

银川平原饮用地下水健康风险评价及风险控制研究

陈玺, 朱亮*, 刘景涛, 周冰 (中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061)

摘要 以地下水污染调查数据为基础, 运用健康风险评价模型, 对银川平原饮用地下水中 25 种化学污染物饮水暴露途径的健康风险进行初步评价, 结合优先控制污染物的分布特征, 提出相应的风险控制措施。结果表明, 银川平原饮用地下水存在不同程度的致癌和非致癌健康风险, 致癌风险值介于国际上最严格风险尺度 1×10^{-6} 和最宽松风险尺度 1×10^{-4} 之间的地下水比例为 50.6%, 大于 1×10^{-4} 的地下水比例为 14.5%。砷、铅、Cr(VI)、氟等无机污染物的健康风险大于苯、三氯乙烯、甲苯、1,2-二氯乙烷、1,1-二氯乙烯等有机污染物, 其中, 砷的致癌和非致癌风险率分别为 47.3%、8.6%, 远大于其他物质, 是银川平原地下水的优先控制污染物; 高砷地下水主要呈条带状分布于黄河近岸及冲洪积平原前缘地区, 以天然成因为主, 浅层水中砷含量高、波动较大, 深层水中砷含量低且稳定; 通过改进成井工艺、分层开采承压水和优化开采量等技术手段可实现对高砷风险水体的控制, 加强污染源管理和水质监测预警是实现可持续风险管理的必要手段。

关键词 化学污染物; 地下水; 健康风险评价; 风险控制; 银川平原

中图分类号 X824 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)18-0078-07

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.18.019



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on Health Risk Assessment and Risk Control of Drinking Groundwater in Yinchuan Plain

CHEN Xi, ZHU Liang, LIU Jing-tao et al (Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061)

Abstract Based on the survey data of groundwater pollution, the health risk assessment model was used to preliminarily evaluate the health risk of 25 kinds of chemical pollutants in drinking groundwater in Yinchuan Plain, and put forward the corresponding risk control measures based on the distribution characteristics of priority control pollutants. The results showed that drinking groundwater in Yinchuan Plain had different levels of carcinogenic and non-carcinogenic health risks. The proportion of groundwater with carcinogenic risk between the strictest risk scale 1×10^{-6} and the loosest risk scale 1×10^{-4} internationally was 50.6%. The proportion of groundwater greater than 1×10^{-4} was 14.5%. Health risks of arsenic, lead, Cr(VI), fluoride and other inorganic pollutants was more than benzene, trichloroethylene, toluene, 1, 2-dichloroethane, 1, 1-2 vinyl chloride and other organic pollutants. Among them, the carcinogenic and non-carcinogenic risk rate of arsenic was 47.3% and 8.6% respectively, which was much higher than other substances and was the priority control pollutant of groundwater in Yinchuan plain. The high-arsenic groundwater was mainly distributed in banding areas near the Banks of the Yellow River and the front edge of the alluvial-diluvial plain. The arsenic content in shallow water was high and fluctuated greatly, while the arsenic content in deep water was low and stable. The control of high arsenic risk water can be achieved by improving well completion technology and optimizing exploitation quantity. Strengthening pollution source management and water quality monitoring and early warning are necessary means to realize sustainable risk management.

Key words Chemical pollutants; Groundwater; Health risk assessment; Risk control; Yinchuan Plain

地下水污染健康风险评价是以地下水质量标准 and 风险评价的健康基准值为基础, 客观、科学地量化地下水污染对人体健康产生潜在影响的方法。美国科学院于 1972 年提出了基于“四步法”的健康风险评价模式^[1]; 英国、荷兰、瑞典、加拿大、澳大利亚、日本等国家均相继开展了环境风险评价研究, 构建了适合本国实际的健康风险评价体系。我国学者于 20 世纪 90 年代也开始开展环境风险评价研究, 逐步开展了不同区域和不同类型污染场地地下水健康风险评价, 评价指标由单一污染物逐渐过渡为复合污染物, 理论方法也逐渐完善。

杨彦等^[2]、韩冰等^[3]分别对地下水典型重金属、有机污染引起的人体健康风险进行研究; 陈炼钢等^[4]开展了城市供水水源地健康风险评价, 并提出了相应的风险管理措施; 陈鸿汉等^[5]分别对污染场地健康风险评级的理论及评价方法开展了探讨, 提出了叠加风险和多重暴露途径健康风险的概念。在各位学者研究工作的基础上, 环保部于 2014 年编制了《地下水健康风险评估工作指南》, 提出了我国地下水健康风险的相关技术要求。

我国地下水污染形势十分严峻, 2015 年结束的地下水污

染调查评价工作显示, 全国 35.1% 的地下水含有存在健康风险的有毒、有害物质, 不宜作为饮用水源^[6]。然而在我国干旱、半干旱的西北地区, 由于地表水资源严重匮乏, 局部地区人们仍在饮用含有砷、铬、氟等有毒元素的地下水, 虽然部分污染物的浓度较低, 但长期低剂量暴露仍会严重危害人体健康, 亟需开展基于健康风险的地下水水质安全评价和风险控制研究。

银川平原位于宁夏回族自治区中部, 西依贺兰山, 东临鄂尔多斯盆地西缘, 面积 7 800 km², 包括银川、石嘴山、吴忠 3 个主要城市, 人口 334.6 万, 是我国最古老的引黄灌区之一(图 1)。银川平原属新生代断陷盆地, 自山前向平原可划分为山前洪积平原、冲洪积平原、冲湖积平原, 形成了单一结构与多层结构并存的地下水系统。地下水是城镇及农村人畜用水的主要水源, 受人类活动及天然背景环境的影响, 区内地下水质量总体较差。在广大农村地区, 居民以分散开采浅层地下水为主, 开采并成井工艺简单, 而且对污染造成的非感官水质变化毫无意识, 存在较严重的健康隐患。因此, 在银川平原开展地下水污染健康风险评价及风险控制研究对合理开发利用地下水资源和保护人民群众饮水健康具有重要意义。

1 资料来源与研究方法

1.1 样品采集与分析 2015 年在研究区采集地下水样品

基金项目 国土资源大调查项目(DD20190331)。

作者简介 陈玺(1979—), 男, 河北石家庄人, 高级工程师, 硕士, 从事地下水污染与防治研究。

收稿日期 2019-04-18

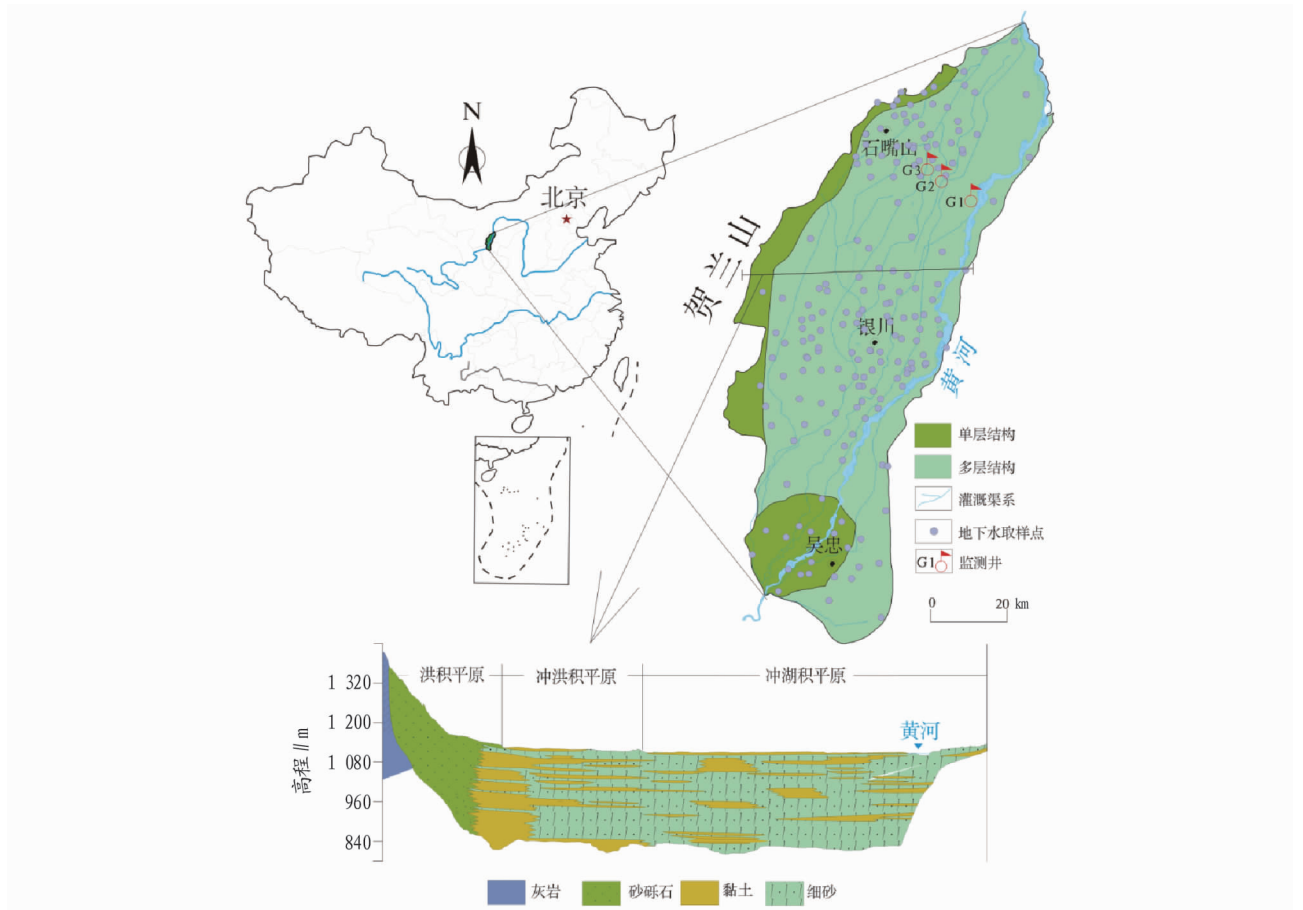


图 1 银川平原地理位置

Fig.1 Geographical location of Yinchuan Plain

186 组, 取样点为居民分散开采井和集中供水水源井。首先对整个区域进行综合调查, 掌握区域水文地质条件、土地利用状况、主要污染源分布等资料, 同时, 使用 WTW Multi 340i 便携式多参数水质测试箱对地下水的 pH、水温、电导率、溶解氧、氧化还原电位 5 个指标进行现场测试。调查工作结束后, 根据调查认识和现场指标分布规律布置取样点, 取样点在满足区域水质控制的同时兼顾对垃圾填埋场、污水沟、油库、大型养殖场等污染源的控制。动态监测数据从宁夏国土资源调查监测院收集。取样点及监测井分布见图 1。

采样前先进行抽水洗井, 在抽出约 3 倍井孔滞水体积的水后, 进行现场测试, 待现场测试指标稳定后开始取样。无机样品加入 2~3 mL 1:1 优级纯硝酸作为保护剂, 有机挥发性样品加入 2~3 mL 1:1 优级纯盐酸作为保护剂, 样品采集后立即放入装有冰块的冷藏箱, 温度保持在 4 °C 左右。有机样品在 7 d 之内送至国土资源部地下水矿泉水与环境检测中心萃取处理、测试。单个样品分析指标 66 项, 包括无机指标 28 项、微量有机指标 38 项。

1.2 地下水健康风险评价模型 地下水健康风险评价主要是针对水中对人体健康有害的污染物进行, 根据污染物对人体产生的危害效应, 将其分为化学致癌物和非致癌物两类, 但事实上致癌污染物同样具有非致癌危害效应, 因此对于致癌污染物要同时进行致癌风险评价和非致癌风险评价, 而非

致癌物仅需要进行非致癌风险评价^[4]。

对单一污染物的致癌效应, 考虑人群在儿童和成人期暴露的终生危害; 对单一污染物的非致癌效应, 只考虑人群在儿童期的暴露危害。经饮水摄入途径的污染物日暴露剂量通过公式(1)进行计算^[7]:

$$D_i = \frac{CW \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (1)$$

式中, 各参数的物理意义、取值见表 1。

表 1 饮水途径日暴露量计算参数

Table 1 Daily exposure dose (through drinking water) calculation parameter

参数 Parameter	物理意义 Physical meaning	单位 Unit	儿童期 Childhood	成人期 Adulthood
$\bar{I}R$	摄入量	L/d	0.7	1.8
EF	暴露频率	d/y	350	350
ED	暴露期	y	6	24
BW	体重	kg	15.9	56.8
AT	致癌效应平均时间	d	26 280	26 280
	非致癌效应平均时间	d	2 195	0
CW	污染物浓度	mg/L	—	—

注: 表中的技术参数参考环保部《地下水健康风险评估工作指南》
Note: Technical parameters in the table refer to *Guide lines for Groundwater Health Risk Assessment* issued by the ministry of environmental protection

1.2.1 致癌风险评价。 通常认为, 人体在低剂量化学致癌物暴露条件下, 暴露剂量率和人体致癌风险之间呈线性关系;

当高剂量导致高致癌风险时,暴露剂量率和人体致癌风险之间呈指数关系。计算公式^[8-9]:

$$\begin{cases} R_i^c = SF_i \times D_i & R < 0.01 \\ R_i^c = 1 - \text{Exp}(-SF_i \times D_i), & R \geq 0.01 \end{cases} \quad (2)$$

假设各有毒物质对人体健康危害的毒性呈相加关系,而不是协同或拮抗关系,则地下水的总致癌风险 R^c 通过公式(3)进行计算:

$$R^c = \sum_{i=1}^k R_i^c \quad (3)$$

式中, R_i^c 表示第 i 种化学致癌物经饮水暴露途径的致癌风险,无量纲; D_i 表示第 i 种化学污染物的日暴露剂量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; SF_i 表示第 i 种化学致癌物的致癌强度系数, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 。

1.2.2 非致癌风险评价。化学污染物对人体的非致癌慢性毒害一般以参考剂量为衡量标准,暴露水平高于参考剂量者为可能有危险者,暴露水平等于或低于参考剂量者为不大可能有危险者,地下水的非致癌风险通常用危害指数 HI 来

表示^[9]:

$$HI = \sum_{i=1}^k \frac{D_i}{RfD_i}$$

式中, RfD_i 表示第 i 种非致癌物的参考剂量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 。

1.3 污染因子选择和健康风险评价参数 地下水样品测试指标中对人体健康有害,确定需要进行健康风险评价的化学污染物指标有 25 项。其中,无机化学污染物 13 项,有机化学污染物 12 项。根据国际癌症研究机构 International Agency for Research on Cancer (IARC) 和世界卫生组织 (WHO) 全面评价化学物质致癌性可靠程度而编制的分类系统,属 1 组、2A 组、2B、3 组的 14 种物质归纳为化学致癌物:铬(VI)、砷、苯、苯并(a)芘、三氯乙烯、铅、二氯甲烷、1,2-二氯乙烷、三氯甲烷、四氯化碳、1,4-二氯苯、一氯二溴甲烷、1,1-二氯乙烯、1,1,2-三氯乙烯;非致癌物共 11 种:镉、硝酸盐、氟化物、铁、锰、锌、铜、汞、硒、甲苯、间/对二甲苯。化学致癌物的致癌斜率系数、参考剂量以及非致癌物的参考剂量见表 2。

表 2 化学致癌物致癌斜率系数、参考剂量和非致癌物参考剂量参数

Table 2 Slope coefficients of cancer and reference doses of chemical carcinogens and reference doses of non-carcinogens

组别 Group	化学致癌物 Chemical carcinogens			非致癌物 Non carcinogens	
	名称 Name	SF_i	RfD_i	名称 Name	RfD_i
1 组	铬(六价)	0.5	3×10^{-3}	镉	1×10^{-3}
	砷	1.5	3×10^{-4}	NO_3^-	1.6
	苯并(a)芘	7.3	4×10^{-4}	F^-	6×10^{-2}
	苯	5.5×10^{-2}	4×10^{-4}	铁	0.3
	三氯乙烯	4.6×10^{-2}	5×10^{-4}	锰	0.14
2B 组	铅	5.5×10^{-2}	3.5×10^{-3}	锌	0.3
	二氯甲烷	2×10^{-3}	6×10^{-3}	铜	4×10^{-2}
	1,2-二氯乙烷	9.1×10^{-2}	6×10^{-3}	汞	3×10^{-4}
	三氯甲烷	3.1×10^{-2}	1×10^{-2}	硒	5×10^{-3}
	四氯化碳	7×10^{-2}	4×10^{-3}	甲苯	8×10^{-2}
	1,4-二氯苯	5.4×10^{-3}	7×10^{-2}	间/对二甲苯	0.1
3 组	一氯二溴甲烷	8.4×10^{-2}	2×10^{-2}		
	1,1-二氯乙烯	0.6	5×10^{-2}		
	1,1,2-三氯乙烯	5.7×10^{-2}	4×10^{-3}		

注:镉虽为致癌物质,但其致癌途径主要为呼吸暴露,饮水未发现致癌作用^[10]

Note: Although cadmium is carcinogenic, its carcinogenic pathway is mainly respiratory exposure, and no carcinogenic effect has been found in drinking water^[10]

2 地下水健康风险评价

2.1 致癌风险评价 根据地下水致癌风险评价模型,对银川平原地下水样品进行致癌风险计算。对于环境健康风险等级,国际上目前还缺乏一套公认的评价标准,USEPA 认为在 1×10^{-4} 级别内的风险值都是可以接受的,国际防辐射委员会 (ICRP) 推荐的最大可接受风险值为 5×10^{-5} , 而英国皇家协会及瑞典环保局等机构的推荐值为 1×10^{-6} 。借鉴国内外风险管理经验,结合丁昊天^[11] 提出的模糊风险评价标准,选用最严格风险尺度 1×10^{-6} 作为可接受的风险值,计算结果小于该值,致癌风险可忽略不计;计算结果介于国际机构中最严格风险尺度 1×10^{-6} 和最宽松风险尺度 1×10^{-4} 之间,认为其具有疑似致癌风险;计算结果大于 1×10^{-4} , 认为其具有确定致癌风险。据此,将银川平原地下水致癌风险等级划分为 3 大

类、7 个等级,各等级的风险值区间及该区间的样品数量和百分比见表 3。

从分级结果可以看出,银川平原 34.9% 的地下水致癌风险在可接受范围之内,可以忽略不计,适合作为饮用水源; 50.6% 的地下水存在疑似致癌风险,作为饮用水源应引起注意; 14.5% 的地下水存在确定致癌风险,这部分地下水作为农村地区的饮用水源,对饮水人群身体健康的潜在危害较大,应采取合理措施,加强风险管理。从地下水致癌风险等级分布上看(图 2),存在明确致癌风险的地下水大多分布于银川市以北的冲洪积平原和冲湖积平原地带,而在西侧的山前洪积平原单一潜水带,风险值基本均小于 1.0×10^{-4} , 致癌风险可忽略不计。

表 3 银川平原地下水致癌风险评价等级和分级

Table 3 Carcinogenic risk assessment level and graduation of groundwater in Yinchuan Plain

风险类别 Risk categories	风险等级 Risk level	说明 Instructions	风险值区间 Risk range	数量 Number	占比 Percentage %	总占比 Total percentage // %
无致癌风险 No cancer risk	可忽略	适合作为饮用水源	$<1.0 \times 10^{-6}$	65	34.9	34.9
疑似致癌风险 Suspected cancer risk	I	基本适合作为饮用水源	$[1.0 \times 10^{-5}, 1.0 \times 10^{-5})$	20	10.8	50.6
	II	作为饮用水源需引起注意	$[1.0 \times 10^{-5}, 5.0 \times 10^{-5})$	48	25.8	
	III	作为饮用水源应给予必要关注	$[5.0 \times 10^{-5}, 1.0 \times 10^{-4})$	26	14.0	
确定致癌风险 Established cancer risk	IV	作为饮用水源应引起重视	$[1.0 \times 10^{-4}, 5.0 \times 10^{-4})$	22	11.8	14.5
	V	作为饮用水源应采取安全措施	$[5.0 \times 10^{-4}, 1.0 \times 10^{-3})$	4	2.2	
	VI	不适合作为饮用水源	$[1.0 \times 10^{-3}, 5.0 \times 10^{-3})$	1	0.5	

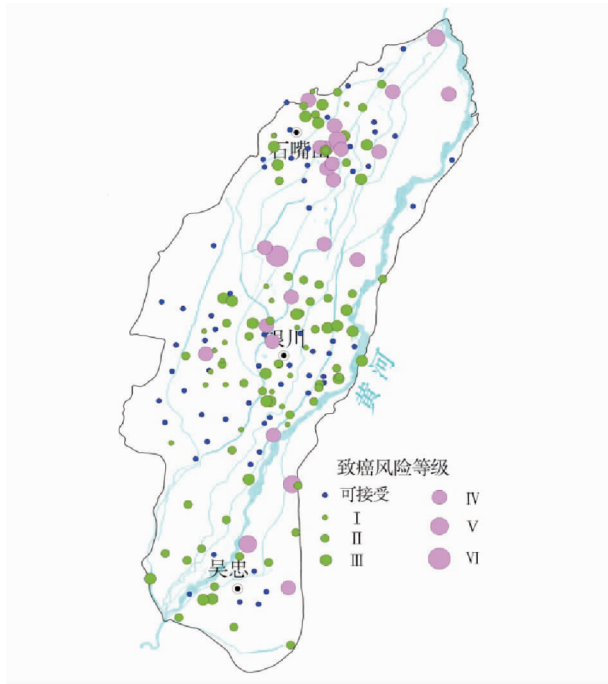


图 2 地下水致癌风险分布

Fig.2 Distribution of carcinogenic risk level of groundwater

对银川平原 14 种化学致癌物的最大致癌风险值进行统计可知(表 4), 苯并(a)芘、二氯甲烷、三氯甲烷、四氯化碳、1,4-二氯苯、一氯二溴甲烷、1,1,2-三氯乙烷 7 种有机污染物的最大风险值均小于可接受风险值 1.0×10^{-6} , 致癌风险可忽略不计; 砷、铬(VI)、苯、三氯乙烯、铅、1,2-二氯乙烷、1,1-二氯乙烯 7 种污染物的最大风险值均大于可接受风险值 1.0×10^{-6} , 存在不同等级的致癌风险。对 7 种致癌风险污染物的风险率和风险等级进行比较可以看出, 有机污染物(苯、三氯乙烯、1,2-二氯乙烷、1,1-二氯乙烯)的致癌风险率较小; 无机污染物(砷、铅、铬(VI))的致癌风险率较大。其中, 砷的致癌风险率高达 47.3%, 且存在 12.4% 的确定致癌风险等级(IV~VI), 而铅、铬(VI)的致癌风险率分别为 28.0%、18.8%, 且均为疑似致癌风险等级(I~III)(图 3)。因此, 可以确定砷是影响银川平原地下水致癌风险最主要的化学污染物。

2.2 非致癌风险评价 根据地下水非致癌风险评价模型, 对银川平原地下水进行非致癌风险评价。根据危害指数的定义, 可以确定“1”为非致癌慢性毒害效应的风险控制标准, 186 组地下水样品中共 44 组地下水的危害指数大于 1, 占所

表 4 14 种化学致癌物最大致癌风险值

Table 4 Maximum carcinogenic risk values of 14 chemical carcinogens

序号 No.	致癌物 Carcinogen	风险值 Risk value	序号 No.	致癌物 Carcinogen	风险值 Risk value
1	砷	1.63E-03	8	苯并(a)芘	9.51E-07
2	三氯乙烯	4.59E-04	9	三氯甲烷	7.21E-07
3	1,2-二氯乙烷	1.03E-04	10	二氯甲烷	5.14E-07
4	Cr(VI)	9.48E-05	11	一氯二溴甲烷	3.82E-07
5	1,1-二氯乙烯	1.44E-05	12	四氯化碳	3.81E-07
6	铅	8.34E-06	13	1,1,2-三氯乙烷	1.73E-07
7	苯	4.11E-06	14	1,4-二氯苯	4.78E-08

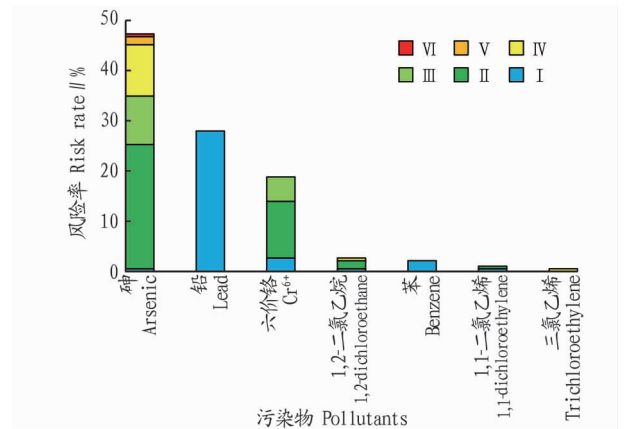


图 3 不同污染物致癌风险率对比

Fig.3 Comparison of carcinogenic risk rate of different pollutants

有样品的 23.7%(图 4, 5); 危害指数超标(>1)的污染物有 4 种: 砷、氟、三氯乙烯、甲苯, 超标个数分别为 16、9、1、1, 最大危害指数分别为 8.63、3.51、47.53、1.03(表 5)。砷的非致癌健康风险率为 36.4%, 远大于氟、三氯乙烯和甲苯。因此认为砷是影响银川平原地下水非致癌风险的最主要化学污染指标。

3 优先控制污染物及其分布规律

健康风险评价结果显示, 银川平原饮用地下水存在不同等级的致癌和非致癌健康风险, 25 种化学污染物中, 砷的致癌风险率和非致癌风险率最大, 因此, 将砷作为银川平原地下水中优先控制的污染物。进一步分析地下水中砷的区域分布及变化规律对制定风险控制措施具有重要意义。

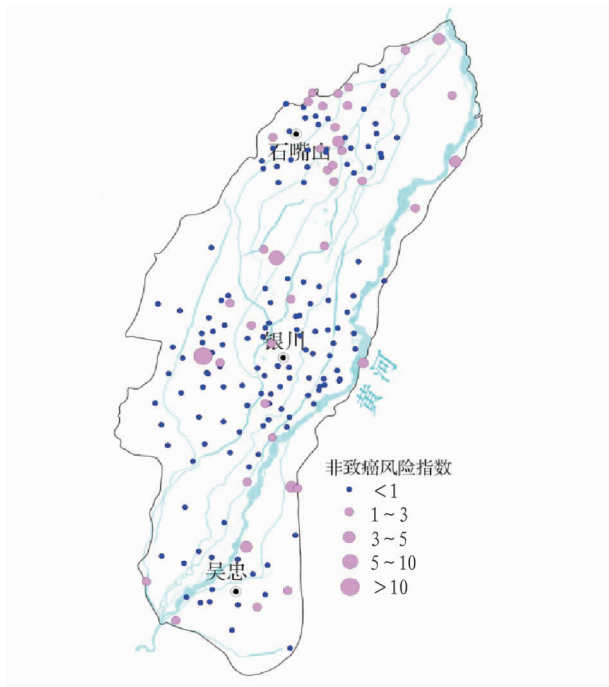


图4 非致癌健康危害指数分布

Fig.4 Distribution of groundwater's non-carcinogenic hazard index

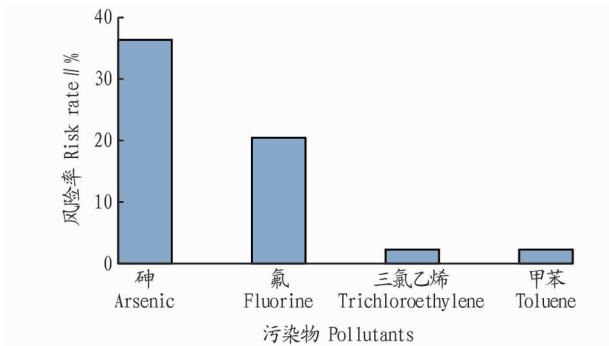


图5 4种污染物的非致癌风险率

Fig.5 Non-carcinogenic health risk rate of four contaminants

表5 非致癌健康危害污染物统计

Table 5 Statistics of pollutants with non-carcinogenic health hazards

污染物 (Pollutants)	超标样品个数 (Number of superstandard samples)	最大危害指数 (Maximum hazard index)
砷 (Arsenic)	16	8.63
氟 (Fluorine)	9	3.51
三氯乙烯 (Trichloroethylene)	1	47.53
甲苯 (Toluene)	1	1.03

银川平原地下水中砷的区域分布变化较大(图6),高砷(>0.005 mg/L)地下水主要呈2个条带状分布:东侧条带主要位于黄河近岸冲积平原区,基本平行于黄河河道展布;西侧条带主要位于冲洪积平原前缘,主要沿黄河古河道分布^[12]。水位埋深对砷含量有很大的影响,在埋深小于20 m的地下水中,砷的波动性较大,且高砷地下水均位于这一深度内,在埋深大于20 m地下水中,砷含量逐渐趋于稳定的低值(图7)。其中,5 m和15 m左右为地下水中砷含量的2个

峰值深度,这一深度与韩双宝^[13]对该地区地层岩芯中砷含量测试结果的峰值深度基本一致(图8),同时这也验证了关于银川平原高砷地下水主要来源于地层沉积物中砷的释放这一结论。

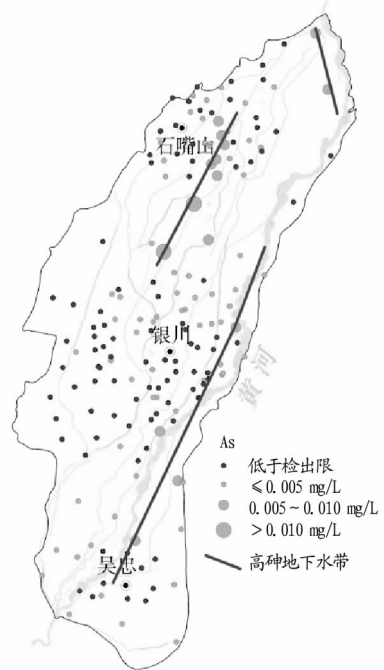


图6 地下水中砷含量分布

Fig.6 Regional distribution of arsenic in groundwater

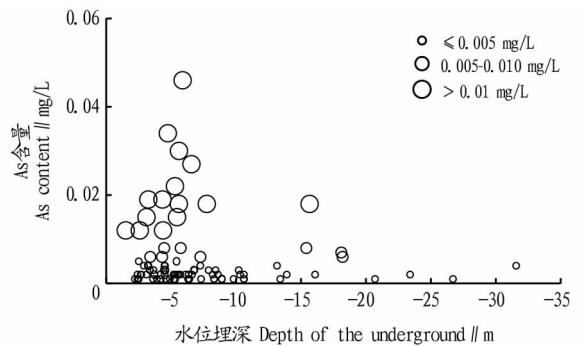


图7 地下水中砷含量垂向分布

Fig.7 Vertical distribution of arsenic in groundwater

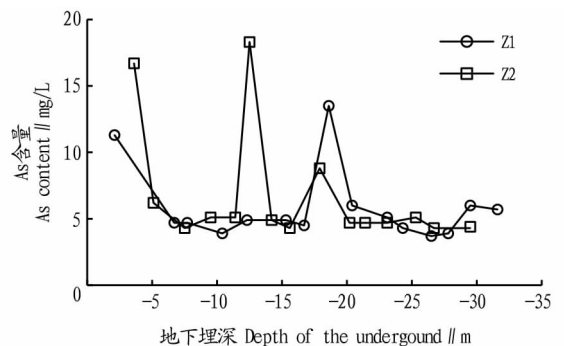


图8 钻孔岩芯中砷含量垂向分布

Fig.8 Vertical distribution of arsenic in core

根据不同深度的3口监测井2010年12月至2013年8月的系列监测数据,绘制地下水砷含量的动态变化曲线(图

9), G1、G2 中砷含量的波动区间分别为 0.004~0.019、0.005~0.018 mg/L, G3 中砷含量的波动区间仅为 0.002~0.004 mg/L。其中, G1 位于东侧高砷地下水分布带上, 深度

为 8 m, G2、G3 位于西侧高砷地下水分布带上, 深度分别为 15、80 m。监测数据表明, 浅层地下水中砷含量较高且动态变化较大, 深层地下水中砷含量较低且动态变化较小。

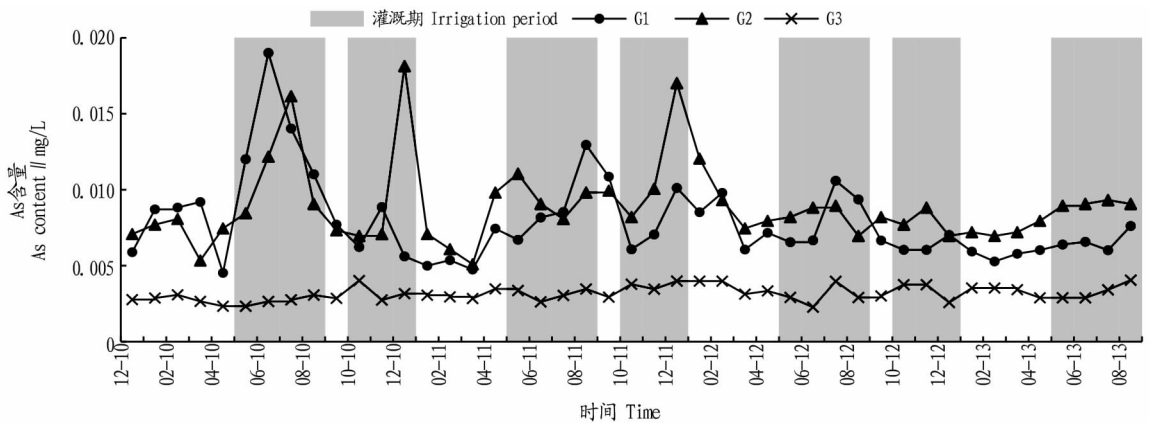


图9 浅层监测井(G1,G2)和深层监测井(G3)中砷含量变化

Fig.9 Change of arsenic content in shallow(G1,G2) and deep(G3) monitoring wells

每年的5月上旬至8月中下旬为夏灌期, 10月下旬至12月上旬为冬灌期(图9中灰色条带内的时间段), 主要为引黄河水灌溉, 灌溉回归水是银川平原浅层地下水的主要补给源, 尹秉喜^[14]采用物探、同位素、水化学等综合技术方法研究表明, 灌溉回归水占有所有浅层(60 m以上)地下水补给量的80%以上。浅层地下水中砷的波动与农田灌溉存在一定的关系, 在灌溉期内总体呈变小趋势, 而非灌溉期内呈升高趋势。这一方面可能是由于在农灌期内, 浅层地下水接受大量农灌水补给, 地下水位急剧上升, 导致pH、氧化还原条件等地下水环境发生改变; 另一方面, 根据Neumann等^[15]研究, 地表灌溉水大多富含易于生物降解的有机质组分, 因此, 引黄灌溉水中含有活性有机质的入渗, 改变了浅层地下水的微生物环境, 可能对地层介质中砷的释放具有抑制作用。

4 风险控制对策

风险控制的目的是通过科学、经济、有效、可行的技术方法, 降低当地群众的饮水健康风险。风险分级是提高风险管理效率的有效手段, 根据银川平原地下水致癌风险及非致癌风险分布状况, 绘制地下水健康风险等级图(图10), 其中, 高风险区和中等风险区是风险管理的重点区域, 占银川平原总面积的16.3%, 主要分布于平原区北部山前冲洪积扇前缘以及黄河近岸平原地区; 砷是造成银川平原饮水健康风险的最主要污染物, 目前, 铁锰氧化法、离子交换法、膜分离及吸附法等高砷地下水处理技术是集中供水水源地砷处理的有效方法, 但银川平原大部分地区为分散供水, 受技术水平、处理成本等因素制约, 砷处理技术的推广受到很大限制。

根据砷的垂向分布规律可知, 高砷地下水基本出现在水位埋深小于20 m的地下水中, 根据银川平原地下水系统结构特点, 可以通过改善成井工艺, 做好上层潜水止水, 只开采深层承压水等工程手段, 进而实现对饮用水中高砷水的风险控制。但随着承压水开采强度的增加, 上层潜水会以越流的形式补给承压水, 造成高砷水体的扩散, 因此, 制定科学的承压水开采量对控制地下水健康风险具有重要意义。席文

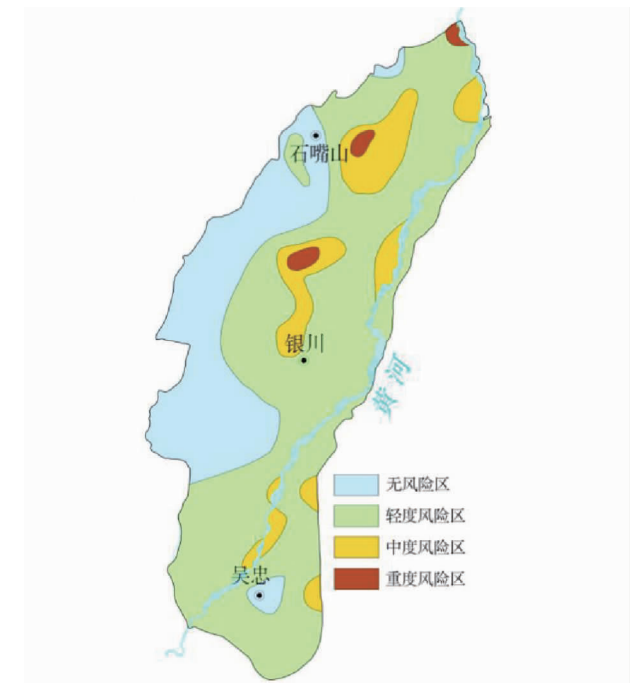


图10 地下水健康风险分区

Fig.10 Groundwater health risk classification

娟^[16]通过建立水质运移模型, 模拟计算了银川平原北部承压水水源地开采量变化条件下潜水含水层中劣质水体对承压水越流补给的影响, 模拟计算结果显示, 当承压开采单井开采量大于1 000 m³/d时, 已有明显的劣质潜水入侵承压水体, 且入侵范围随着开采量的增加而增大。由于区内分散开采井的开采量基本在100 m³/d以下, 因此, 居民分散开采承压水基本不会引起高砷潜水入侵, 能够很好地控制银川平原地下水的健康危害。

总之, 地下水健康风险控制是一项复杂工作, 不仅需要因地制宜地采取科学有效的技术手段, 而且需要采取严格的防护措施。由于银川平原地下水中苯、三氯乙烯、1,2-二氯乙烷、1,1-二氯乙烯等微量有机指标都是人类活动排放的污

染物,因此,严控城镇污染、工业污染、农业面源污染等污染源,隔断地下水污染途径,加强对污染物的“源头”控制和“过程”控制,还需要加强宣传,增强全民风险识别和风险防范意识。

5 结论

地下水是银川平原的主要生活水源,受人为污染及天然因素影响,地下水中共检出 25 种健康危害污染物,包括 13 项无机污染物和 12 项微量有机污染物,造成了不同程度的饮水健康风险。根据国际上最严格的风险尺度 1×10^{-6} 和最宽松的风险尺度 1×10^{-4} 计算,地下水致癌风险比例分别为 65.1% 和 14.5%,非致癌风险比例为 23.7%,风险区域主要位于北部山前冲洪积扇前缘以及黄河近岸平原地区,砷是最主要的健康风险污染物,是银川平原地下水中的优先控制污染物。高砷地下水以天然成因为主,与地层沉积物中砷含量关系密切,且垂向变化特征明显,其中,浅层地下水中砷含量高,在农灌等因素影响下波动较大,深层水中砷含量低且稳定。因此,通过对上层潜水进行止水、只开采下部承压水的工程技术手段即可实现对高砷水健康风险的有效控制,但单井开采量应控制在 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$,否则将会造成上层高砷水大量越流补给下层承压水,影响供水质量。同时,加强污染源管理和水质监测预警是实现可持续风险管理的必要手段。

参考文献

[1] ZHENG N, LIU J S, WANG Q C, et al. Health risk assessment of heavy

metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China [J]. Science of the total environment, 2009, 408(4): 726-733.

- [2] 杨彦,于云江,魏伟伟,等.常州市浅层地下水重金属污染对城区、城郊居民健康风险评估[J].环境化学,2013,32(2):202-211.
- [3] 韩冰,何江涛,陈鸿汉,等.地下水有机污染人体健康风险评估初探[J].地学前缘,2006,13(1):224-229.
- [4] 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):235-239,244.
- [5] 陈鸿汉,谌宏伟,何江涛,等.污染场地健康风险评估的理论和方法[J].地学前缘,2006,13(1):216-223.
- [6] CGS. China geochemical survey report [R]. 2016.
- [7] USEPA. Risk assessment guidance for superfund. Volume 1. Human health evaluation manual (Part A). Interim report (Final) [M]. Washington, DC: Environmental Protection Agency, United States, 1989.
- [8] USEPA. Risk assessment guidance for superfund: volume II environmental evaluation manual, interim final [M]. Washington, DC: Environmental Protection Agency, United States, 1989..
- [9] 陈炼钢. 土壤地下水污染治理健康风险分析系统研究[D]. 北京:清华大学,2005.
- [10] OAK RIDGE National Laboratory. Toxicity summary for cadmium in risk assessment information system [Z]. 2005.
- [11] 丁昊天. 基于区间数的地下水重金属健康风险模糊综合评价[D]. 长沙:湖南大学,2011.
- [12] 吴加敏,王润生,姚建华. 黄河银川平原段河道演变的遥感监测与研究[J]. 国土资源遥感,2006,18(4):36-39.
- [13] 韩双宝. 银川平原高砷地下水时空分布特征与形成机理[D]. 北京:中国地质大学(北京),2013.
- [14] 尹秉喜. 银川平原地下水补给及水质分布综合研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2006.
- [15] NEUMANN R B, ASHFAQUE K N, BADRUZZAMAN A B M, et al. Anthropogenic influences on groundwater arsenic concentrations in Bangladesh [J]. Nature geoscience, 2010, 3(1):46-52.
- [16] 席文娟. 宁夏石嘴山地区地下水水质模拟与变化趋势分析[D]. 西安:长安大学,2013.

(上接第 72 页)

(3) 优化产业布局,加速农产品主产区产业发展,采用系统思维,依靠区域资源优势,合理布局,明确列出禁止和限制投资的经济行业、领域、业务等。以生态环境为底线,严格按照全国主体功能区规划,制定区域开发布局,优化产业开发格局。

(4) 依靠科技创新推动绿色发展。高度重视技术对农产品主产区经济发展与生态环境发展的支撑作用,建立技术创新与引进激励机制,开发适合本土经济发展与环境改善的科学技术,联动区域科技联盟,推动绿色科技产品的创新与发展,为农产品主产区的经济、生态等全面发展提供技术动力。

参考文献

- [1] 阜阳市统计局. 2018 年阜阳市国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. (2019-03-25) [2019-03-27]. <http://www.fy.gov.cn/openness/detail/content/5c9ae28a7f8b9a63588b4570.html>.
- [2] 董峻,张辛欣,于佳欣. 我国社会主要矛盾转化的背后 [EB/OL]. (2017-10-21) [2019-03-29]. <http://cpc.people.com.cn/19th/n1/2017/1021/c414305-29600806.html>.
- [3] 曾珍香,顾培亮,张阔. 可持续发展系统及其定量描述[J]. 数量经济技

术经济研究,1998(7):34-37.

- [4] 杜慧滨,顾培亮. 区域发展中的能源-经济-环境复杂系统[J]. 天津大学学报(社会科学版),2005,7(5):362-365.
- [5] 赵芳. 中国能源-经济-环境(3E)协调发展状态的实证研究[J]. 经济学家,2009(12):35-41.
- [6] 刘芳,张红旗. 我国农产品主产区土地可持续利用评价[J]. 自然资源学报,2012,27(7):1138-1151.
- [7] 黄永春,石秋平. 中国区域环境效率与环境全要素的研究:基于包含 R&D 投入的 SBM 模型的分析[J]. 中国人口·资源与环境,2015,25(12):25-34.
- [8] 谭淼,周启刚,王福海,等. 三峡库区土地利用与土地经济协调性研究:基于协调发展度模型[J]. 资源开发与市场,2018,34(1):41-46.
- [9] 洪阳,叶文虎. 可持续环境承载力的度量及其应用[J]. 中国人口·资源与环境,1998,8(3):55-58.
- [10] 高吉喜. 可持续发展理论探索——生态承载力理论、方法与应用[M]. 北京:中国环境科学出版社,2001.
- [11] 齐亚彬. 资源环境承载力研究进展及其主要问题剖析[J]. 中国国土资源经济,2005,18(5):7-11,46.
- [12] 《中国大百科全书》编委会. 中国大百科全书·环境科学[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [13] HAKEN H. Synergetics: Introduction and advanced topics [M]. 3rd ed. Berlin: Springer, 2004:24-45.
- [14] 孟庆松,韩文秀. 复合系统协调度模型研究[J]. 天津大学学报(自然科学版),2000,33(4):444-446.
- [15] 王宏起,徐玉莲. 科技创新与科技金融协同度模型及其应用研究[J]. 中国软科学,2012(6):129-138.