



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.03.014

陈洁, 钱会, 吴昊. 基于三角模糊数的地下水饮用水源地水环境健康风险评价[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 80-85. CHEN Jie, QIAN Hui, WU Hao. Health risk assessment of water environment in drinking groundwater well fields based on triangular fuzzy number theory[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 80-85. (in Chinese)

基于三角模糊数的地下水饮用水源地水环境健康风险评价

陈洁^{1,2}, 钱会^{1,2}, 吴昊^{1,2}

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 西安 710054; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054)

摘要: 为客观反映水体污染物对人体健康的潜在危害, 基于三角模糊数理论, 构建了水环境健康风险评价模糊模型, 对石嘴山市地下水饮用水源地水环境健康风险进行了评价, 分析了不确定信息对评价结果的影响。结果表明: 健康风险评价结果对参数的不确定性不敏感; 污染物浓度的不确定性对评价结果影响较大, 不考虑污染物浓度变化, 以平均浓度表示水体水质状况会导致风险评价结果偏小。石嘴山市地下水饮用水源地非致癌污染物健康风险极低, 而致癌总风险均低于且接近 $1.0 \times 10^{-4} a^{-1}$, Cr 为各水源地首要的环境健康风险管理控制指标。水环境健康风险由高到低依次排序为第二水源地 > 第五水源地 > 第四水源地 > 第一水源地。

关键词: 地下水; 不确定性; 三角模糊数; 健康风险评价; 水源地

中图分类号: TV 213 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 1683(2017) 03-0080-06

Health risk assessment of water environment in drinking groundwater well fields based on triangular fuzzy number theory

CHEN Jie^{1,2}, QIAN Hui^{1,2}, WU Hao^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to better determine the potential impacts of water contaminants on public health, a fuzzy model based on triangular fuzzy number theory was developed to evaluate the human health risk of drinking groundwater well fields in Shizuishan city in this paper, and then the effects of uncertainties on health risks were analyzed. The results showed that the health risk is not sensitive to the parameter value related uncertainty. The pollutant concentration related uncertainty plays an important role in the assessment. If the changes in concentration are not taken into account, the calculated risks will be smaller. By using the above model, we obtained the health risks of carcinogens and noncarcinogens in the drinking water well fields of Shizuishan. The chemical carcinogenic risks are much larger than the noncarcinogenic risks, which are all close to the permissible level of $1.0 \times 10^{-4} a^{-1}$. Cr should be the priority concern in the water resource management due to the high carcinogenic risk. The human health risks of the water environment are ranked as follows: NO. 2 well field > NO. 5 well field > NO. 4 well field > NO. 1 well field.

Key words: groundwater; uncertainty; triangular fuzzy number; health risk assessment; well field

收稿日期: 2016-03-18 修回日期: 2016-05-02 网络出版时间: 2017-05-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170506.1647.024.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172212; 41572236); 长安大学博士生助研科技项目(2014G5290005); 长安大学优秀博士学位论文培育资助项目(310829150002; 310829165005)

Funds: National Natural Science Foundation of China(41172212; 41572236); Chang'an University Doctoral Research Project of Science and Technology(2014G5290005); Project Supported By the Doctoral Dissertation of Chang'an University(310829150002; 310829165005)

作者简介: 陈洁(1988), 女, 陕西安康人, 博士研究生, 主要从事地下水资源可持续开发、利用与保护等方面研究。E-mail: chenjie0705@gmail.com

通讯作者: 钱会(1963), 男, 陕西泾阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文地质与水资源可持续开发、利用与保护方面的教学与研究。E-mail: qianhui@chd.edu.cn

随着我国城市化、工业化进程的加快,水污染问题日益凸显^[1]。饮用水源地水体水质状况对人类的健康具有直接的影响,保障饮用水源安全已成为水资源管理、水污染控制与防治工作的重点^[2-4]。

水环境健康风险评价可定量描述水体污染物对人体健康的潜在危害^[5-9],但由于该评价系统中包含着大量不确定性信息,如(1)污染物浓度的不确定性,(2)参数选择的不确定性,即人均饮水量、暴露时间、体重等个体差异,常规的确定性方法难以准确反映区域水环境健康风险的真实情况^[10-11]。由于模糊数学法可将模糊概念定量化、精确化,三角模糊数法已成功解决了风险评价过程中的不确定性问题^[12-15]。但是大多数研究仅注重方法的应用,而很少对各种不确定因素对水环境健康风险评价结果的影响进行研究。在实际工作中,当污染物浓度变化较小时或相对稳定时,一般采用平均浓度表示水体水质状况,此时是否会造成有效信息丢失,对水环境健康风险评价结果的影响程度多大,如何客观地揭示水环境健康风险,均成为风险管理者评价风险评估结果可靠程度的重要依据。然而,很少有文献对此问题进行研究。

因此,本文基于三角模糊数建立水环境健康风险评价模型,对石嘴山市地下水饮用水源地健康风险进行评价,分析污染物浓度及参数不确定性对水环境健康风险评价结果的影响,以期对饮用水源地水环境安全保障和健康风险防控提供科学依据。

1 基于三角模糊数的水环境健康风险评价模型

1.1 水环境健康风险评价模型

饮用含有毒物质的水源是污染物造成人体危害的主要途径^[12]。健康风险评价是美国国家工程学院和国家科学院于1972年首先提出的,我国的环境健康风险评价研究工作始于20世纪90年代。近年来,美国国家环保局在健康风险评价领域取得了大量成果,制定了一系列的技术性文件、准则和指南,将健康风险评价步骤分为:危害识别、剂量-反应评估、暴露评价和风险表征,这一体系被包括欧盟和我国在内的许多国家广泛采用^[16]。本文采用美国国家环保局推荐的风险评价模型,对饮水途径产生的人体健康风险进行评价^[17]。

化学致癌污染物经饮水途径对人体健康产生致癌风险可用下式计算

$$R_{ci} = [1 - \exp(-D_i q_i)] / L \quad (1)$$

$$D_i = Q \times C_i / W \quad (2)$$

式中: R_{ci} 为化学致癌污染物*i*通过饮水途径产生的

平均个人致癌年风险(\bar{a}^1); D_i 为化学致癌物*i*通过饮水途径的单位体重日暴露剂量($\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$); q_i 为某种化学致癌物通过饮水途径的致癌强度系数($\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$); Q 为人均日引水量(L/d); C_i 为化学致癌污染物的浓度(mg/L); L 为人均寿命(a); W 为成人体重(kg)。

非致癌物质经饮水途径对人体健康产生非致癌风险的计算模型为

$$R_{nj} = (D_j / Rf D_j) \times 10^{-6} / L \quad (3)$$

$$D_j = Q \times C_j / W \quad (4)$$

式中: R_{nj} 为非致癌物质*j*通过饮水途径导致的个人致癌年风险(\bar{a}^1); D_j 为非致癌物通过饮水途径的单位体重日暴露剂量($\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$); $Rf D_j$ 为*j*非致癌物参考剂量($\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$); C_j 为非致癌污染物的浓度(mg/L);其它符号意义同前。其中,化学致癌物同样可导致非致癌风险。

1.2 三角模糊数理论

在给定区域*X*内,对任何 $x \in X$,模糊集*A*可定义为^[18]

$$A = \{ \langle x, \mu_A(x) \rangle \mid x \in X \} \quad (5)$$

式中: μ_A 为*x*对*A*的隶属度,且有 $\mu_A(x) \in (0, 1)$ 。

设 a_1, a_2, a_3 分别为某一模糊变量*x*的最小可能值、最可能值和最大可能值,均为实数,则3个数(a_1, a_2, a_3)构成三角模糊数*A*,令 $A = (a_1, a_2, a_3)$,且满足 $a_1 \leq a_2 \leq a_3$ 。其隶属函数为^[19]

$$\mu_A = \begin{cases} 0 & x < a_1 \text{ 或 } x > a_3 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & a_1 < x \leq a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2} & a_2 < x \leq a_3 \end{cases} \quad (6)$$

若 $a_1 = a_2 = a_3$,则*A*为实数。考虑到各因素的非负性,水环境健康风险评价中*A*为正的三角模糊数,即有 $a_1 > 0$ 。三角模糊数中,一般结合数理统计方法确定 a_1, a_2, a_3 的值。根据数理统计方法可知,常态分布或近似常态分布的数列,有95%以上的数据落入 $(x \pm 2\sigma)$ 之间,故将 $x - 2\sigma$ 的值确定为 a_1 ,数据平均值 x 为 a_2 , $x + 2\sigma$ 的值确定为 a_3 。

三角模糊数的隶属度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^[20]。计算中,通常将三角模糊数转换为 α -截集来简化运算, α 越大表示越接近平均值,数据出现的频率越大,区间范围越小,可信度水平不低于 α 的数据区间可表示为 $A^\alpha = (a_L^\alpha, a_R^\alpha) = [(a_2 - a_1)\alpha + a_1, -(a_3 - a_2)\alpha + a_3]$ (7)

三角模糊数可进行加减乘除运算, 设有两个三角模糊数 M 和 N , 且 $M = (m_1, m_2, m_3)$, $N = (n_1, n_2, n_3)$, 那么

$$M^\alpha = (m_L^\alpha, m_R^\alpha) = [(m_2 - m_1)\alpha + m_1, - (m_3 - m_2)\alpha + m_3] \quad (8)$$

$$N^\alpha = (n_L^\alpha, n_R^\alpha) = [(n_2 - n_1)\alpha + n_1, - (n_3 - n_2)\alpha + n_3] \quad (9)$$

则有

$$M^\alpha \odot N^\alpha = (m_L^\alpha + n_L^\alpha, m_R^\alpha + n_R^\alpha) \quad (10)$$

$$M^\alpha \Delta N^\alpha = (m_L^\alpha / n_L^\alpha, m_R^\alpha / n_R^\alpha) \quad (11)$$

$$k \cdot M^\alpha = (k \cdot m_L^\alpha, k \cdot m_R^\alpha) \quad (12)$$

1.3 水环境健康风险评价模糊模型

对于不同的可信度水平 $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$, 根据式(1)~式(4), 地下水健康风险评价模糊模型为

$$R_\alpha^\alpha = 1 - \exp(-Q^\alpha C^\alpha q_1 \div W^\alpha) / L^\alpha \quad (13)$$

$$R_j^\alpha = (Q^\alpha C^\alpha \times 10^{-6}) \Delta (RfD_j \cdot W^\alpha L^\alpha) \quad (14)$$

式中: C^α 、 Q^α 、 W^α 、 L^α 分别为污染物浓度、成人饮水量、体重、人均寿命 α 截集的三角模糊数; R_α^α 、 R_j^α 为 α 截集对应的致癌风险和非致癌风险。若有多种致癌物或非致癌物, 参照三角模糊数运算法则, 通过累加计算得到总风险水平。

2 石嘴山市地下水饮用水源地健康风险评价

2.1 水源地概况

石嘴山市位于银川平原北部, 是宁夏回族自治区的第二大城市, 总人口 73.41 万, 城镇人口约占 70%, 是国家重要煤炭工业城市、宁夏能源重化工和原材料工业基地。属温带大陆性气候, 区内干旱少雨, 多年平均年降水量 164.17 mm, 多年平均年蒸发量 2 174.24 mm。

区内第四系分布广泛, 第四系沉积物以洪积、冲积和冲湖积为主, 地下水赋存条件良好。根据区域地质、地貌、水文地质条件及钻孔资料, 第四系松散岩类孔隙水可分为单一潜水区和多层结构区。由于单一潜水含水层及多层结构区承压水含水层埋藏较深, 受人类活动影响较小, 水质较好, 是石嘴山市居民生活饮用主要水源。2012 年, 石嘴山第一水源地、第二水源地、第四水源地和第五水源地地下水开采量达 2 160 万 m^3 , 供给服务人口约 51 万人。

石嘴山市地下水饮用水源地每月进行一次水质监测, 尽管水质日常监测为饮用水源地管理提供了科学依据, 然而, 水源地水体中污染物对人体健康造成的潜在危害尚不清楚, 一定程度上降低了水源地健康风险管理控制的针对性。本文选取 2013 年 12

个月的地下水水质监测资料, 基于上述水环境健康风险评价模糊模型, 对各水源地地下水中 As、Cr、Cd 等 3 种致癌物和 Fe、Mn、Cu、Zn、NO₃、NH₄、F、CN、Hg、Pb 等 10 种非致癌物的水环境健康风险进行评价。

2.2 水环境健康风险评价

根据美国国家环保局推荐的人体健康风险评价参数值, 结合中国人口统计数据及参考相关文献^[12-14, 21, 22], 确定地下水环境健康风险评价模糊模型中成人日引水量的三角模糊数(1.6, 2.2, 2.8)L, 成人体重 W 的三角模糊数为(45, 65, 85) kg, 人均寿命的三角模糊数为(65, 75, 85) a。化学致癌物致癌强度系数 q 和非致癌参考剂量 RfD 采用美国国家环保局推荐值, 见表 1。

表 1 致癌强度系数与非致癌物参考剂量(饮水途径)^[23]

Tab. 1 Strength coefficients of chemical carcinogens and reference doses of non-carcinogens (ingestion)^[23]

致癌强度系数 / ((kg · d · mg ⁻¹))	非致癌参考剂量 / (mg · kg ⁻¹ · d ⁻¹)		
As	1.5	Fe	0.3
Cd	6.1	Mn	0.14
Cr	41	Cu	0.004
		Zn	0.3
		NO ₃	1.6
		NH ₄	0.97
		F	0.06
		CN	0.037
		Hg	0.000 3
		Pb	0.001 4
		As	0.000 3
		Cd	0.000 5
		Cr	0.000 3

各水源地污染物浓度统计结果见表 2。若年内水源地地下水污染物浓度发生变化, 根据数理统计方法确定污染物浓度的三角模糊数; 若污染物浓度未发生变化, 则将浓度以常数代入模型。例如, 第一水源地 As、Fe、Mn 浓度分别为 0.000 3、0.015、(6E-4, 2.3E-3, 6.1E-3) mg/L, 表明地下水中 As、Fe 浓度不变, 仅 Mn 浓度发生了变化。

2.2.1 基于不确定信息的风险评价结果分析

对于不同隶属度 $\alpha (\alpha \in (0, 1))$, 可将上述三角模糊参数可表示为区间形式, 计算得到不同隶属度的健康风险。 $\alpha = 0$ 分别为可能风险值的上限和下限值, $\alpha = 1$ 为最可能风险。以石嘴山第二水源地 As 和 Cr 为例, 分析不确定性对水环境健康风险评价结果的影响。As 浓度三角模糊数可表示为

表 2 石嘴山地下水饮用水源地污染物浓度

Tab. 2 The concentrations of pollutants in the drinking water well fields

mg/L

水源地	第一水源地	第二水源地	第四水源地	第五水源地
As	3.00E-04	(1.9E-3, 4.9E-3, 6.7E-3)	3.00E-04	3.00E-04
Cd	1.00E-04	(2.1E-5, 5.4E-5, 8.3E-5)	1.00E-04	1.00E-04
Cr	2.00E-03	2.00E-03	2.00E-03	2.00E-03
Fe	1.50E-02	(1.5E-2, 5.67E-2, 1.97E-1)	1.50E-02	1.50E-02
Mn	(6E-4, 2.3E-3, 6.1E-3)	(1.8E-3, 6.2E-3, 2.68E-2)	(5E-4, 3.5E-3, 7.6E-3)	(6E-4, 2.5E-3, 6.4-3)
Cu	(5E-4, 6E-4, 1.1E-3)	5.00E-04	(5E-4, 7E-4, 1.7E-3)	5.00E-04
Zn	1.00E-02	1.00E-02	1.00E-02	1.00E-02
NO ₃	(0.88, 5.46, 7.65)	(0.02, 0.03, 0.13)	(1.22, 3.97, 8.277)	(1.99, 6.51, 8.81)
NH ₄	(1.25E-2, 3.89E-2, 5.94E-2)	(4.1E-2, 7.61E-2, 1.18E-1)	(1.25E-2, 3.5E-2, 5.85E-2)	(1.25E-2, 3.57E-2, 5.59E-2)
F	(0.11, 0.23, 0.3)	(0.19, 0.31, 0.39)	(0.58, 0.82, 0.93)	(0.91, 0.97, 1.00)
CN	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03
Hg	(1.3E-5, 2.9E-5, 5.4E-5)	(E-5, 1.9E-5, 4.2E-5)	(2E-6, 2.2E-5, 3.4E-5)	(1.1E-5, 2.5E-5, 4.3E-5)
Pb	(5E-4, 7E-4, 1.8E-3)	(5E-4, 8E-4, 2.3E-3)	5.00E-04	5.00E-04

(1.9E-3, 4.9E-3, 6.7E-3) mg/L, Cr 浓度为 2.00E-03 mg/L(表 2), 两种污染物经饮水途径造成的人体致癌风险隶属度曲线见图 1。

由图 1 可知, 随着隶属度减小, 致癌风险上下限制不断增大, 即数据的模糊性呈增强趋势。As 的致癌风险为[1.53 × 10⁻⁶, 5.23 × 10⁻⁶] a⁻¹, 每百万人中有 1~ 6 人受到致癌物的有害影响; Cr 的致癌风险为[4.29 × 10⁻⁵, 4.48 × 10⁻⁵] a⁻¹, 变化较小, 每 10 万人中有 4~ 5 人受到致癌物的有害影响。比对结果不难发现, 仅考虑参数不确定性, 即不同个体在日饮水量、体重和平均寿命的差别, 对风险评价结果影响较小。反之, 当同时考虑污染物浓度和参数的不确定性, 对风险评价结果影响较大, 风险区间会随着隶属度的减小而不断增大。

为进一步阐明污染物浓度变化对健康风险评价结果的影响, 以 As 浓度平均值作为模型输入, 绘制仅考虑参数不确定性的致癌风险曲线隶属度曲线(图 2)。当忽略污染物浓度变化, 健康风险计算结果明显偏小, 为[3.86 × 10⁻⁵, 4.04 × 10⁻⁵] a⁻¹, 此时, 数据信息的丢失导致无法客观反映污染物浓度对健康风险的影响。例如, 令 α= 0.6, 考虑和忽略浓度不确定性的 As 致癌风险分别为[3.04 × 10⁻⁶, 4.52 × 10⁻⁶] a⁻¹和[3.96 × 10⁻⁶, 4.04 × 10⁻⁶] a⁻¹, 此误差会随着污染物浓度极差的增大和隶属度的减小而不断增大, 即以平均浓度作为污染物浓度时, 计算得到的风险评价结果是偏小的。由此可知, 参数不确定性对评价结果影响较小, 健康风险评价结果对浓度变化较敏感。若某污染物为水体的主要致癌(或非致癌)污染物, 则忽略该污染物浓度的不确定性对致癌(或非致癌)总风险结果的影响会越显著。

在对其他污染物的水环境健康风险评价过程中, 同样发现了以上规律。

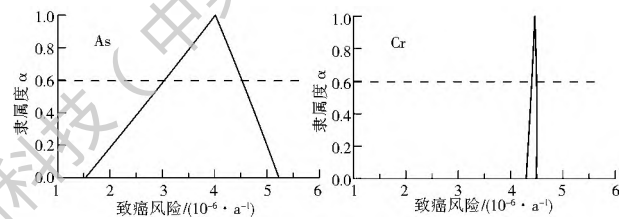


图 1 第二水源地地下水 As、Cr 致癌风险隶属函数曲线

Fig. 1 Membership curve of carcinogenic risks of As and Cr in groundwater of NO. 2 well field

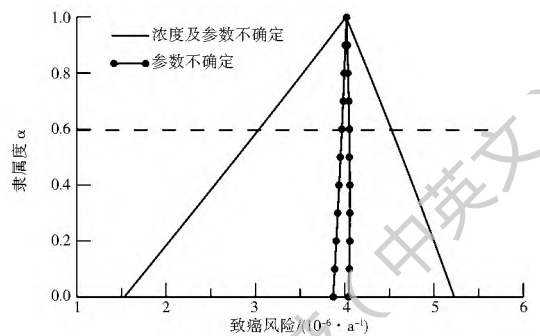


图 2 基于不确定性的 As 致癌风险隶属函数曲线

Fig. 2 Membership curve of carcinogenic risk of As based on uncertainty

2.2.2 水源地健康风险结果分析

实际应用中, 一般取高信度置信水平作为水环境管理决策的依据。本文令 α= 0.8, 计算得到饮用地下水所导致的人体健康风险, 见表 3。

健康风险评价结果显示, 石嘴山各饮用水源地污染物致癌风险较高, 第二水源地地下水致癌总风险最高, 达[4.80 × 10⁻⁵, 4.93 × 10⁻⁵] a⁻¹, 即每 10 万人中可能有 4~ 5 人受到致癌物的有害影响, 低于美国国家环保局建议致癌风险控制值 10⁻⁴ a⁻¹[24]。第

一水源地、第四水源地和第五水源地地下水致癌总风险均为 $[4.65, 4.70] \times 10^5 a^{-1}$ 。个人平均致癌总风险由高到低依次排序: 第二水源地 > 第一水源地 = 第四水源地 = 第五水源地。致癌总风险值

$Cr > As > Cd$, Cr 、 As 和 Cd 平均致癌风险分别占致癌总风险的 97.1%、2.5% 和 0.4%, 故 Cr 是饮用水源地地下水中主要致癌物质, 应作为石嘴山市各饮用水源地首要的健康风险管理控制指标。

表 3 饮水途径化学致癌物所致人体健康风险($\alpha = 0.8$)Tab. 3 Interval values of carcinogenic and non-carcinogenic risks of pollutants in the groundwater ($\alpha = 0.8$)

健康风险	污染物	第一水源地	第二水源地	第四水源地	第五水源地
致癌风险 / 10^5	$As/10^7$	[2.03, 2.055]	[35.36, 42.77]	[2.03, 2.055]	[2.03, 2.055]
	$Cd/10^7$	[1.65, 1.67]	[1.59, 1.98]	[1.65, 1.67]	[1.65, 1.67]
	$Cr/10^5$	[4.43, 4.48]	[4.43, 4.48]	[4.43, 4.48]	[4.43, 4.48]
	致癌总风险/ 10^5	[4.47, 4.52]	[4.80, 4.93]	[4.47, 4.52]	[4.47, 4.52]
非致癌风险 / 10^{11}	Fe	[2.71, 2.74]	[2.71, 2.74]	[2.71, 2.74]	[2.71, 2.74]
	Mn	[0.78, 1.19]	[2.08, 4.00]	[1.13, 1.68]	[0.84, 1.28]
	Cu	[7.72, 9.35]	[6.77, 6.84]	[8.57, 11.86]	[6.77, 6.84]
	Zn	[1.81, 1.83]	[1.81, 1.83]	[1.81, 1.83]	[1.81, 1.83]
	NO_3	[1.15, 1.46]	[2.36, 2.86]	[1.04, 1.34]	[1.06, 1.35]
	NH_4	[1.90, 2.40]	[3.90, 4.72]	[1.72, 2.22]	[1.75, 2.22]
	F	[192.06, 225.28]	[260.74, 293.45]	[1701.18, 757.50]	[873.50, 879.48]
	CN	[1.46, 1.48]	[1.46, 1.48]	[1.46, 1.48]	[1.46, 1.48]
	Hg	[4.70, 6.13]	[3.13, 4.24]	[3.31, 4.44]	[4.00, 5.12]
	Pb	[24.77, 34.74]	[29.15, 42.86]	[19.35, 19.56]	[19.35, 19.56]
	As	[45.15, 45.63]	[786.01, 950.56]	[45.15, 45.63]	[45.15, 45.63]
	Cd	[5.42, 5.48]	[5.21, 6.50]	[5.42, 5.48]	[5.42, 5.48]
	Cr	[361.18, 365.04]	[361.18, 365.04]	[361.18, 365.04]	[361.18, 365.04]
	非致癌总风险	[650.79, 702.75]	[1466.511, 1687.11]	[1154.62, 1220.79]	[1325.00, 1337.97]

由表 3 可知, 各水源地地下水非致癌风险均较低, 低于 $10^7 a^{-1}$, 即每 1 000 万人中不到 1 人受到非致癌物的有害影响, 非致癌总风险第二水源地 > 第五水源地 > 第四水源地 > 第一水源地。地下水中 F、Cr、As、Pb 经饮水途径导致人体危害的风险较大, 分别占非致癌总风险的 43.8%、30.4%、21.05% 和 2.19%。第二水源地 As、第五水源地 F 浓度相对较高, 应引起管理部门重视; 其它非致癌物经饮水途径造成的健康风险较小, 大部分低于 $10^{10} a^{-1}$ 。非致癌物风险均值排序为 $F > Cr > As > Pb > Cu > Cd > Hg > Fe > NH_4 > Zn > Mn > NO_3 > CN$ 。

根据各水源地致癌污染物、非致癌污染物总风险计算结果可知, 水环境健康风险由高到低依次排序为第二水源地 > 第五水源地 > 第四水源地 > 第一水源地。

3 结论

(1) 基于三角模糊数的地下水环境风险评价模型中, 评价结果对参数的不确定性不敏感, 污染物浓度的不确定性对评价结果影响较大。水环境健康风

险评价中, 当污染物浓度存在变化时, 不考虑污染物浓度变化, 以平均浓度表示水体水质状况会导致风险评价结果偏小。

(2) 地下水水质健康风险评价结果表明, 石嘴山市地下水饮用水源地非致癌污染物健康风险极低, 不存在负面效应, 而致癌总风险均低于且接近 $1.0 \times 10^4 a^{-1}$, 致癌健康风险值由高到低的顺序依次为 $Cr > As > Cd$, Cr 为各水源地首要的环境健康风险管理控制指标。水环境健康总风险由高到低依次排序为第二水源地 > 第五水源地 > 第四水源地 > 第一水源地。

(3) Cr 为石嘴山市饮用水源地首要的环境健康风险管理控制指标, 建议在今后的工作中加强地下水 Cr 污染来源研究, 明确其分布规律及成因机理, 为水源地保护提供依据。同时, 实际工作中, 考虑参数不确定性和浓度不确定性的水环境风险评价结果, 对风险管理更具有指导意义。

参考文献(References):

[1] 王海宁, 薛惠锋. 中国水污染防治工作的问题与对策[J]. 环境

- 科学与管理, 2009, 34 (2): 24-27. (WANG Har ning, XU E Huifeng. Problems and countermeasures of the work to prevent and control water pollution in China[J]. Environmental Science and Management, 2009, 34 (2): 24-27. (in Chinese))
- [2] 蔡守秋, 杨朝霞. 我国水污染防治法基本原则的界定和建构[J]. 吉首大学学报: 社会科学版, 2006, 27 (1): 12F126. (CAI Shou qiu, YANG Zhao xia. Defining and constructing the fundamental principles of law to prevent and control water pollution in China[J]. Journal of Jishou University: Social Sciences Edition, 2006, 27 (1): 12F126. (in Chinese))
- [3] 郑丙辉, 付青, 刘琰. 中国城市饮用水源地环境问题与对策[J]. 环境保护, 2007 (19): 59-61. (ZHENG Bing hui, FU Qing, LIU Yan. Environmental problems and countermeasures of urban drinking water sources in China[J]. Environmental Protection, 2007 (19): 59-61. (in Chinese))
- [4] 国务院. 水污染防治行动计划. 2015. http://www.gov.cn/jzhengce/content/2015-04/16/content_9613.htm. (State Council of China, Water pollution control action plan, 2015. (in Chinese))
- [5] 段磊, 王文科, 孙亚乔, 等. 关中盆地浅层地下水氮污染的健康风险评价[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38 (3): 92-97. (DUAN Lei, WANG Wen ke, SUN Ya qiao, et al. Health risk assessment of "three nitrogen" in shallow groundwater in the Guanzhong Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38 (3): 92-97. (in Chinese))
- [6] 倪彬, 王洪波, 李旭东, 等. 湖泊饮用水源地水环境健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2010, 23 (1): 74-79. (NI Bin, WANG Hong bo, LI Xu dong, et al. Water environmental health risk assessment in lake sources of drinking water[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23 (1): 74-79. (in Chinese))
- [7] Li P, Wu J, Lyu X, et al. Origin and assessment of groundwater pollution and associated health risk: a case study in an industrial park, northwest China[J]. Environ Geochem Health, 2014, 36: 693-712.
- [8] Fabro A Y R, vila J G P, Alberich M V E, et al. Spatial distribution of nitrate health risk associated with groundwater use as drinking water in Merida, Mexico[J]. Applied Geography, 2015, 65: 49-57.
- [9] 赫淑杰, 梁忠民, 张建华, 等. 淮安市二河饮用水源地水质评价[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12 (3): 5F54. (HE Shu jie, LIANG Zhong min, ZHANG Jian hua, et al. Water quality assessment in Erhe drinking water source region of Huaian city[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12 (3): 5F-54. (in Chinese))
- [10] 于勇, 翟远征, 郭永丽, 等. 基于不确定性的地下水污染风险评价研究进展[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40 (1): 115-123. (YU Yong, ZHAI Yuan zheng, GUO Yong li, et al. Risk assessment of groundwater pollution based on uncertainty[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40 (1): 115-123. (in Chinese))
- [11] 孟庆宝, 束富荣. 健康风险评价中的不确定性分析[J]. 环境工程, 2003, 21 (6): 66-69. (MENG Qing bao, SHU Fu rong. Uncertainty analysis of health risk assessment[J]. Environmental Engineering, 2003, 21 (6): 66-69. (in Chinese))
- [12] 郑德凤, 赵锋霞, 孙才志, 等. 考虑参数不确定性的地下水饮用水源地水质健康风险评价. 地理科学[J], 2015, 35 (8), 1007-1013. (ZHENG De feng, ZHAO Feng xia, SU N Cai zhi, et al. Health risk assessment of groundwater quality in source of drinking water based on the uncertain parameters[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35 (8), 1007-1013. (in Chinese))
- [13] 李如忠. 基于不确定信息的城市水源地水环境健康风险评价. 水利学报[J], 2007, 38 (8): 895-900. (LI Ru zhong. Assessment for environmental health of urban water supply source based on uncertain information[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38 (8): 895-900. (in Chinese))
- [14] 樊梦佳, 袁兴中, 祝慧娜, 等. 基于三角模糊数的河流沉积物中重金属污染评价模型[J]. 环境科学学报, 2010, 30 (8): 1700-1706. (FAN Meng jia, YU AN Xing zhong, ZHU Hu na, et al. Assessment model for heavy metal pollution in river sediment based on triangular fuzzy numbers[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30 (8): 1700-1706. (in Chinese))
- [15] 宋焱, 徐颂军, 张勇, 等. 白云山水地表水重金属健康风险不确定性评价[J]. 地球科学进展, 2013, 28 (9): 1036-1042. (SONG Yan, XU Song jun, ZHANG Yong, et al. Uncertainty evaluation of the surface water's heavy metal health risk in Baiyun Mountain[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28 (9): 1036-1042. (in Chinese))
- [16] 杨彦, 陆晓松, 李定龙. 我国环境监控风险评价研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2014, 31 (4): 357-363. (YANG Yan, LU Xiao song, LI Ding long. Research progress of environmental health risk assessment in China[J]. Journal of Environment and Health, 2014, 31 (4): 357-363. (in Chinese))
- [17] USEPA. Risk assessment guidance for superfund, volume I: Human health evaluation manual (Part A) [R]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1989: 6-35, 8-1-8-17.
- [18] Zadeh L A. Fuzzy Sets[J]. Information and Control, 1965, 8 (3): 338-353.
- [19] Giachetti R E, Young R E. A parametric representation of fuzzy numbers and their arithmetic operators[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1997, 91(2): 185-202.
- [20] Zou R, Lung W S. Uncertainty analysis for a dynamic phosphorus model with fuzzy parameters[J]. Water Quality and Ecosystem Modeling, 2000, 1(3): 237-252.
- [21] 杨晓光, 李艳萍, 马冠生, 等. 中国 2002 年居民身高和体重水平及近十年变化趋势分析[J]. 中国流行病学杂志, 2005, 26: 489-493. (YANG Xiao guang, LI Yan ping, MA Guan sheng, et al. Study on weight and height of the Chinese people and the differences between 1192 and 2002[J]. Chinese Journal of Epidemiology, 2005, 26: 489-493. (in Chinese))
- [22] 王笑梅, 刘桂建, 黄润. 渭河灌区集中式饮用水源地水质健康风险等级研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34 (3): 78F787. (WANG Xiao mei, LIU Gui jian, HUANG Run. The health risk level of water quality in the centralized drinking water sources of the river Pihe irrigation district[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34 (3): 78F787. (in Chinese))
- [23] USEPA. Integrated Risk Information System Database[EB/OL]. <https://cfpub.epa.gov/ncea/iris2/atoc.cfm>.
- [24] Covello V T. Risk communication. In Handbook of Environmental Risk Assessment and Management (ed. P. Callow) [M]. Blackwell Science, Oxford. 1998: 520-541.