄入污染物剂量是整个风险计算的关键,人体对饮用水源的暴露途径主要是饮水、皮肤接触和呼吸途径,不同暴露途径日均摄入量不同,计算模型

也不同。水质健康风险评价通常采用U.S.EPA推荐的暴露模型。饮水途径单位体重人体的日均摄入量计算模型为:

$$E_i^y = \frac{C_i \times I_R \times E_F \times E_D}{B_w \times A_T} \quad (3)$$

式中, C_i 为饮用水源中污染物 i 的浓度, mg/L ; I_R 为成人每日饮水量, L/d ; E_F 为暴露频率, d/a ; E_D 为暴露延时, a ; B_w 为人均体重, kg ; A_T 为平均暴露时间, d 。

皮肤接触途径主要考虑洗浴时对污染物的摄入,皮肤接触途径单位体重人体的日均摄入量计算模型为:

$$E_i^p = \frac{I_i \times A_s \times F_s \times E_F \times E_D}{B_w \times A_T} \quad (4)$$

式中, I_i 为每次洗浴单位面积皮肤对水体中污染物的吸附量, $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{次})$; A_s 为皮肤接触表面积, cm^2 ; F_s 为洗浴的频率, $\text{次}/\text{d}$; E_F 为暴露频率, d/a ; E_D 为暴露延时, a ; B_w 为人均体重, kg ; A_T 为平均暴露时间, d 。皮肤对污染物质的吸附量 I_i 的计算公式为^[20]:

$$I_i = 2 \times 10^{-3} \times k \times C_i \times \sqrt{\frac{6 \times t \times T_E}{\pi}} \quad (5)$$

式中, k 为皮肤吸收系数, cm/h ; C_i 为水源中污染物 i 的浓度, mg/L ; t 为水附在身上的持续时间, h ; T_E 为每次洗浴的持续时间, h 。

呼吸暴露途径的污染物来源主要有日常清洗、洗浴时水汽蒸散在室内空气中被吸入人体的污染物质。本文主要计算洗浴时吸入的污染物日均剂量,呼吸蒸汽途径日均摄入量计算模型为:

$$E_i^h = \frac{A_i \times I_R^h \times E_T \times E_F \times E_D}{B_w \times A_T} \quad (6)$$

式中, E_i^h 为污染物 i 经呼吸途径所致人体单位质量日均暴露剂量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; A_i 为水汽中污染物 i 的浓度,通常将水中污染物浓度 C_i 乘以折减系数得到 A_i , mg/m^3 ; I_R^h 为呼吸速率, m^3/h ; E_T 为呼吸途径日暴露时间, h/d ; E_F 为呼吸途径暴露频率, d/a ; E_D 为呼吸途径暴露延时, a ; B_w 为人均体重, kg ; A_T 为平均暴露时间, d 。

1.4 水质健康风险表征标准

风险表征标准包括危害效应发生的概率和人体健康危害的程度。根据风险管理水平和人体最大可接受程度,不同国家或机构推荐了不同的风险表征值,美国环保署建议风险表征标准值为 $10^{-4}/\text{a}$,国际辐射防护委员会(ICRP)建议的风险表征值为 $5.0 \times 10^{-5}/\text{a}$,瑞典环保局、荷兰建设和环境部建议致癌风险表征值为 $10^{-6}/\text{a}$ 。借鉴上述健康风险

表征标准,本文将风险等级划分为7类,对应的年风险率范围与风险程度如表1所示。

2 水质健康风险评价参数确定

2.1 风险率计算模型中的参数选取

由公式(1)、(2)可知,致癌强度系数和非致癌物参考剂量的合理选取对计算污染物的健康风险率至关重要,目前多采用U.S.EPA的IRIS系统数据,具体见表2。

2.2 基于三角模糊数的暴露参数确定

水质健康风险评价参数主要涉及人体暴露参数、污染物暴露浓度、暴露延时等,这些参数通常不是常数而是在一个区间变动,具有一定的模糊性。为准确评价污染物的危害效应,本文采用三角模糊数将上述参数表示为一定区间范围的数值进行风险计算。

2.2.1 暴露参数的三角模糊数选取

设 a_1, a_2, a_3 分别为模糊概念 \tilde{A} 的最小可能值、最可能值和最大可能值,则数组 (a_1, a_2, a_3) 构成三角模糊数,令 $\tilde{A}=(a_1, a_2, a_3)$, a_1, a_2, a_3 为实数,且 $a_1 < a_2 < a_3$,三角模糊数可看作带有隶属函数的区间数。依据U.S.EPA推荐的健康风险评价参数值,结合中国人群特征和自然社会条件,分别将成人日饮水量、成人人均体重、暴露频率、暴露延时、平均暴露时间、皮肤表面积、洗浴频率和呼吸速率的三角模糊数取为 $I_R=(1.5, 2.0, 2.5)\text{L/d}$, $B_W=(45, 65, 85)\text{kg}$, $E_F=(320, 340, 360)\text{d/a}$, $E_D=(25, 30, 35)\text{a}$, $A_T=(23725, 27375, 31025)\text{d}$, $A_S=(1.53, 1.61, 1.70)\text{m}^2$, $F_E=(0.2, 0.3, 0.4)\text{次/d}$, $I_R^h=(14.2, 16.6, 19.0)\text{m}^3/\text{d}$ 。为简便计算将皮肤吸收因子 k 、水中污染物在人体滞留时间 t 、洗浴时间 T_E 取定值,分别取 0.001 cm/h 、 1 h 、 $0.4\text{ h}^{[19]}$ 。

2.2.2 暴露参数的区间数转化

模糊变量 x 的隶属函数表示为^[15]:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \text{ 或 } x > a_3 \\ \frac{x-a_1}{a_2-a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3-x}{a_3-a_2}, & a_2 \leq x \leq a_3 \end{cases} \quad (8)$$

三角模糊数的隶属度大小表示最小可能值和最大可能值区间内各数据相对可信度的大小,不同可信度水平 α ($0 \leq \alpha \leq 1$)代表不同的数据区间。将三角模糊数 \tilde{A} 转化为与可信度水平 α 相对应的区间数,即 $\tilde{A}^\alpha = \{x | \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha, x \in X\}$,其中 \tilde{A}^α 为 \tilde{A} 的 α -截集,表示可信度水平不低于 α 的数据集合 $[a_s, a_b]$ 。则有

$$\tilde{A}^\alpha = [a_s^\alpha, a_b^\alpha] = [(a_2 - a_1)\alpha + a_1, -(a_3 - a_2)\alpha + a_3] \quad (9)$$

给定 α 将三角模糊数转化为区间值后可对其进行加减乘除四则运算或函数计算。利用公式(9)将各暴露参数的三角模糊数转化为可信度水平 $\alpha=0.8$ 的区间数,即: $I_R^\alpha = [1.9, 2.1]$, $B_W^\alpha = [61, 69]$, $E_F^\alpha = [336, 344]$, $E_D^\alpha = [29, 31]$, $A_T^\alpha = [26645, 28105]$, $A_S^\alpha = [1.594, 1.627]$, $F_E^\alpha = [0.28, 0.32]$, $I_R^{h\alpha} = [16.12, 17.1]$ 。

3 盘锦市地下饮用水源地水质健康风险评价

3.1 盘锦市地下饮用水源地概况与水质分析数据

盘锦市位于辽宁省西南部,地势总体北高南低,由北向南逐渐倾斜,地形平坦,属于辽河下游冲积平原。地下水主要赋存于第四系松散岩孔隙及上第三系碎屑岩类裂隙—孔隙中。盘锦市境内共有石山、高升、大洼、兴一、兴南和盘东6个地下

表1 水质健康风险等级划分标准

Table 1 The classified standard of all grades on health risk of groundwater quality

风险值范围	<E-06	[E-06,E-05)	[E-05,5E-05)	[5E-05,E-04)	[E-04,5E-04)	[5E-04,E-03)	>E-03
风险等级	I级	II级	III级	IV级	V级	VI级	VII级
风险程度	极低风险	低风险	低-中风险	中风险	中-高风险	高风险	极高风险

表2 致癌强度系数与非致癌物参考剂量

Table 2 Strength coefficients of chemical carcinogens and reference doses of non-carcinogens

致癌强度系数 $[\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})]^{-1}$			非致癌物参考剂量 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$									
Cr ⁶⁺	As	Cd	Zn	Mn	CN	Hg	Pb	Fe	Cu	NH ₃	酚	F
41	15	6.1	0.30	0.14	0.037	0.0003	0.0014	0.30	0.004	0.97	0.10	0.06

水源地。其中盘东水源地、石山水源地、高升水源地位于盘山县,兴南水源地和大洼水源地位于大洼县,兴一水源地位于双台子区。各地下饮用水源地的水质分析数据见表3。水质检测项目包括镉、砷、铬3种常见致癌物,氨氮、氟化物、氰化物等10种非致癌物。致癌物没有阈值限制,只要被人体吸收就会造成危害,而非致癌物在体内长期积累也会对人体造成健康损害效应,故对饮用水中污染物进行健康风险评价十分必要。

3.2 水质健康风险评价与结果分析

3.2.1 水质健康风险率计算

将转化为区间数的暴露参数代入污染物日均

摄入量计算模型(3)、(4)、(6),计算出不同暴露途径的污染物日均摄入量;再将日均摄入量分别代入化学致癌物和非致癌污染物风险率计算模型式(1)、(2)中计算出不同暴露途径污染物所致人体健康终生风险率,结果见表4和表5。

3.2.2 评价结果分析

风险评价结果显示,盘锦市6个地下饮用水源地致癌物与非致癌物对人体健康风险同时存在,但致癌风险率远大于非致癌风险率。由饮水途径、皮肤接触途径和呼吸蒸汽途径3种暴露途径导致的人体健康风险同时存在,但3种暴露途径导致的风险率差异很大,致病风险从大到小依次为饮

表3 盘锦市地下饮用水源地水质分析结果 (mg/L)

Table 3 The groundwater quality data of 6 sources of drinking water in Panjin (mg/L)

污染物种类	污染物	石山水源	高升水源	兴一水源	兴南水源	盘东水源	大洼水源
化学致癌物	As	0.004	0.004	<0.0004	<0.0004	0.004	<0.01
	Cd	0.0005	0.0005	<0.01	<0.01	0.0005	—
	Cr ⁶⁺	0.002	0.002	<0.004	<0.004	0.002	<0.004
非致癌污染物	NH ₃	0.06	0.08	0.46	0.03	0.06	—
	F	0.42	0.58	0.2	0.3	0.45	0.05
	CN	0.001	0.001	<0.002	<0.002	0.001	—
	Hg	0.00002	0.00002	<0.00002	<0.00002	0.00002	<0.00002
	Pb	0.005	0.005	<0.01	<0.01	0.005	<0.01
	Fe	0.02	0.08	1.02	0.2	0.056	<0.05
	Mn	0.025	0.043	0.012	0.08	0.025	<0.05
	Cu	0.005	0.005	<0.04	<0.04	0.005	<0.05
	Zn	0.025	0.025	<0.05	<0.05	0.025	<0.05
	酚	0.001	0.001	<0.002	<0.002	0.001	—

注:数据来源于《盘锦市饮用水水源保护区划分技术报告》,表中“<”代表检测结果小于设备最小检出值。

表4 不同暴露途径化学致癌物所致人体健康终生风险率

Table 4 Health risk rate from carcinogens by drinking water, skin touch and breathing approach

暴露途径	污染物	石山水源	高升水源	兴一水源	兴南水源	盘东水源	大洼水源
饮水途径(×10 ⁻⁴)	As	[5.73, 8.26]	[5.73, 8.26]	<[0.57, 0.83]	<[0.57, 0.83]	[5.73, 8.26]	<[14.3, 20.7]
	Cr ⁶⁺	[7.83, 11.29]	[7.83, 11.29]	<[15.7, 22.6]	<[15.7, 22.6]	[7.83, 11.29]	<[15.7, 22.6]
	Cd	[0.29, 0.42]	[0.29, 0.42]	<[5.8, 8.4]	<[5.8, 8.4]	[0.29, 0.42]	—
	总风险	[13.85, 19.97]	[13.85, 19.97]	<[22.07, 31.83]	<[22.07, 31.83]	[13.85, 19.97]	<[30.0, 43.3]
呼吸途径(×10 ⁻⁸)	As	[5.44, 8.61]	[5.44, 8.61]	<[0.54, 0.86]	<[0.54, 0.86]	[5.44, 8.61]	<[13.6, 21.5]
	Cr ⁶⁺	[7.44, 11.77]	[7.44, 11.77]	<[14.87, 23.55]	<[14.87, 23.55]	[7.44, 11.77]	<[14.87, 23.55]
	Cd	[0.27, 0.44]	[0.27, 0.44]	<[5.53, 8.76]	<[5.53, 8.76]	[0.27, 0.44]	—
	总风险	[13.15, 20.82]	[13.15, 20.82]	<[20.94, 33.17]	<[20.94, 33.17]	[13.15, 20.82]	<[28.47, 45.05]
皮肤接触途径(×10 ⁻¹⁰)	As	[2.4, 3.6]	[2.4, 3.6]	<[0.24, 0.36]	<[0.24, 0.36]	[2.4, 3.6]	<[5.9, 9.0]
	Cr ⁶⁺	[3.2, 4.9]	[3.2, 4.9]	<[6.4, 9.8]	<[6.4, 9.8]	[3.2, 4.9]	<[6.4, 9.8]
	Cd	[0.12, 0.18]	[0.12, 0.18]	<[2.4, 3.6]	<[2.4, 3.6]	[0.12, 0.18]	—
	总风险	[5.72, 8.68]	[5.72, 8.68]	<[9.04, 13.76]	<[9.04, 13.76]	[5.72, 8.68]	<[12.3, 18.8]

表5 不同暴露途径非致癌污染物所致人体健康终生风险率

Table 5 Health risk rates from non-carcinogens by drinking water, skin touch and breathing approach

暴露途径	污染物	石山水源	高升水源	兴一水源	兴南水源	盘东水源	大洼水源
饮水途径 ($\times 10^{-10}$)	氨氮	[5.9, 8.5]	[7.8, 11.3]	[45.5, 65.1]	[2.9, 4.3]	[5.9, 8.5]	—
	氟化物	[668, 964]	[924, 1330]	[322, 462]	[476, 686]	[700, 1050]	[77, 112]
	氰化物	[2.6, 3.7]	[2.6, 3.7]	<[5.2, 7.7]	<[5.2, 7.7]	[2.6, 3.7]	—
	汞	[6.4, 9.1]	[6.4, 9.1]	<[6.4, 9.1]	<[6.4, 9.1]	[6.4, 9.1]	<[6.4, 9.1]
	铅	[343, 490]	[343, 490]	<[679, 980]	<[679, 980]	[343, 490]	<[679, 980]
	铁	[6.4, 9.1]	[25.2, 36.4]	[322, 469]	[63.7, 91]	[17.5, 25.9]	<[16.1, 23.1]
	锰	[16.8, 24.5]	[29.4, 42]	[8.4, 11.9]	[54.6, 77]	[16.8, 24.5]	<[34.3, 49.0]
	铜	[119, 175]	[119, 175]	<[980, 1400]	<[980, 1400]	[119, 175]	<[1190, 1750]
	锌	[7.7, 11.2]	[7.7, 11.2]	<[16.1, 23.1]	<[16.1, 23.1]	[7.7, 11.2]	<[16.1, 23.1]
	酚	[0.98, 1.4]	[0.98, 1.4]	<[1.9, 2.7]	<[7.7, 11.2]	[0.98, 1.4]	—
	总风险	[1176.78, 1696.5]	[1466.08, 2110.1]	< [2386.5, 3430.6]	< [2291.6, 3289.4]	[1219.88, 1799.3]	< [2018.9, 2946.3]
呼吸途径 ($\times 10^{-13}$)	氨氮	[0.56, 0.89]	[0.75, 1.18]	[4.30, 6.81]	[0.28, 0.44]	[0.56, 0.89]	—
	氟化物	[63.5, 100.5]	[87.7, 138.8]	[30.2, 47.9]	[45.4, 71.8]	[68.0, 107.7]	[7.6, 11.9]
	氰化物	[2.5, 3.9]	[2.5, 3.9]	<[4.9, 7.8]	<[4.9, 7.8]	[2.5, 3.9]	—
	汞	[0.61, 0.96]	[0.61, 0.96]	<[0.61, 0.96]	<[0.61, 0.96]	[0.61, 0.96]	<[0.61, 0.96]
	铅	[32.4, 51.3]	[32.4, 51.3]	<[6.5, 10.3]	<[6.5, 10.3]	[32.4, 51.3]	<[6.5, 10.3]
	铁	[0.61, 0.96]	[2.4, 3.8]	[30.8, 48.8]	[0.61, 0.96]	[16.9, 26.8]	<[1.5, 2.4]
	锰	[1.6, 2.6]	[2.8, 4.4]	[0.78, 1.2]	[5.2, 8.2]	[1.6, 2.6]	<[2.3, 5.1]
	铜	[11.3, 17.9]	[11.3, 17.9]	<[90.7, 143.6]	<[90.7, 143.6]	[11.3, 17.9]	<[113.3, 179.5]
	锌	[0.76, 1.2]	[0.76, 1.2]	<[1.5, 2.4]	<[1.5, 2.4]	[0.76, 1.2]	<[1.5, 2.4]
	酚	[0.09, 0.14]	[0.09, 0.14]	<[0.18, 0.29]	<[0.18, 0.29]	[0.09, 0.14]	—
	总风险	[113.93, 180.35]	[141.31, 223.58]	<[170.47, 270.06]	<[155.88, 246.75]	[134.72, 213.39]	<[133.31, 212.56]
皮肤接触途径 ($\times 10^{-15}$)	氨氮	[0.24, 0.37]	[0.33, 0.49]	[1.86, 2.83]	[0.12, 0.19]	[0.24, 0.37]	—
	氟化物	[27.4, 41.8]	[37.9, 57.6]	[13.1, 19.9]	[19.6, 29.8]	[29.4, 44.8]	[3.27, 4.97]
	氰化物	[0.11, 0.16]	[0.11, 0.16]	<[0.21, 0.32]	<[0.21, 0.32]	[0.11, 0.16]	—
	汞	[0.26, 0.40]	[0.26, 0.40]	<[0.26, 0.40]	<[0.26, 0.40]	[0.26, 0.40]	<[0.26, 0.40]
	铅	[14.0, 39.8]	[14.0, 21.3]	<[28.0, 42.6]	<[28.0, 42.6]	[14.0, 21.3]	<[28.0, 42.6]
	铁	[0.26, 0.40]	[1.05, 1.60]	[13.3, 20.3]	[2.61, 3.98]	[0.73, 1.11]	<[0.65, 0.99]
	锰	[0.70, 1.06]	[1.20, 1.83]	[0.34, 0.51]	[2.24, 3.41]	[0.70, 1.06]	<[1.40, 2.13]
	铜	[4.90, 7.46]	[4.90, 7.46]	<[39.2, 59.7]	<[39.2, 59.7]	[4.90, 7.46]	<[49.0, 74.6]
	锌	[0.33, 0.50]	[0.33, 0.50]	<[0.65, 0.99]	<[0.65, 0.99]	[0.33, 0.50]	<[0.65, 0.99]
	酚	[0.04, 0.06]	[0.04, 0.06]	<[0.08, 0.12]	<[0.08, 0.12]	[0.04, 0.06]	—
	总风险	[48.24, 92.00]	[60.11, 91.40]	<[97.00, 147.68]	<[92.98, 141.51]	[50.71, 77.21]	<[83.24, 126.69]

水途径>呼吸蒸汽途径>皮肤接触途径。从表4可知,相同浓度的化学致癌物经饮水途径致癌风险明显高于经皮肤接触途径和呼吸途径4~6个数量级,与美国环保署等推荐的人体最大可接受风险值相比,污染物经饮水途径所致人体健康危害较严重,明显超过人体最大可接受风险水平。多为高风险或极高风险等级,个别水源地污染物为低中风险等级。其中大洼、石山、高升和盘东水源地Cr⁶⁺和As的致癌风险较高,每万人可能分别有7~

12和5~9人因饮用含Cr⁶⁺和As的水患癌死亡。兴一和兴南水源地中Cr⁶⁺和Cd对人体危害较大,对这些水源地存在的致癌风险必须采取有效措施加以消除或减轻。6个水源地中经呼吸途径导致人体健康风险最大的为大洼水源地,其次为兴一和兴南水源地,每千万人中约有2~5人因洗浴过程中呼吸含致癌物水汽而患癌致死;经皮肤接触途径所致人体健康危害最大的大洼水源地风险率为1.23×10⁻⁹~1.88×10⁻⁹,即每亿人中有1~2人因洗浴过

程中皮肤接触水体中致癌物而患癌致死,故呼吸途径和皮肤接触途径所致人体健康危害一般不会引起人们关注。

图1显示盘锦市大洼、石山、高升和盘东地下饮用水源地化学致癌物的风险率为 $\text{Cr}^{6+} > \text{As} > \text{Cd}$,而兴一和兴南水源地化学致癌物的风险率为 $\text{Cr}^{6+} > \text{Cd} > \text{As}$ 。6个水源地按总风险率大小排序为大洼、兴一、兴南、石山、高升和盘东。

由表5可知,非致癌物氨氮、氟化物、氰化物、汞、铅、铁、锰、铜、锌、挥发酚等经饮水途径、皮肤接触途径和呼吸途径所致人体健康风险多小于 10^{-9} ,即每亿人中不到1人受到非致癌物的有害影响,通常人们不愿意关心这类风险。饮水途径是非致癌物进入人体的重要途径,氟化物、铅和铜经饮水途径导致人体健康危害的风险较大,氟化物在高升水源地中危害最大为 $9.24 \times 10^{-8} \sim 13.3 \times 10^{-8}$,即每千万人

中有9~14人因饮用高升水源中的水而受到氟化物的危害。非致癌物总风险按大小排序为:氟化物>铅>铜>锰>锌>铁>汞>氨氮>氰化物>挥发酚。

4 结 论

依据盘锦市6个地下饮用水源地的水质分析资料,应用基于三角模糊数和区间数理论的水质健康风险评价模型,分别对水体中的化学致癌物和非致癌污染物进行了健康风险评价,结果表明致癌物对人体健康危害远大于非致癌物,非致癌物所致人体健康风险不受关注。污染物经饮水途径所致人体健康危害大于呼吸途径和皮肤接触途径,呼吸途径和皮肤接触途径所致人体健康风险可以忽略。水源地中大洼水源地存在的致癌风险率最大,其次是兴一和兴南水源地,盘山县的石山、高升和盘东水源地存在的致癌风险最小。

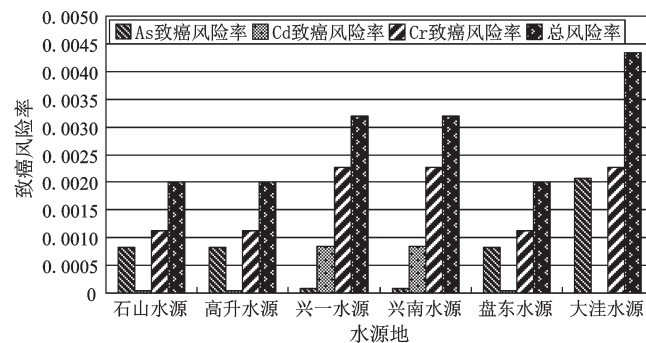


图1 盘锦市地下饮用水源地化学致癌物经饮水途径致癌风险率(区间最大值)

Fig.1 Maximum health risk rate from carcinogens by drinking water approach in 6 groundwater sources in Panjin

参考文献:

- [1] U.S.National Research Council. Risk assessment in the federal government: managing the process[M]. Washington, D.C.: National Academy Press, 1983.
- [2] U.S.EPA. The risk assessment guidelines of 1986[S]. EPA Report no. EPA/600/18-87/045, Washington, D.C.
- [3] 胡二邦. 环境风险评价实用技术、方法和案例[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [4] 曾光明, 卓利, 钟政林, 等. 水环境健康风险评价模型[J]. 水科学进展, 1998, 9(3): 212~217.
- [5] 耿福明, 薛联青, 陆桂华, 等. 饮用水源水质健康危害的风险度评价[J]. 水利学报, 2006, 37(10): 1242~1245.
- [6] 陈炼钢, 陈敏建, 丰华丽. 基于健康风险的水源地水质安全评价[J]. 水利学报, 2008, 39(2): 235~239.
- [7] 苏伟, 刘景双, 王洋. 第二松花江干流水环境健康风险评价[J]. 自然资源学报, 2007, 22(1): 79~85.
- [8] 郑德凤, 史延光, 崔帅. 饮用水源地水污染物的健康风险评价[J]. 水电能源科学, 2008, 26(6): 48~50.
- [9] 孙树青, 胡国华, 王勇泽, 等. 湘江干流水环境健康风险评价[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(2): 12~15.
- [10] 黄奕龙, 王仰麟, 谭启宇, 等. 城市饮用水源地水环境健康风险评价与风险管理[J]. 地学前缘, 2006, 13(3): 162~167.
- [11] 汤洁, 陈初雨, 李海毅, 等. 大庆市建成区土壤重金属潜在生态危害和健康风险评价[J]. 地理科学, 2011, 31(1): 117~122.
- [12] Yang X.H., Zhang X.J., Hu X.X. Nonlinear Optimization Set Pair Analysis Model (NOSPAM) for Assessing Water Resource Renewability[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2011, 18: 599~607.
- [13] 陈强, 杨晓华, 杨志峰. 基于熵权的TOPSIS法及其在水环境质量综合评价中的应用[J]. 环境工程, 2007, 25(4): 75~55.
- [14] 钱家忠, 李如忠, 汪家权, 等. 城市供水水源地水质健康风险评价[J]. 水利学报, 2004, 35(8): 90~93.
- [15] 金菊良, 刘丽, 汪明武, 等. 基于三角模糊数随机模拟的地下水

- 环境系统综合风险评价模型[J].地理科学,2011,**31**(2):143~147.
- [16] 李如忠,汪明武,金菊良.地下水环境风险的模糊多指标分析方法[J].地理科学,2010,**30**(2):229~235.
- [17] 邹 滨,曾永年,Benjamin F.Zhan,等.城市水环境健康风险评价[J].地理与地理信息科学,2009,**25**(2):94~97.
- [18] 王宗爽,武 婷,段小丽,等.环境健康风险评价中我国居民呼吸速率暴露参数研究[J].环境科学研究,2009,**22**(10):1171~1175.
- [19] 杨全锁,郑西来,许延营,等.青岛市黄岛区饮用水源健康风险评价[J].安全与环境学报,2008,**8**(2):83~86.
- [20] 王 喆,刘少卿,陈晓民,等.健康风险评价中中国人皮肤暴露面积的估算[J].安全与环境学报,2008,**8**(4):152~156.

Health Risk Assessment of Groundwater Quality in Source of Drinking Water Based on the Uncertain Parameters

ZHENG De-feng¹, ZHAO Feng-xia¹, SUN Cai-zhi^{1,2}, ZANG Zheng¹, SU Lin¹

(1. School of Urban Planning and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China; 2. Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China)

Abstract: The assessment model of environmental health risk was firstly introduced in this article. Considering the uncertainty of some parameters in the model, triangle fuzzy number was used to express interval range of exposure parameters. The interval range of exposure parameters was transformed into interval estimate by choosing acceptable reliability level of risk management. Then the model on health risk of groundwater quality based on triangle fuzzy number was established. By using the above model, interval estimates of the health risk rate from carcinogens and non-carcinogens by drinking water, skin touch and breathing approach could be respectively calculated in the sources of drinking groundwater. Furthermore, taking the 6 sources of drinking groundwater in Panjin as an example, the health risk rates from carcinogens and non-carcinogens by drinking water, skin touch and breathing approach were respectively calculated according to the groundwater quality data of 6 sources of drinking water. The results showed that the risk rates from carcinogens to human health were greatly bigger than risk rates from non-carcinogens, so risk from non-carcinogens wasn't usually paid attention by people. The health risk rates from all the contaminants by drinking water were greater than the risk rates by breathing and skin touch approach which can be generally neglected. The health risk rates from carcinogens by drinking water had already exceeded the risk attribute values proposed by U.S.EPA and badly endangered the health of the residents. The health risk rates from carcinogens by breathing and skin touch approach were less than the risk attribute values and had little harm to the people. The ranking of risk values from chemical carcinogens was chromium (VI), Arsenic, Cadmium, and the ranking of risk values from non-carcinogens was Fluoride, Lead, Copper, Manganese, Zinc, Iron, Mercury, Ammonia, Cyanide, Volatile phenol. Among these sources of drinking groundwater in Panjin, the health risk values from all the contaminants in Dawa groundwater source was highest, the risk values in Xingyi and Xingnan groundwater sources were in the middle, and the risk values in Shishan, Gaosheng and Pandong groundwater sources were the least. Lastly, on the basis of above-calculated health risk rates from carcinogens and non-carcinogens in the sources of drinking groundwater in Panjin, we could conclude that some contaminants were primary and the other contaminants were secondary. The priority of remediation would be given to those primary contaminants. All the results of health risk assessment could provide a reference and basis for risk management of contamination and setting down conservancy measures in the sources of drinking groundwater in Panjin.

Key words: health risk; source of drinking water; triangle fuzzy number; chemical carcinogen; non-carcinogen