

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2023.02.001

引用格式:许乃政,陶小虎,龚建师,等.淮河流域平原区高铁锰地下水环境健康风险评估[J].华东地质,2023,44(2):119-127.
(XU N Z, TAO X H, GONG J S, et al. Exposure risk of high Fe and Mn groundwater from Huaihe River Plain[J]. East China Geology, 2023, 44(2):119-127.)

淮河流域平原区高铁锰地下水环境健康风险评估

许乃政^{1,2}, 陶小虎¹, 龚建师^{1,2}, 檀梦皎¹

(1.中国地质调查局南京地质调查中心,江苏 南京 210016;
2.自然资源部流域生态地质过程重点实验室,江苏 南京 210016)

摘要:基于近期获得的水文地球化学分析数据,应用指示克立格法开展了淮河流域平原区高铁、锰地下水环境健康风险评估,并分析了高铁、锰地下水的形成原因。结果表明:铁、锰是影响研究区地下水质量的主要化学组分,铁、锰在地下水中的空间分布上表现出明显的变异性。铁、锰超标概率峰值具有相似的空间分布格局,铁、锰高风险地区呈岛状分布,深层地下水的环境健康风险明显降低。含铁浅层地下水高风险地区面积为1 257.15 km²,面积占比0.07%;含铁深层地下水高风险地区面积为476.93 km²,面积占比0.03%。含锰浅层地下水高风险地区面积为35 883.16 km²,面积占比19.19%;含锰深层地下水高风险地区面积为1 269.30 km²,面积占比0.07%。淮河流域高铁锰地下水是原生成因,铁、锰离子主要来源于含水层中含铁、锰矿物的还原性溶解。高铁锰地下水的风险评价结果,可为区域供水区划提供指导。

关键词:铁锰地下水;环境健康风险;指示克立格法;淮河平原

中图分类号:X53

文献标识码:A

文章编号:2096-1871(2023)02-119-09

饮用水中与化学成分相关联的健康风险主要由化学成分在长时间暴露后对人体健康产生不利影响而产生的。地下水环境健康风险评估是建立水体污染与人体健康联系的一种评价方法^[1-8]。地下水污染是引发地下水环境健康风险的主导因素,地下水环境健康风险评估是开展地下水污染防治问题工作的前提和基础。

指示克立格法是非参数统计方法,通过计算在一定风险条件下未知量的估计值及概率,评估水土资源利用的风险^[9-13]。指示克立格法不要求原始数据服从正态分布,不需剔除重要而实际存在的特异值,且能抑制特异值对变异函数稳健性的影响,这为进行区域水土资源利用的风险性评估提供了新思路。指示克立格法消除了通常数据处理的平滑效应,免于使某些异常信息丢失,是处理有偏数据的有力工具,因此,在水土化学成分的空间分布与

环境风险评估等方面得到广泛应用^[5,7,9-15]。

铁、锰是地壳中最丰富的金属之一,它们天然存在于地下水水源中,铁、锰浓度过高会影响水的可接受性,并对人体健康产生不利影响。高铁锰地下水主要分布在我国冲积平原和内陆盆地^[16-17]。淮河流域地下水铁、锰组分分布具有高度的空间异质性,铁、锰含量超标是淮河平原地下水较普遍的特征^[18],威胁着当地供水水质安全及居民身体健康。为全面了解淮河流域平原区高铁锰地下水的空间分布特征,本文应用指示克立格法对淮河流域平原区的地下水井取样分析结果进行分析,绘制了原生超标物含量超过最大允许值的概率图,可为区域供水区划与水源供水安全等级划分提供指导。

1 研究区概况

淮河流域地处中国东部地区,西起桐柏山、伏

* 收稿日期:2022-01-26 修订日期:2022-05-25 责任编辑:谭桂丽

基金项目:中国地质调查局“长江下游及淮河流域水文地质与水资源调查监测(编号:DD20230428)”项目资助。

第一作者简介:许乃政,1971年生,男,研究员,博士,主要从事环境科学研究。Email: xzzz100@sina.com。

通信作者简介:龚建师,1979年生,男,高级工程师,学士,主要从事水文地质学研究。Email: 593591934@qq.com。

牛山,东临黄海,南以大别山、江淮丘陵、通扬运河及如泰运河分界,北以黄河、泰山为界与黄河流域毗邻,地理坐标: $111^{\circ}55' \sim 121^{\circ}25' \text{ E}$, $30^{\circ}55' \sim 36^{\circ}36' \text{ N}$;地质构造上位于华北板块、扬子板块、秦岭造山系的交接地带^[19](图 1(a))。该流域位于中国南北气候过渡带上,属于暖温带半湿润季风气候区,年平均气温 $11 \sim 16^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 920 mm。

本文研究区为淮河流域内的平原地区,面积约 18.7 万 km^2 ,以冲积平原为主,海拔一般 10~50 m,地势由西北向东南微倾。研究区分布最广的地下水类型为松散岩类孔隙水。自新近纪(23 Ma)以来,淮河流域形成了巨厚的新近系、第四系松散沉积物,为区域地下水的形成与分布提供了良好的水文地质条

件。在流域内平原区地表以下 30~55 m 广泛分布 1 层厚 14~20 m 的黏性土层,因此,大致以地表以下 50 m 为界限,将埋深小于和大于 50 m 的松散岩类孔隙含水层组分别划分为浅层、深层含水系统^[20](图 1(b))。浅层地下水赋存于 50 m 以浅的全新统、上更新统,与大气降水、地表水关系密切,地下水埋深一般为 2~6 m,径流缓慢,径流方向总体由西往东;降水入渗是主要的补给方式,蒸发是主要的排泄途径。深层地下水赋存于 >50 m 的新近系与中一下更新统,含水层埋深 500~600 m(图 1(c))。由于深层地下水埋藏较深(>50 m),含水层之间有黏性土层相隔,不能直接接受大气降水的补给,径流缓慢,人工开采是深层地下水的主要排泄途径。

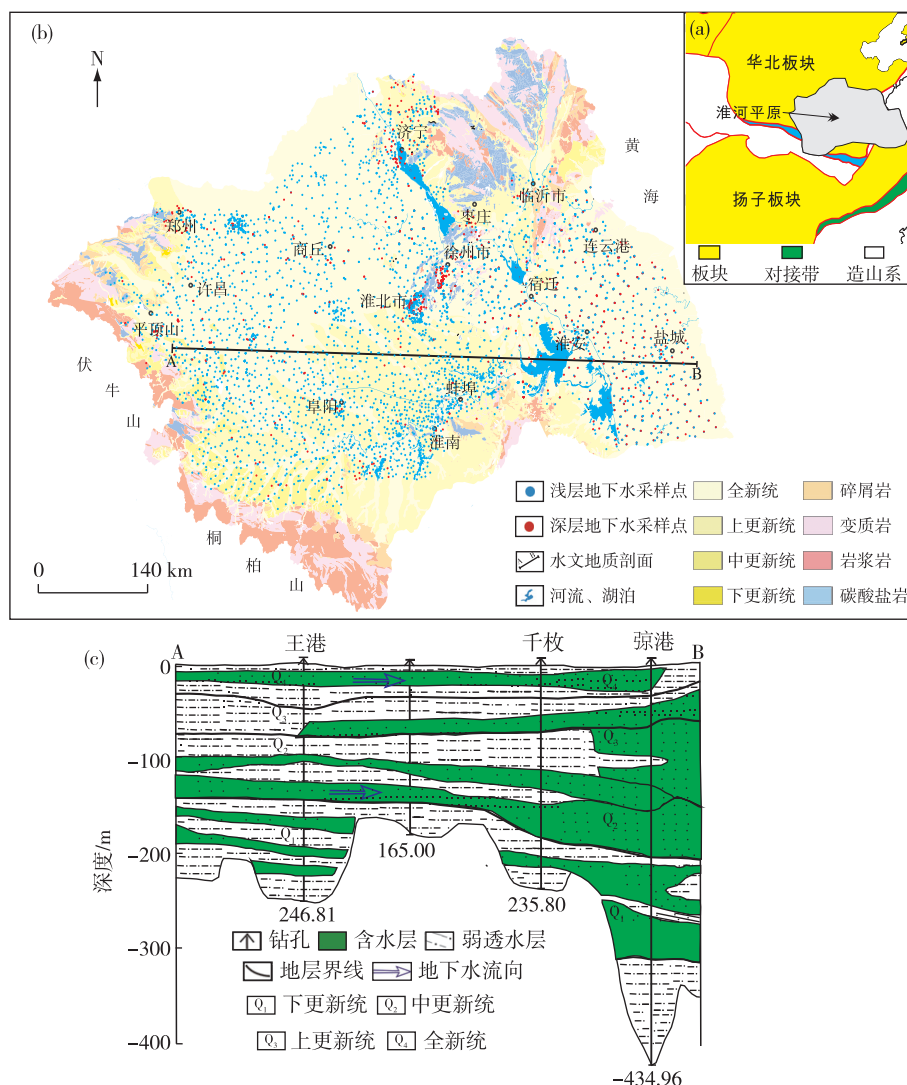


图 1 淮河流域平原区地质背景(a)、采样位置(b)及水文地质剖面(c)

Fig. 1 Geological setting(a), sampling sites(b) and hydrogeological profile(c) in the Huaihe River Plain

2 研究方法

2.1 指示克立格法

指示克立格法是一种插值方法,主要用于估计超过某个预定义阈值的概率^[9,12-15]。

设在区域 D 上取样并测定了某观测项目,若区域 D 上的阈值或边界值为 Z,则在 D 上的每个样品点 $x \in D$ 上定义 1 个 Z 的如下阶梯函数:

$$i(x; Z) = \begin{cases} 1 & \text{当 } x \text{ 点上的观测值 } Z(x) \geq Z \\ 0 & \text{当 } x \text{ 点上的观测值 } Z(x) < Z \end{cases} \quad (1)$$

在给定的阈值 Z 的条件下,记 $Z(x) \geq Z$ (即 $i(x; Z) = 1$) 的概率为

$$F(Z) = \text{Prob}[i(x; Z) = 1], \quad (2)$$

则指示函数 $i(x; Z)$ 的偏差期望值为

$$E\{i(x; Z)\} = 1 \times F(Z) + 0 \times [1 - F(Z)] = F(Z). \quad (3)$$

公式中 $F(Z)$ 为观测值 $Z(x)$ 的分布函数在 Z (阈值) 处的值。当 $i(x+h; Z)$ 和 $i(x; Z)$ 为被矢量 h 分割的 2 个随机变量时,则指示半变异函数可定义为

$$\gamma_1(h; Z) = \frac{1}{2} \{[i(x+h; Z) - i(x; Z)]^2\}. \quad (4)$$

可见,用公式(4)求得的指示变异函数,可通过普通克立格估计得到未知点的 $i(x; Z)$ 值,即为 $Z(x) \geq Z$ 在该点出现的概率

$$F^*(Z) = \sum_{a=1}^n \gamma_a \times i(x_a), \quad (5)$$

式中: F^* 为 $Z(x) \geq Z$ 的概率 F 的克立格估计, n 是在待估点 x 的邻域中的有效点数, x_a 是第 a 个采样点的位置, γ_a 是克立格权系数。用公式(5)可以编制 $Z(x) \geq Z$ 的条件概率图。地下水超过阈值的概率越高,表明对人类健康的风险越高。

2.2 指示克立格分析过程

(1)指示值的确定。根据《饮用水质量安全准则(第四版)》^[21]、《GB5749—2006 生活饮用水卫生标准》^[22]与《GB14848—2017 地下水质量标准》^[23],本文确定地下水铁、锰的超标阈值分别为 0.3 mg/L、0.1 mg/L。

(2)数据来源与处理方法。2010 年代开展的淮河流域水文地质调查为本文提供基础数据,共收集地下水铁、锰水化学分析数据 10 755 件,包括浅层地下水样 8 566 件,深层地下水样 2 189 件(图 1(b))。利用 ArcGIS 10.1 软件进行地下水超标组分含量的

空间结构特征分析,借助 ArcGIS 10.1 的 Geostatistical Analyst 工具,应用指示克立格法制作超标概率图。

(3)超标概率图评价。根据超标组分的毒性、持久性与超标概率,对超标概率图进行分区。

2.3 图形制作与数据处理

采用 ArcGIS 10.1、Coreldraw X4 制作图件,运用 SPSS 19.0、Excel 2013 进行统计分析处理。

3 结果与分析

3.1 含铁地下水超标风险评估

铁是人体必需的营养元素,通常铁在地下水的浓度水平不影响健康。铁的浓度超过 0.3 mg/L,地下水有明显味道,会影响水的可接受性,铁属于低危险性超标组分。世界卫生组织尚未制订铁的健康标准值,《GB5749—2006 生活饮用水卫生标准》^[22]规定铁为一般化学指标,标准限值为 0.3 mg/L。根据铁的载荷风险,并参考相关研究风险概率等级划分方法^[4-5,8,24],本文将风险概率 $F > 0.8$ 划分为高风险地区, $0.5 < F \leq 0.8$ 为中风险地区, $F \leq 0.5$ 为低风险地区。

本文研究的地下水铁分析测试样品基数为 5 090 件,铁超标井数 1 336 口,调查井超标率 26.25%,铁超标组分在区域上呈点块状集中分布。

3.1.1 浅层地下水(≤ 50 m)

浅层地下水分析测试样品 4 138 件,地下水铁超标井数 1 137 口,调查井超标率 27.48%。依据风险概率 F 值,淮河流域平原区可分为 3 个区块(图 2)。

(1)高风险地区($F > 0.8$)。呈岛状展布,主要分布于河南兰考县、民权县,江苏兴化市、海安县、响水县,面积约 1 257.15 km²,占研究区面积的 0.07%。

(2)中风险地区($0.5 < F \leq 0.8$)。主要分布于河南省开封、郑州、漯河、信阳、周口,江苏省连云港、宿迁、盐城、扬州,山东省菏泽地区也有少量分布。中风险地区面积约 22 252.40 km²,占研究区面积的 11.90%。

(3)低风险地区($F \leq 0.5$)。研究区大部分地区为低风险地区,面积 16.46 万 km²,占研究区面积的 88.03%。

3.1.2 深层地下水(> 50 m)

深层地下水分析测试样品 1 052 件,地下水铁

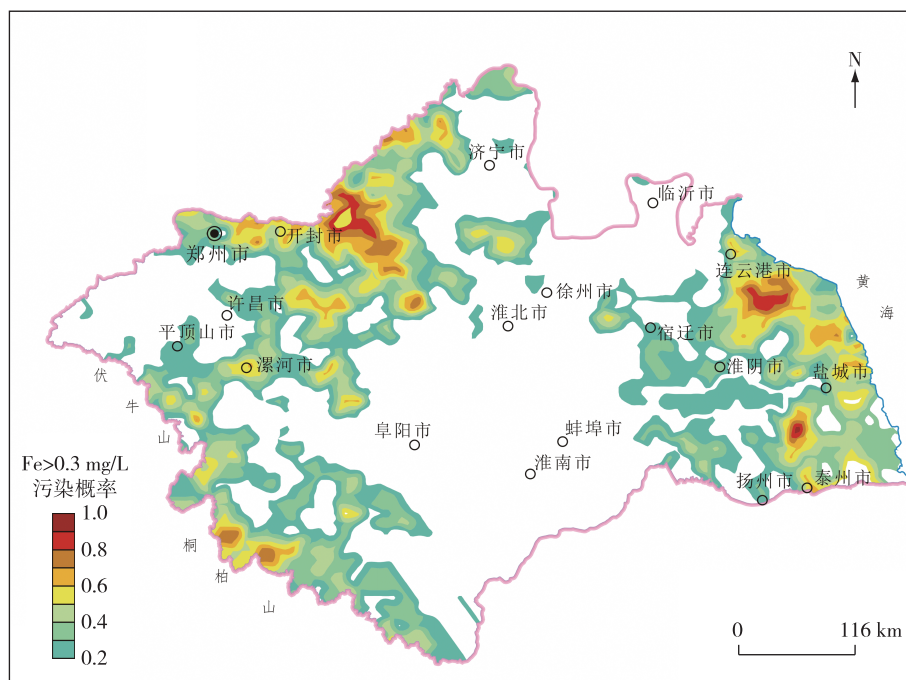


图2 淮河流域平原区浅层地下水中的铁超标概率分布图

Fig. 2 Risk probability map of Fe concentrations in shallow groundwater under the Huaihe River Plain

超标井数 199 口,调查井超标率 18.92%。

(1)高风险地区($F > 0.8$)。主要分布于江苏沿海地区泰州市、兴化市、海安县,集中呈岛状展布,面积约 476.93 km²,占研究区面积的 0.03%。

(2)中风险地区($0.5 < F \leq 0.8$)。主要展布于高风险地区外围,分布于河南省兰考县、民权县,江苏省泰州市、兴化市、连云港市、海安县、大丰县、丰县、沛县。中风险地区面积约 10 313.62 km²,占研究区面积的 5.52%。

(3)低风险地区($F \leq 0.5$)。研究区绝大部分地区为低风险地区,面积 17.66 万 km²,占研究区面积的 94.45%。

与浅层地下水铁超标概率分布图(图 2)比较,深层地下水铁超标组分高风险地区、中风险地区面积明显减少(图 3)。

3.2 含锰地下水超标风险评估

锰是人体必需的元素,饮水中锰的浓度超过 0.1 mg/L 时,会使饮水产生一种不受欢迎的味道,会影响水的可接受性,锰的生物毒性较低,属于低危险性超标组分。世界卫生组织制定锰的健康准则值为 0.4 mg/L,要高于锰的可接受性阈值(0.1 mg/L)。《GB5749—2006 生活饮用水卫生标

准》^[22] 规定锰为一般化学指标,标准限值为 0.1 mg/L。参照铁的风险概率等级划分方案,本文研究确定地下水锰的阈值为 0.1 mg/L,将风险概率 $F > 0.8$ 划分为高风险地区, $0.5 < F \leq 0.8$ 为中风险地区, $F \leq 0.5$ 为低风险地区。

本文研究的地下水锰分析测试样品基数为 5 565 件,锰超标井数 2 650 口,调查井超标率 47.62%,锰超标组分在区域上呈岛状集中分布。

3.2.1 浅层地下水(≤ 50 m)

浅层地下水分析测试样品 4 428 件,地下水锰超标井数 2 440 口,调查井超标率 55.10%。依据风险概率 F 值,淮河流域平原区可分为 3 个区块(图 4)。

(1)高风险地区($F > 0.8$)。主要分布于河南开封县、兰考县、民权县、杞县、睢县、宁陵县、商丘县、太康县、柘城县、虞城县、西华县、项城县、正阳县,山东省东明县、定陶县、鄄城县、梁山县、曹县、郓城县、巨野县,江苏省丰县、响水县、灌南县、涟水县、淮安市、宝应县。高风险地区呈岛状集中展布,面积约 35 883.16 km²,占研究区面积的 19.19%。

(2)中风险地区($0.5 < F \leq 0.8$)。主要展布于高风险地区外围地带,分布于河南省郑州市、中牟县、通许县、尉氏县、许昌市、扶沟县、鄢陵县、临颍县、舞阳县、上蔡县、商水县、驻马店市、汝南县、潢川县、固始

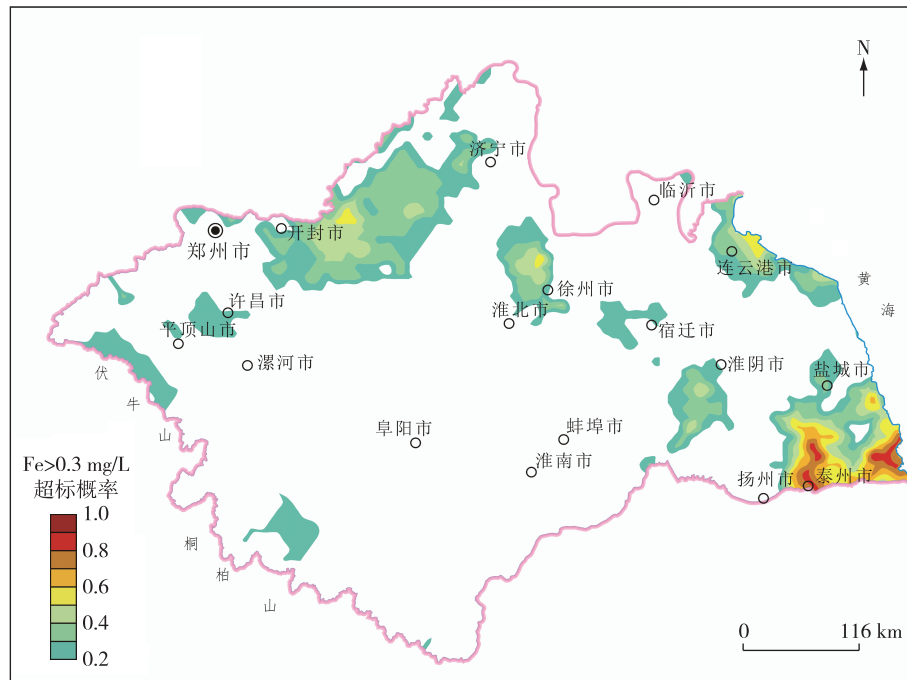


图 3 淮河流域平原区深层地下水铁超标概率分布图

Fig. 3 Risk probability map of Fe concentrations in deep groundwater under the Huaihe River Plain

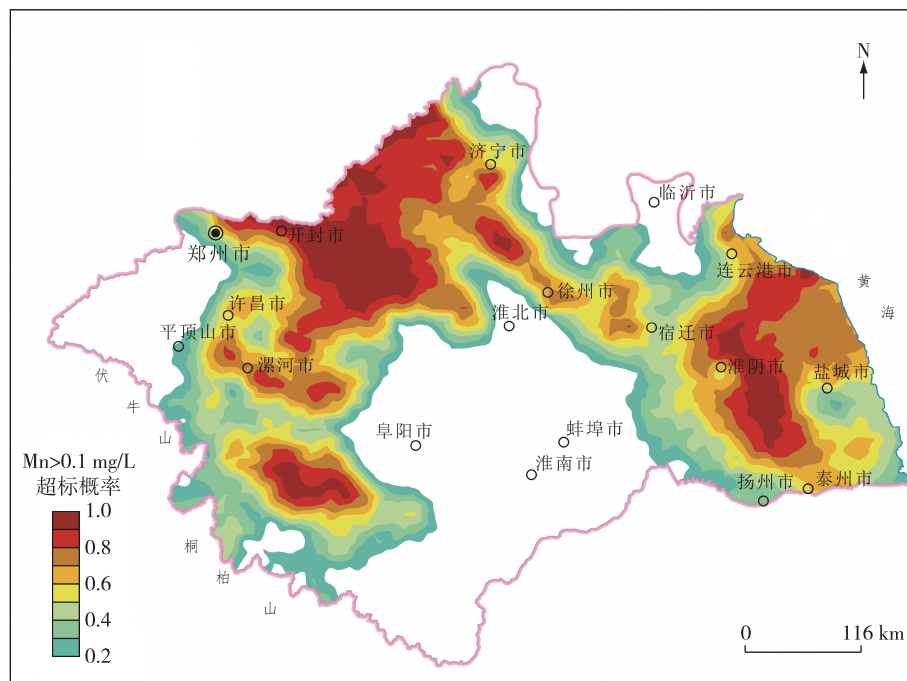


图 4 淮河流域平原区浅层地下水锰超标概率分布图

Fig. 4 Risk probability map of Mn concentrations in shallow groundwater under the Huaihe River Plain

县、淮阳县、永城市、夏邑县, 山东省金乡县、单县、成武县、嘉祥县、鱼台县、济宁市, 安徽省砀山县、萧县、亳州

市, 江苏省丰县、沛县、邳州、睢宁县、沭阳县、泗阳县、赣榆县、灌云县、金湖县、盱眙县、高邮市、东台市、射阳

部钻孔岩心调查统计结果,淮河流域第四系含水层普遍沉积有铁锰结核,Fe、Mn含量显著正相关($n=90$, $R^2=0.55$, $p<0.01$),部分层位Fe含量 $>50\times 10^{-3}$,Mn含量 $>1\times 10^{-3}$ 。高含量Fe、Mn沉积层为高铁锰地下水的形成提供了物质基础。淮河流域地处内陆平原地带,地势低洼,径流滞缓,有机质含量较高,处于相对封闭的还原环境,还原条件下铁、锰氧化物发生还原性溶解导致地下水中铁、锰浓度增大。人类活动造成的水动力条件的变化,也会激发介质中铁锰组分的释放,致使地下水铁、锰含量升高。

4 结论

(1)铁、锰是淮河流域平原区地下水的主要超标组分,其在地下水中的分布表现出明显的空间变异性;应用指示克里格法可有效评估铁、锰超过饮用水标准的空间概率;铁、锰超标概率峰值具有相似的空间分布格局,深层地下水的环境健康风险明显降低。

(2)铁、锰高风险地区呈岛状分布,含铁浅层、深层地下水高风险地区面积分别为 $1\,257.15\text{ km}^2$ 、 476.93 km^2 ,分别占研究区面积的 0.07% 、 0.03% 。含锰浅层、深层地下水高风险地区面积分别为 $35\,883.16\text{ km}^2$ 、 $1\,269.30\text{ km}^2$,分别占研究区面积的 19.19% 、 0.07% 。

(3)淮河流域高铁锰地下水是原生成因,高含量Fe、Mn沉积层为高铁锰地下水的形成提供了物质基础。

参考文献

- [1] CAO H L, XIE X J, WANG Y X, et al. Predicting the risk of groundwater arsenic contamination in drinking water wells[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 560: 318-325.
- [2] LI Y F, WAN D, LIU Y Y, et al. A predictive risk model of groundwater arsenic contamination in China applied to the Huai River Basin, with a focus on the region's cluster of elevated cancer mortalities[J]. *Applied Geochemistry*, 2017, 77: 178-183.
- [3] SHAHID N M, NIAZI K, DUMAT C, et al. A meta-analysis of the distribution, sources and health risks of arsenic-contaminated groundwater in Pakistan[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 242(A): 307-319.
- [4] 李璐,殷乐宜,牛浩博,等. 基于贝叶斯模型的地下水风险源污染概率估计方法研究[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(6): 1322-1327.
LI L, YIN L Y, NIU H B, et al. Contamination probability of groundwater risk sources by Bayesian [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(6): 1322-1327.
- [5] 滕彦国,左锐,苏小四,等. 区域地下水环境风险评价技术方法[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(12): 1532-1539.
TENG Y G, ZUO R, SU X S, et al. Technique for assessing environmental risk of regional groundwater[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(12): 1532-1539.
- [6] 左锐,石榕涛,王骥,等. 地下水型水源地水质安全预警技术体系研究[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(3): 409-418.
ZUO R, SHI R T, WANG B, et al. Technological system of early warning for groundwater quality in a groundwater source area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(3): 409-418.
- [7] 张博,李国秀,程品,等. 基于随机理论的地下水环境风险评价[J]. *水科学进展*, 2016, 27(1): 100-106.
ZHANG B, LI G X, CHENG P, et al. Groundwater environment risk assessment based on stochastic theory[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(1): 100-106.
- [8] 姚丽利,高童,胡立堂. 地下水水源地污染预警应用研究——以浑河冲洪积扇为例[J]. *南水北调水利科技*, 2016, 14(1): 37-41, 66.
YAO L L, GAO T, HU L T. Applications study of groundwater pollution early warning in source field: A case study in alluvial-pluvial fan of Hun River [J]. *South-North Water Transfer and Water Science & Technology*, 2016, 14(1): 37-41, 66.
- [9] PARRONE D, GHERGO S, FROLLINI E, et al. Arsenic-fluoride contamination in groundwater: Background and anomalies in a volcanic-sedimentary aquifer in central Italy [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, 217: 106590.
- [10] 谢云峰,杜平,曹云者,等. 基于地统计条件模拟的土壤重金属污染范围预测方法研究[J]. *环境污染与防治*, 2015, 37(1): 1-6.
XIE Y F, DU P, CAO Y Z, et al. Estimating the area of heavy metal contaminated soil using geostatistical conditional stimulation [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2015, 37(1): 1-6.
- [11] 谢云峰,曹云者,杜晓明,等. 土壤污染调查加密布点优

- 化方法构建及验证[J]. 环境科学学报, 2016, 36(3): 981-989.
- XIE Y F, CAO Y Z, DU X M, et al. Development and validation of a sampling design optimization procedure for detailed soil pollution investigation [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(3): 981-989
- [12] 徐英,陈亚新,王俊生,等. 农田土壤水分和盐分空间分布的指示克里格分析评价[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 477-482.
- XU Y, CHEN Y X, WANG J S, et al. Using indicator Kriging to analyze and evaluate spatial distributions of soil water and salt in field[J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(4): 477-482.
- [13] 李保国,胡克林,黄元仿,等. 区域浅层地下水硝酸盐含量评价的指示克里格法[J]. 水利学报, 2001(3): 1-5.
- LI B G, HU K L, HUANG Y F, et al. Application of indicator Kriging method for assessing nitrate content of regional shallow groundwater [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001(3): 1-5.
- [14] 刘瑞民,王学军,张巍. 天津表土 PAHs 区域环境风险评价研究[J]. 环境科学, 2008, 29(6): 1719-1723.
- LIU R M, WANG X J, ZHANG W. Regional environment risk assessment and probability distribution of topsoil PAHs in Tianjin area [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(6): 1719-1723.
- [15] 姜菲菲,孙丹峰,李红,等. 北京市农业土壤重金属污染环境风险等级评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 330-337.
- JIANG F F, SUN D F, LI H, et al. Risk grade assessment for farmland pollution of heavy metals in Beijing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(8): 330-337.
- [16] 张小文,何江涛,黄冠星. 石家庄地区浅层地下水铁锰分布特征及影响因素分析[J]. 地学前缘, 2021, 28(4): 206-218.
- ZHANG X W, HE J T, HUANG G X. Iron and manganese in shallow groundwater in Shijiazhuang: Distribution characteristics and a cause analysis [J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(4): 206-218.
- [17] 蔡玲,胡成,陈植华,等. 江汉平原东北部地区高铁锰地下水成因与分布规律[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(4): 18-25.
- CAI L, HU C, CHEN Z H, et al. Distribution and genesis of high Fe and Mn groundwater in the northeast of the Jiangnan Plain[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(4): 18-25.
- [18] 周锴锷,王赫生,龚建师,等. 淮河流域平原区浅层地下水铁锰分布特征及成因浅析[J]. 资源调查与环境, 2014, 35(2): 147-151.
- ZHOU K E, WANG H S, GONG J S, et al. Elementary analysis of distribution features and formation of Fe^{2+} and Mn^{2+} in the shallow groundwater of the Huaihe River alley plain [J]. *Resource Survey and Environment*, 2014, 35(2): 147-151.
- [19] 张克信,潘桂棠,何卫红,等. 中国构造-地层大区划分新方案[J]. 中国地质大学学报: 地球科学, 2015, 40(2): 206-233.
- ZHANG K X, PAN G T, HE W H, et al. New division of tectonic-strata super region in China [J]. *Earth Science*, 2015, 40: 206-233.
- [20] 许乃政,龚建师,檀梦蛟,等. 淮河流域高砷地下水的形成演化过程及其环境健康风险[J]. 中国地质, 2021, 48(5): 1418-1428.
- XU N Z, GONG J S, TAN M J, et al. Hydrogeochemical processes and potential exposure risk of high-arsenic groundwater in Huaihe River Basin, China [J]. *Geology in China*, 2021, 48(5): 1418-1428.
- [21] World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality (Fourth edition) [M]. Geneva: The World Health Organization, 2011: 1-564.
- [22] 中国卫生部. GB5749—2006 生活饮用水卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 1-10.
- Ministry of Health, PRC. GB5749—2006 Quality standard for drinking water [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2006: 1-10.
- [23] 中国国土资源部和水利部. GB/T 14848—2017 地下水质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 1-14.
- Ministry of Land and Resources, Ministry of Water Resources, PRC. GB/T 14848—2017 Quality standard for ground water [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2017: 1-14.
- [24] SARKAR M, CHANDRA PAL S. Human health hazard assessment for high groundwater arsenic and fluoride intact in Malda district, Eastern India [J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2021, 13: 100565.
- [25] 韩吟文,马振东,张宏飞,等. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 1-370.
- HAN Y W, MA Z D, ZHANG H F, et al. *Geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 1-370.

Exposure risk of high Fe and Mn groundwater from Huaihe River Plain

XU Naizheng^{1,2}, TAO Xiaohu¹, GONG Jianshi^{1,2}, TAN Mengjiao¹

(1. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;*

2. *Key Laboratory of Watershed Eco-Geological Processes, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210016, Jiangsu, China*)

Abstract: Based on the analysis of hydro-geochemical data obtained recently, this study assessed exposure risk of high Fe and Mn groundwater from Huaihe River Plain in eastern China using Indicator Kriging method, as well as discussed its origin. The results showed that Fe and Mn were the main chemical substances affecting groundwater quality, indicating obvious spatial variability. The peak value of Fe and Mn risk probability were distributed similarly in spatial pattern. The high-risk areas of Fe and Mn presented an island distribution, and the hazard risk of deep groundwater were significantly reduced against the shallow counterpart. The high risk zone of Fe in shallow groundwater covers 1 257.15 km², accounting for 0.07% of the study area, and the counterpart in deep groundwater was 476.93 km², accounting for 0.03%, respectively. The high risk zone of Mn in shallow groundwater covers 35 883.16 km², accounting for 19.19%, while its counterpart in deep groundwater was 1 269.30 km², accounting for 0.07%, respectively. The high Fe and Mn groundwater was of in-situ origin, and Fe and Mn were derived from geogenic iron and manganese minerals in aquifers by reductive dissolution. This paper carried out research on exposure risk of high Fe and Mn groundwater from Huaihe River Plain, which may provide guidance for the regionalization of drinking groundwater safety.

Key words: Fe and Mn groundwater; environmental health risk; Indicator Kriging; Huaihe River Plain