水保监测与应用技术

豫东地区地下水重金属污染来源解析与健康风险评价

苑 泉[1,2], 孙晓兵[3], 张晓偲[1,2], 马泉来[1,2], 李 兵[1,2], 杨胜纡[1,2], 潘 登[4]

〔1.河南省资源环境调查一院, 河南 郑州 450007; 2.河南省自然资源科技创新中心(地下水环境监测修复研究), 河南 郑州 450007; 3.天津工业大学环境科学与工程学院, 天津 300387; 4.河南省自然资源监测和国土整治院, 河南 郑州 450199〕

摘 要: [目的]明确豫东地区地下水重金属污染特征、污染来源及潜在健康风险,为该农业区地下水合理利用与污染管控提供科学支撑。[方法]以河南省东部地区119个典型样点为研究对象,选取10种重金属(Zn,Pb,Cr,As,Cu,Fe,Mn,Al,Hg和Ni),综合运用单因子污染指数、内梅罗综合指数、绝对因子分析-多元线性回归模型(APCS-MLR)和健康风险评估模型等方法,在对地下水重金属含量特征、空间分布与污染状况等分析的基础上,解析重金属污染的来源并评价其健康风险程度。[结果]①豫东地区地下水重金属平均浓度从大到小的顺序为:Mn>Zn>Al>Fe>Cu>As>Ni>Pb>Cr>Hg。Mn元素浓度平均值超过了《地下水质量标准(GB/T 14848—2017)》中的Ⅲ类标准限值。②豫东地区各重金属的单因子污染程度除Mn的平均水平为重度污染以外,其余重金属的平均水平均为清洁;综合污染程度为轻度污染和重度污染的样点比例分别为36.13%和31.09%,Mn是地下水重金属污染的主导因素。③工业源、未知源、农业源、自然源和交通源的平均贡献率依次递减,贡献比例依次为41.44%,20.81%,18.72%,12.57%和6.46%,但不同来源对各重金属的贡献具有显著差异性。④在饮水摄入和皮肤接触途径下,非致癌元素和致癌元素对成人和儿童的健康风险均在可接受范围内。[结论]豫东地区地下水重金属含量具有显著的空间异质性,Mn是首要污染因子。各元素对人体健康风险处于可接受范围,但仍需结合各元素的污染特征与来源,因地制宜地采取针对性措施强化地下水重金属利用与管控,动态监控其健康风险状况。

关键词: 地下水重金属; 污染来源; 健康风险; 豫东地区

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)04-0138-12 **中图分类号:** X53

文献参数: 苑泉, 孙晓兵, 张晓偲, 等.豫东地区地下水重金属污染来源解析与健康风险评价[J].水土保持通报,2026,46(4):138-149. Yuan Quan, Sun Xiaobing, Zhang Xiaocai, et al. Source analysis and health risk assessment of heavy metal pollution in groundwater in eastern Henan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(4):138-149.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.034 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.04.034**

Source analysis and health risk assessment of heavy metal pollution in groundwater in eastern Henan Province

Yuan Quan[1,2], Sun Xiaobing[3], Zhang Xiaocai[1,2], Ma Quanlai[1,2], Li Bing[1,2], Yang Shengyu[1,2], Pan Deng[4]

〔1.*The First Institute of Resources and Environment Investigation of Henan Province*, *Zhengzhou*, *Henan* 450007, *China*; 2.*Henan Natural Resources Science and Technology Innovation Center* (*Groundwater Environment Monitoring and Restoration Research*), *Zhengzhou*, *Henan* 450007, *China*; 3.*School of Environmental Science and Engineering*, *Tiangong University*, *Tianjin* 300387, *China*; 4.*Institute of Natural Resources Monitoring and Comprehensive Land Improvement of Henan Province*, *Zhengzhou*, *Henan* 450199, *China*〕

Abstract: [Objective] The characteristics, sources and potential health risks of groundwater heavy metal

收稿日期:2025-12-08 **修回日期:**2026-03-09 **采用日期:**2026-03-09

资助项目:河南省豫地科技集团重点研发项目"河南省浅层地下水重金属污染特征及健康风险评价"(豫地环境[2025]2);河南省科技攻关"南太行典型区土壤重金属污染空间异质性格局及其驱动机制"(232102321037);河南省科技攻关"河南典型粮食主产区耕地种植结构变化对水土资源平衡的影响机理及调控研究"(252102321114)

第一作者:苑泉(1993—),男(汉族),河南省周口市人,大学本科,工程师,主要从事地下水环境监测与修复研究。Email:yuanqhn1993@163.com。

通信作者:孙晓兵(1990—),男(汉族),河南省襄城县人,博士,硕士研究生导师,主要从事土地资源利用与环境保护研究。Email:sunxiaobing@tiangong.edu.cn。

pollution in eastern Henan Province were identified in order to provide scientific support for the rational utilization and pollution control of groundwater in this agricultural area. [Methods] Using 119 representative sampling sites in eastern Henan Province, this study selected 10 heavy metals (Zn, Pb, Cr, As, Cu, Fe, Mn, Al, Hg, and Ni). By integrating single-factor pollution indices, the Nemerow composite index, absolute factor analysis-multivariate linear regression (APCS-MLR), and health risk assessment models, this study examined groundwater heavy metal content characteristics, spatial distribution, and pollution status to identify pollution sources and evaluate health risks. [Results] ① The average concentrations of groundwater heavy metals in eastern Henan Province, ranked from highest to lowest, were Mn > Zn > Al > Fe > Cu > As > Ni > Pb > Cr > Hg. The average Mn concentration exceeded the class Ⅲ standard limit specified in the "Groundwater Quality Standard (GB/T14848-2017)". ② Regarding single-factor pollution levels for each heavy metal in eastern Henan Province, Mn exhibited severe pollution while all others remained clean. The proportions of sampling points showing mild and severe pollution were 36.13% and 31.09%, respectively. Mn was identified as the dominant factor in groundwater heavy metal pollution. ③ The average contribution rates of industrial sources, unknown sources, agricultural sources, natural sources, and traffic sources decreased in that order, accounting for 41.44%, 20.81%, 18.72%, 12.57%, and 6.46%, respectively. However, the contributions of different sources to various heavy metals exhibited significant variability. ④ Under drinking water intake and dermal contact pathways, the health risks posed by non-carcinogenic and carcinogenic elements to both adults and children remained within acceptable limits. [Conclusion] Groundwater in eastern Henan Province exhibits significant spatial heterogeneity in terms of heavy metal content, with Mn being the primary contaminant. However, the health risks posed by various elements are still within an acceptable range. It is necessary to adopt targeted measures based on the pollution characteristics and sources of each element, and to strengthen the utilization and control of groundwater heavy metals according to local conditions, while dynamically monitoring their health risk status.

Keywords: heavy metals in groundwater; pollution source; health risk; eastern Henan Province

地下水作为水资源的重要组成部分,也是支撑社会经济持续发展和生态环境健康稳定的重要资源。2024年中国地下水资源总量为8.68×10^{11} m^3,为全国水资源总量的27.89%[1]。然而,随着城市化、工业化乃至农业现代化的持续推进,工业和农业等生产生活活动不仅对地下水水量变化产生着影响,而且也影响着地下水水质,特别是不合理的工业排放、农药使用、化肥施用、污水灌溉、生活排污等过程会导致污染物质进入地下,致使或加剧地下水污染[2-3]。其中,地下水重金属因其毒性比较高,潜伏性能强,迁移速率慢和富集程度高等特点,不仅能够影响地下水系统的正常功能,危及区域生态系统健康持续发展,而且能够通过物质循环和能量流动等途径进入人体,对人类生活和健康产生严重影响[3-5]。因此,客观分析地下水重金属的基本特征,解析地下水重金属污染来源,并对地下水重金属健康风险进行评价具有重要的现实意义。

近年来,诸多学者针对工矿区[6]、城市区[7]、小流域等[8]不同尺度,从地下水重金属的形态状况[9]、空间分布[10]、污染来源[11]和健康风险等[3]方面开展研究,研究区域涉及中国西北[8]、华北[3]、东南等[7]区域。例如,陈雯等[12]以南昌东北部为研究区,分别利用PMF模型和健康风险评价模型对其地下水重金属的污染来源和健康风险进行了解析与评估;王晓东等[9]在揭示宁夏回族自治区地下水重金属元素空间分布特征的基础上,运用健康风险评价模型和Monte Carlo模拟评价研究区地下水对成人和儿童产生的健康风险;师环环等以雷州半岛为研究区,运用相关系数和主成分分析方法解析了地下水重金属污染来源,并采用水环境健康风险评价模型对成人和儿童开展了人体健康风险评价[11]。目前,地下水重金属污染来源解析的方法大致可划分为定性和定量两种类型,其中,定性分析方法主要有相关性分析法、主成分分析法和因子分析法等,定量分析法主要有绝对化学质量平衡(CMB)、主成分得分-多元线性回归(APCS-MLR)和正定矩阵因子分解(PMF)等,虽然以上方法各有优点与缺点,但是也常被学者应用于相关研究[9-13]。针对地下水重金属健康风险评价,诸多学者采用美国国家环保署(USEPA)提出的水环境健康风险评价模型,该模型以重金属的典型平均含量为基础指标,基于对日平均剂量和暴露水平的评估,科学衡量重金属对人体产生的潜在健康风险[14]。然而,已有研究较少涉及人口密集的农业区,该类区域随着农业化、城市化和工业化的持续推进,对地下

水资源利用的程度与影响强度会不断增加。因此，充分结合已有研究现状，在客观揭示典型农区地下水重金属污染特征的基础上，有针对性地揭示典型农业区地下水重金属污染来源以及评价不同重金属对人体的健康风险，仍是学术研究的重点内容。

河南省作为中国重要的农业产区，人口数量和密度均位于中国前列。豫东地区是农业发展的集中区，也是人地交互作用比较剧烈的区域，探讨该区域地下水重金属污染来源，以及评价地下水重金属健康风险，对该区域农业生产和人类生活具有极其重要的意义[15]。因此，本文以豫东地区为研究区，在对该区域地下水重金属浓度状况、空间分布等特征分析的基础上，借助绝对因子分析-多元线性回归模型（APCS-MLR）解析地下水重金属污染来源，并以USEPA健康风险评价模型为基础评价地下水重金属健康风险，旨在为该区域地下水重金属污染及其健康风险管控提供科学参考。

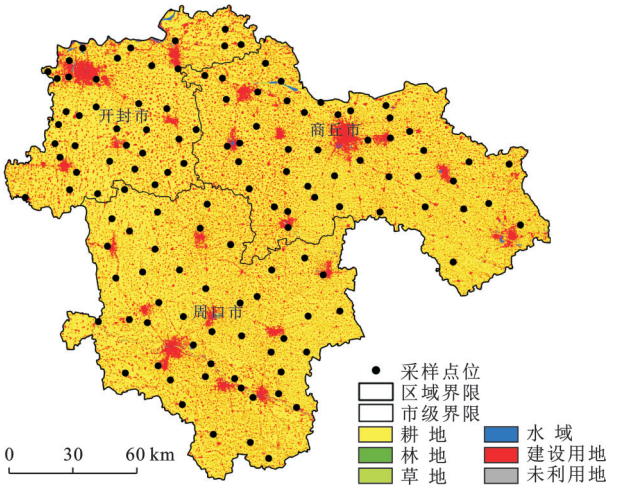
1 材料与方法

1.1 研究区概况

豫东地区，即河南省东部地区，具体包括开封市、商丘市和周口市3个地市，地处113°52′—116°39′E和33°06′—35°01′N，土地总面积为2.88×10^4 km^2，人口数量为2.83×10^7人（图1）。豫东地区属暖温带大陆性季风气候，多年平均气温和降水量分别约为17 ℃和750 mm，降水主要集中于7—9月，约占总降水量的70%，境内水系均是由黄河与淮河共同作用形成的，绝大多数河流发源于黄河大堤脚下，向东南方向呈辐射状流入淮河。豫东地区地势较为平坦，海拔高度为16～142 m。豫东地区作为黄淮海平原的重要组成部分，农业生产是该地区的重要产业，农作物以小麦、玉米和大豆为主，耗水型作物对农业用水的需求导致该区域地下水发生较为显著的变化[16]。然而，随着从传统农业基地向新兴工业城市的转型，该区域工业快速发展，能源、纺织、医药和食品等产业逐渐成为支柱产业，对地下水资源的需求以及直接或间接影响程度也在持续增加。

1.2 样品采集与测定

本研究采样样点设定以《地下水环境监测技术规范》（HJ164—2020）为基础，在豫东地区确定了119个样点，其中，开封市35个样点，商丘市40个样点，周口市44个样点。2023年7—8月，在确定的样点采集地下水样品，采样深度范围为20～100 m。地下水样品依据《水质采样技术指导》（HJ494—2009）采集水样，水样经0.45 μm的微孔滤膜过滤后，分装酸化（加硝酸至pH值≤2）与未酸化样品，4 ℃冷链保存并于48 h内送达实验室。地下水重金属采用电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS）等标准方法测定Zn，Pb，Cu，Fe，Mn，Al，Hg，Ni，As和Cr等10种重金属浓度，测试精度及误差范围均以《生活饮用水标准检验方法》（GB/T 5750.6—2006）为标准，其空白样、平行样等质量控制结果显示测试精度满足研究要求。



注：地图基于审图号GS（2019）1822号的标准地图制作，底图无修改。下同。

图1 豫东地区土地利用类型和采样点分布示意图

Fig.1 Land use types and distribution of sampling point of eastern Henan Province

1.3 研究方法

1.3.1 地下水重金属污染评价

本文运用单因子污染指数和内梅罗综合指数评价地下水重金属污染状况。单因子污染指数是指地下水重金属实际数值与标准数值的比值，反映单个重金属的污染状况对整体地下水的影响程度；内梅罗综合指数是在单因子指数测算的基础上，同时考虑地下水重金属污染的最高值和平均值，以便综合反映多个地下水重金属污染的整体指标[5,9]。具体计算公式如下：

$$P_i = C_i / S_i \tag{1}$$

$$P_N = \sqrt{\left(P_{i\max}^2 + P_{iave}^2\right)/2} \tag{2}$$

式中：P_i为第i类地下水重金属的单因子污染指数；C_i为第i类地下水重金属的实测数值；S_i为第i类地下水重金属的标准数值，具体采用《地下水质量标准（GB/T 14848—2017）》中的Ⅲ类标准作为本研究的标准数值；P_N为内梅罗综合指数；$P_{i\max}$为单因子污染指数的最大值；P_{iave}为单因子污染指数的平均值。同时，本文将单因子污染指数和内梅罗指数的评价标准分别划分为4级和5级（表1）。

表 1　豫东地区地下水重金属污染评价及生态风险等级标准
Table 1　Evaluation of groundwater heavy metal pollution and ecological risk level standards in eastern Henan Province

等级	单因子污染指数		内梅罗综合指数	
	P_i	污染等级	P_N	污染等级
1	$P_i \leqslant 1$	清 洁	$P_N \leqslant 0.7$	安 全
2	$1 < P_i \leqslant 2$	轻度污染	$0.7 < P_N \leqslant 1$	警 戒
3	$2 < P_i \leqslant 3$	中度污染	$1 < P_N \leqslant 2$	轻度污染
4	$P_i > 3$	重度污染	$2 < P_N \leqslant 3$	中度污染
5	—	—	$P_N > 3$	重度污染

1.3.2　APCS-MLR 模型

绝对因子分析-多元线性回归模型(APCS-MLR)是由 Thurston 和 Spengler 提出的,其基本原理是将主因子得分转化为绝对主因子得分。通过对绝对因子得分与原始数据进行多元线性回归分析得到各个主因子的回归系数,并利用回归系数计算绝对贡献率[3,17-18]。APCS-MLR 模型以其操作简便,成本低,能定量解析污染源贡献率等优势,在环境科学领域特别是土壤、水体和大气降尘的重金属源解析中得到广泛应用[17-18]。具体计算过程如下:

首先,对地下水重金属原始数据进行标准化,即:

$$X_{ij} = \left(c_{ij} - \overline{c_j}\right) \Big/ \sigma_j \tag{3}$$

式中:X_{ij} 为原始数据标准化后的数值;c_{ij} 为第 i 个样点第 j 种重金属的浓度;$\overline{c_j}$ 为第 j 种重金属的平均浓度;σ_j 为第 j 种重金属的标准差。

其次,在原始数据中引入浓度为 0 的人为样本,并对数据进行标准化,具体计算公式为

$$X_0 = \left(0 - \overline{c_j}\right) \Big/ \sigma_j = -\overline{c_j} / \sigma_j \tag{4}$$

再者,将各样品的因子得分与含 0 样品的因子得分相减,得到各重金属原始的 APCS 值,以 APCS 值为自变量和重金属数值为因变量进行多元线性回归(MLR),所得到的回归系数可以视为各个污染源对每个样本的含量贡献,计算公式如下:

$$C_j = b_{0j} + \sum_{k=1}^{m} (\mathrm{APCS}_{jk} \times a_{jk}) \tag{5}$$

式中:C_j 为第 j 种重金属的浓度;b_{0j} 为常数项;APCS_{jk} 为绝对主成分因子得分;m 为因子个数;a_{jk} 为污染源 k 对第 j 种重金属的回归系数。

最后,运用 a_{jk} 和 $APCS_{jk}$ 的乘积计算污染源贡献率,而 b_{0j} 通常被视为未被识别的污染来源的贡献。其中,污染源 k 对第 j 种重金属的贡献率的计算公式如下:

$$\mathrm{PC}_{jk} = \frac{\left|\overline{\mathrm{APCS}_{jk}} \times a_{jk}\right|}{\left|b_{0j}\right| + \left|\sum_{k=1}^{m} (\overline{\mathrm{APCS}_{jk}} \times a_{jk})\right|} \tag{6}$$

未被识别的污染来源的贡献率的计算公式如下:

$$\mathrm{PC}_{jk} = \frac{\left|b_{0j}\right|}{\left|b_{0j}\right| + \left|\sum_{k=1}^{m} (\overline{\mathrm{APCS}_{jk}} \times a_{jk})\right|} \tag{7}$$

式中:PC_{jk} 为污染源 k 对第 j 种重金属的贡献率;$\overline{\mathrm{APCS}_{jk}}$ 为重金属元素 j 的全部样本绝对主成分因子得分的平均值。

1.3.3　健康风险评估模型

美国环保署(USEPA)提出的人体健康风险评估模型因其计算简单且使用方便,已经成为国内外重金属污染健康风险评估常用的模型[19-20]。本研究运用 USEPA 分别从饮水摄入和皮肤接触两种途径,评估豫东地区 10 种地下水重金属对成人和儿童两类人体健康产生的风险;同时,根据重金属的基本属性特征,该模型可划分为非致癌物质(Zn, Pb, Cu, Fe, Mn, Al, Hg 和 Ni)评价模型和化学致癌物质(As 和 Cr)评价模型[12]。

(1) 日均暴露剂量。

$$\mathrm{ADD}_{\mathrm{oral}} = \frac{c \times \mathrm{IR} \times \mathrm{EF} \times \mathrm{ED}}{\mathrm{BW} \times \mathrm{AT}} \tag{8}$$

$$\mathrm{ADD}_{\mathrm{dermal}} = \frac{c \times \mathrm{PC} \times \mathrm{ET} \times \mathrm{ED} \times \mathrm{EF} \times \mathrm{SA} \times \mathrm{CF}}{\mathrm{BW} \times \mathrm{AT}} \tag{9}$$

式中:$\mathrm{ADD}_{\mathrm{oral}}$ 和 $\mathrm{ADD}_{\mathrm{dermal}}$ 分别为饮水摄入和皮肤接触的日均暴露剂量[mg/(kg·d)];c 为每个样品地下水重金属的实测浓度(mg/L);其余相关参数的基本含义与具体参数值详见表 2 和表 3。

(2) 健康风险标准。非致癌风险用危害商(HQ)表征,累积的非致癌健康风险用危险指数(HI)表征,具体计算公式如下:

$$\mathrm{HQ} = \frac{\mathrm{ADD}}{\mathrm{RfD}} \tag{10}$$

$$\mathrm{HI} = \sum \left(\mathrm{HQ}_{\mathrm{oral}} + \mathrm{HQ}_{\mathrm{dermal}}\right) \tag{11}$$

式中:HQ 为非致癌风险危害商;ADD 为日均暴露剂量[mg/(kg·d)];RfD 为某元素日均摄入参考剂量[mg/(kg·d)];HI 为多种暴露途径下的综合风险数值。根据 USEPA 分级,当 HI<1 时,表示暴露个体的非致癌风险在可接受范围内;当 HI>1 时,表示非致癌化学物质对人体健康有潜在不利风险。

致癌健康风险用致癌风险指数(CR)表征,具体计算公式如下:

$$\mathrm{CR} = \sum \left(\mathrm{ADD}_{\mathrm{oral}} \times \mathrm{SF}_{\mathrm{oral}} + \mathrm{ADD}_{\mathrm{dermal}} \times \mathrm{SF}_{\mathrm{dermal}}\right) \tag{12}$$

式中:CR为致癌风险指数; ADD_{oral} 和 ADD_{dermal} 分别为饮水摄入和皮肤接触的日均暴露剂量〔mg/(kg·d)$^{-1}$〕; SF_{oral} 和 SF_{dermal} 分别为饮水摄入和皮肤接触的致癌斜率因子,本文基于已有研究成果,将As和Cr的 SF_{oral} 值分别设置为1.50,0.50, SF_{dermal} 的值分别设置为3.66,0.50[3]。根据USEPA分级,当 $CR>1.0\times10^{-4}$ 时,表示具有潜在致癌风险;当 $CR<1.0\times10^{-6}$ 时,表示致癌风险很小,可忽略不计;当 $1.0\times10^{-6}<CR<1.0\times10^{-4}$ 时,表示健康风险在可接受范围内。

表2 健康风险评价模型参数符号和计算参数
Table 2 Symbols and calculation parameters of health risk assessment model

符号	含义	参考值		文献
		成人	儿童	
IR	每日平均饮用量/(L·d^{-1})	1.7	1.14	[21-22]
EF	暴露频率/(d·a^{-1})	350	350	[21-22]
ED	暴露持续时间/a	30	9	[21-22]
BW	平均体重/kg	57.00	23.80	[21-22]
AT	平均时间/d	255 00	255 00	[21-22]
ET	暴露时间/(h·d^{-1})	0.633 3	0.416 7	[21-22]
SA	皮肤的暴露面积/cm^2	1600 0	930 0	[21-22]
CF	体积转换因子/(L·cm^{-3})	0.001	0.001	[23-24]

表3 皮肤渗透系数(PC)和日均摄入参考剂量(RfD)值
Table 3 Skin penetration coefficient (PC) and daily reference dose (RfD) values

元素	皮肤渗透系数/10^{-3}(cm·h^{-1})	日均参考剂量/〔mg·(kg·d)$^{-1}$〕	
		饮水摄入	皮肤接触
Zn	0.6	0.30	0.01
Pb	0.004	0.001 4	0.001 4
Cu	0.6	0.040	0.012
Fe	0.1	0.300	0.045
Mn	0.1	0.046	0.001 8
Al	10	0.14	0.14
Hg	1.8	0.000 3	0.001 3
Ni	0.1	0.02	0.005 4
As	1.8	0.000 3	0.000 1
Cr	2	0.003	0.003

1.4 数据统计与分析

在对地下水重金属数据分析的过程中,对于低于检出限的样点,按照1/2检出限进行计算[25]。运用SPSS软件对地下水重金属数据进行描述性分析和相关性分析;同时,借助ArcGIS软件采用反距离权重(IDW)方法进行空间插值,对豫东地区地下水重金属进行空间展示。此外,本文借助ArcGIS和Origin等软件绘制相关图件,以较为客观地展现豫东地区地下水重金属的基本特征。

2 结果与分析

2.1 地下水重金属特征分析

2.1.1 描述性统计分析

通过豫东地区地下水重金属的描述性统计结果可知(表4),各个重金属浓度的不同统计量均具有较为显著的差异。从平均水平来看,各重金属元素浓度从大到小依次为:Mn > Zn > Al > Fe > Cu > As > Ni > Pb > Cr > Hg,其中,Mn元素浓度平均值超过了《地下水质量标准(GB/T 14848—2017)》中的Ⅲ类标准限值,超标率为89.06%。从最大值来看,Mn, As, Pb和Ni的最大值均超过国家Ⅲ类标准限值,最大值分别为Ⅲ类标准限值的25.80倍、15.00倍、1.30倍和1.15倍,其中,As, Pb和Ni元素的平均浓度虽然未超过国家Ⅲ类标准限值,但仍有少量样点浓度偏高。变异系数作为反映数据离散程度的指标,也可直观反映样本数值的空间变异性程度,根据其数值范围≤0.1,0.1~1和≥1分为弱变异、中等变异和强变异3种类型[26-27]。As, Zn和Fe的变异系数分别为2.70,1.99,1.76,变异程度均为强度变异,表明这3种重金属浓度的离散性程度为强度;Cr, Mn, Cu, Al, Ni, Hg和Pb的变异系数依次递减,均介于0.1~1之间,变异程度为中等,表明这些重金属浓度的离散性程度为中度。

由表5可知,开封市、商丘市和周口市重金属Mn元素的均值均超过国家Ⅲ类标准限值,均值超标倍数分别为3.26,4.00,3.74,其余重金属元素均值均未超过国家Ⅲ类标准限值。从变异系数来看,开封市重金属元素As, Zn, Fe和Cr的变异系数依次递减,数值均大于1,其变异程度为强度变异,其余重金属元素的变异系数介于0.1~1之间,变异程度为中等变异。商丘市重金属元素As, Zn和Fe的变异程度为强度变异,重金属元素Mn, Cu, Al, Ni, Hg和Pb的变异系数依次递减,变异系数介于0.1~1之间,变异程度为中等变异。周口市重金属元素As, Zn, Fe和Mn的变异系数依次递减,变异系数均大于1,表明该类重金属元素的变异程度为强度变异,重金属元素Al, Cu, Ni, Hg和Pb的变异系数依次递减,其数值介于0.1~1之间,表现为中等变异。商丘市和周口市重金属元素Cr的均值均为0.50 μg/L,具有相对的稳定性。

表 4　豫东地区地下水重金属元素浓度描述性统计

Table 4　Descriptive statistics of heavy metal element concentrations in groundwater in eastern Henan Province

单位:μg/L

元素	平均值	最大值	最小值	标准差	变异系数	偏度	峰度	国家Ⅲ标准
Zn	53.55	750.00	2.50	106.48	1.99	4.70	26.39	1 000
Pb	2.68	13.00	2.50	1.17	0.43	7.43	59.09	10
Cr	0.55	6.00	0.50	0.50	0.92	10.91	119.00	50
As	8.49	150.00	0.50	22.88	2.70	4.74	23.48	10
Cu	17.48	74.00	2.50	15.11	0.86	1.62	2.52	1 000
Fe	17.56	300.00	5.00	30.86	1.76	6.82	59.86	300
Mn	360.01	2 580.00	22.00	328.44	0.91	3.47	18.31	100
Al	28.74	130.00	10.00	22.61	0.79	2.29	5.95	200
Hg	0.06	0.30	0.05	0.03	0.58	5.03	27.74	1
Ni	4.67	23.00	2.50	3.42	0.73	2.22	6.93	20

表 5　豫东地区各地市地下水重金属元素浓度描述性统计

Table 5　Descriptive statistics of heavy metal element concentrations in groundwater of various cities in eastern Henan Province

单位:μg/L

元素	开封市		商丘市		周口市	
	平均值	变异系数	平均值	变异系数	平均值	变异系数
Zn	41.16	2.02	47.97	1.77	80.02	1.70
Pb	2.70	0.47	2.68	0.44	2.54	0.12
Cr	0.56	1.01	0.50	0.00	0.50	0.00
As	8.21	2.51	9.21	2.70	5.95	3.28
Cu	18.11	0.86	19.04	0.81	18.45	0.78
Fe	14.64	1.11	15.85	1.05	23.33	1.70
Mn	326.25	0.73	399.55	0.85	373.79	1.04
Al	27.60	0.81	29.32	0.78	32.42	0.84
Hg	0.06	0.62	0.06	0.65	0.06	0.70
Ni	4.47	0.70	4.97	0.65	5.08	0.70

2.1.2　空间分布特征分析

本文在参考已有文献的基础上[11-12],借助ArcGIS软件运用反距离权重法(IDW)对豫东地区10种地下水重金属进行空间插值,同时借助自然断点法(natural breaks method)将各重金属元素数值划分为5个等级,以展示不同重金属的空间分布特征(图2)。

由图2可知,豫东地区不同重金属元素的空间分布具有较大差异性。Zn和Fe的空间分布具有一定的相似性,高值区主要分布于豫东地区南部的周口市,而豫东地区北部的开封市和商丘市的数值相对较低。豫东地区地下水重金属Pb, Cr, Hg和As以低值区为主,高值区的空间分布相对比较集中,其中,Pb的高值区主要集中于豫东地区的开封市东部和商丘市东部等区域;Cr的高值区主要分布于豫东地区的开封市西部;As的高值区主要分布于豫东地区北部;Hg的高值区主要分布于豫东地区南部的周口市中西部。Cu的高值区较为广泛地分布于各个区域,仅有豫东地区的开封市西部存在少部分低值区。Ni和Al的高值区主要分布于豫东地区的商丘市和周口市,而位于豫东地区东北部的开封市全部为低值区。Mn的高值区主要分布于豫东地区的北部、东北部和西南部等区域,低值区主要分布于豫东地区西北部和东南部。

2.2　地下水重金属污染评价

由表6可知,豫东地区各地下水重金属单因子污染程度有所不同。从平均水平来看,单因子污染指数的数值从大到小依次为:Mn>As>Pb>Ni>Al>Fe>Hg>Zn>Cu>Cr,其中,除Mn的平均水平为重度污染以外,其余重金属的平均水平均为清洁。从最大数值来看,Cu, Cr, Hg, Al, Zn和Fe的最大值虽然依次递增,但是均未超过清洁等级的最高限值1,表明豫东地区这几种地下水重金属元素不存在污染的样点;Mn, As, Pb和Ni的最大值均超过清洁的最高限值,表明豫东地区这几种地下水重金属存在污染的样点,但这几种重金属元素的污染程度具有较为显著的差异性。Mn处于重度污染的样点占比最大,数值为44.54%;处于轻度污染和中度污染的样点比例在22.00%左右;处于清洁的样点比例最小,其值仅为10.92%。As处于清洁的样点比例最大,其比例均在85.00%以上,轻度污染、中度污染和重度污染的样点比例均为5.00%左右。Ni和Pb处于清洁样点的比例均在99.00%以上,仅有少量样点的污染程度为轻度污染。

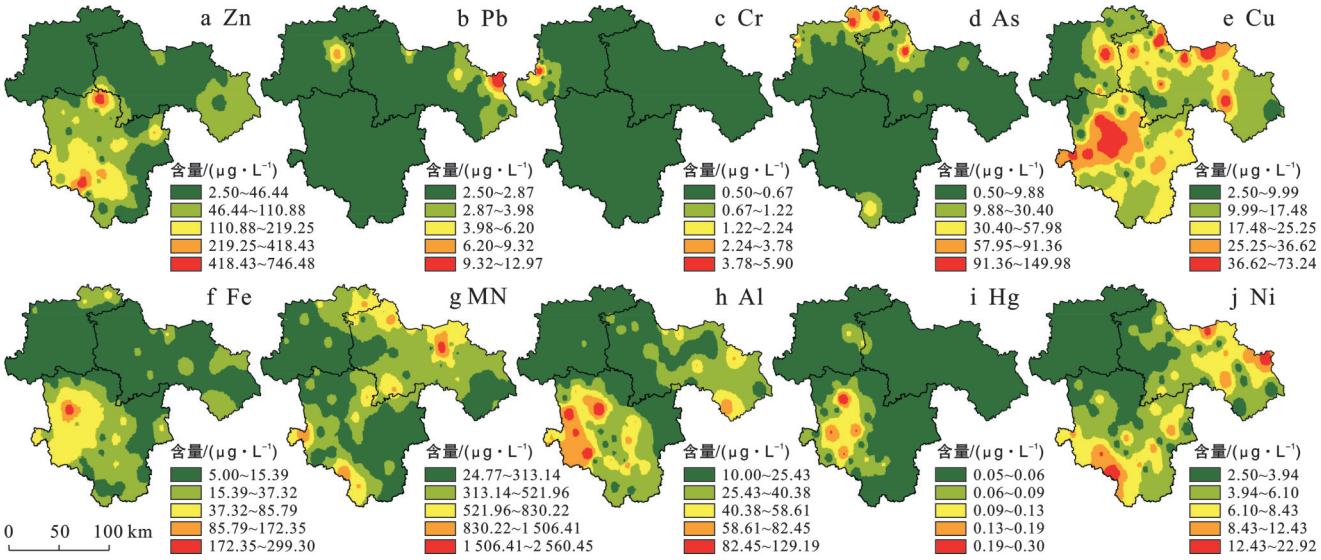


图 2 豫东地区地下水重金属空间分布特征

Fig.2 Spatial distribution characteristics of heavy metals in groundwater in eastern Henan Province

表 6 豫东地区地下水重金属污染指数

Table 6 Heavy metal pollution index of groundwater in eastern Henan Province

元素	最大值	最小值	平均值	污染程度占比/%			
				清洁	轻度污染	中度污染	重度污染
Zn	0.750 0	0.002 5	0.053 6	100.00	0.00	0.00	0.00
Pb	1.300 0	0.250 0	0.268 5	99.16	0.84	0.00	0.00
Cr	0.120 0	0.010 0	0.010 9	100.00	0.00	0.00	0.00
As	15.000 0	0.050 0	0.848 7	86.55	4.20	5.04	4.20
Cu	0.074 0	0.002 5	0.017 5	100.00	0.00	0.00	0.00
Fe	1.000 0	0.016 7	0.058 5	100.00	0.00	0.00	0.00
Mn	25.800 0	0.220 0	3.600 1	10.92	22.69	21.85	44.54
Al	0.650 0	0.050 0	0.143 7	100.00	0.00	0.00	0.00
Hg	0.300 0	0.050 0	0.058 4	100.00	0.00	0.00	0.00
Ni	1.150 0	0.125 0	0.233 4	99.16	0.84	0.00	0.00

从内梅罗综合指数来看(表 7 和图 3),处于轻度污染的样点数量最大,占总样点数量的 36.13%,主要分布于豫东地区的开封市中西部和周口市的中东部等区域;处于重度污染的样地比例次之,占比为 31.09%,主要分布于豫东地区北部、中部和南部等区域;处于安全和警戒的样地数量相等,两者占比最小,均为 7.56%,零星分布于豫东地区东南部和西北部等区域。通过对重金属污染水平的对比分析发现,影响豫东地区地下水重金属污染的主导因素是 Mn,两者的相关系数高达 0.917 0,表明 Mn 元素超标是影响豫东地区地下水重金属污染的重要原因,与以上分析结果具有一致性。

表 7 豫东地区地下水重金属综合污染程度特征

Table 7 Characteristics of comprehensive heavy metal pollution in groundwater in eastern Henan Province

污染等级	样点数量	样点占比/%	主导元素
安 全	9	7.56	Mn
警戒	9	7.56	Mn
轻度污染	43	36.13	Mn
中度污染	21	17.65	Mn
重度污染	37	31.09	Mn

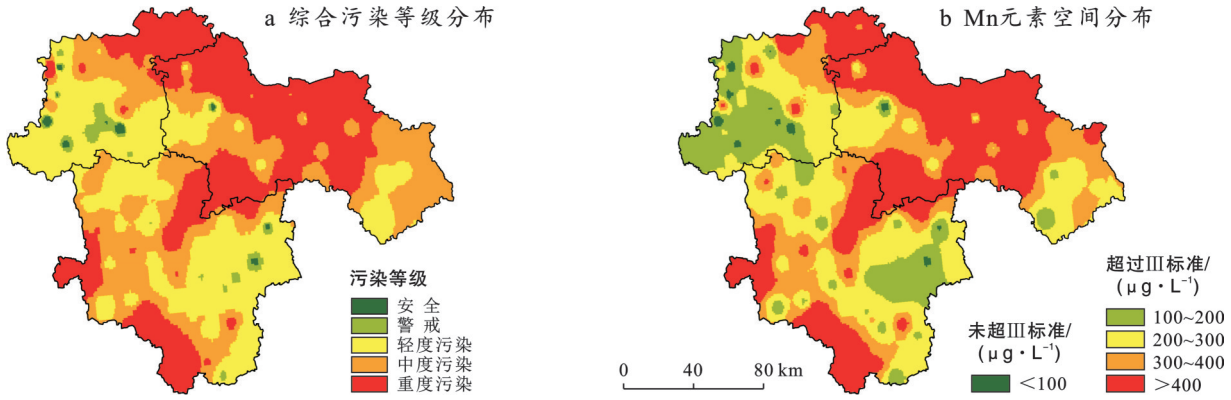


图 3 豫东地区地下水综合污染空间分布与主导污染因素

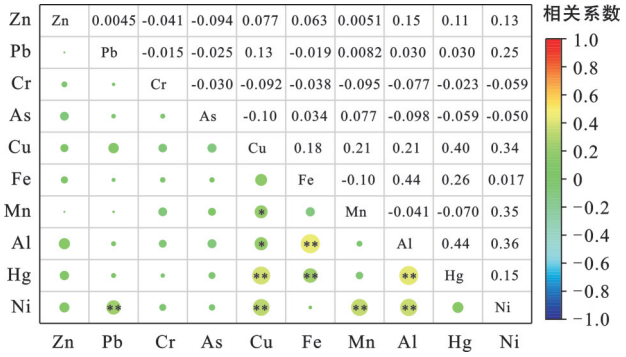
Fig.3 Spatial distribution and dominant pollution factors of comprehensive groundwater pollution in eastern Henan Province

2.3　地下水重金属污染来源解析

2.3.1　相关性和主成分分析

本文借助 Origin 软件平台中 Correlation Plot 插件获得豫东地区 10 种地下水重金属相关热力图(图 4)。由图 4 可知,Cu-Mn 和 Cu-Al 在 0.05 水平下显著相关,且相关系数均为正值;Pb-Ni, Cu-Hg, Cu-Ni, Fe-Al, Fe-Hg, Mn-Ni, Al-Hg, Al-Ni 在 0.01 水平下显著相关,且相关系数均为正值,表明这组元素之间具有极强的相关性。

本文运用 SPSS 软件开展 KMO 检验和 Bartlett 球形检验,结果显示 KMO 检验数值为 0.567,数值大于 0.5,且 Bartlett 球形检验数值为 145.294,显著性数值为 0,数值小于 0.05,总体表明豫东地区地下水重金属可以开展主成分分析。基于主成分特征值的基本特征,本文提取了特征值大于 1 的 4 个主成分,正交旋转后累计贡献率为 58.558%(表 8)。第一主成分的特征值为 2.264,主要载荷变量为 Fe, Al 和 Hg,载荷数值分别为 0.752,0.772,0.717;第二主成分的特征值为 1.470,主要载荷变量 Cu, Mn 和 Ni,载荷数值分别为 0.563,0.696,0.786;第三主成分的特征值为 1.104,主要载荷变量 Zn 和 As,载荷数值分别为 0.670,和 −0.772;第四主成分的特征值为 1.017,主要载荷变量 Pb 和 Cr,载荷数值分别为 0.610 和 0.628。



注:*和**分别表示 p 在≤0.05 和≤0.01 水平下显著。

图 4　豫东地区地下水重金属相关性

Fig.4　Correlation of heavy metals in groundwater in eastern Henan Province

表 8　豫东地区地下水重金属主成分分析结果

Table 8　Results of principal component analysis of heavy metals in groundwater in eastern Henan Province

成分	初始特征值			载荷平方和			旋转载荷平方和		
	总计	方差/%	累计/%	总计	方差/%	累计/%	总计	方差/%	累计/%
1	2.264	22.637	22.637	2.264	22.637	22.637	1.945	19.452	19.452
2	1.470	14.704	37.342	1.470	14.704	37.342	1.720	17.205	36.656
3	1.104	11.042	48.384	1.104	11.042	48.384	1.139	11.388	48.044
4	1.017	10.174	58.558	1.017	10.174	58.558	1.051	10.513	58.558
5	0.942	9.415	67.973	—	—	—	—	—	—
6	0.910	9.104	77.077	—	—	—	—	—	—
7	0.800	8.002	85.079	—	—	—	—	—	—
8	0.666	6.656	91.735	—	—	—	—	—	—
9	0.499	4.988	96.723	—	—	—	—	—	—
10	0.328	3.277	100.00	—	—	—	—	—	—

2.3.2　APCS-MLR 模型解析

基于 APCS-MLR 模型计算结果,同时在借鉴已有相关参考文献[3,6,11-12]及对豫东地区地下水各元素重金属进行综合分析的基础上,本文从工业源、农业源、自然源、交通源和未知源 5 个维度解析豫东地区地下水重金属污染来源(图 5)。从总体来看,工业源、未知源、农业源、自然源和交通源的平均贡献率依次递减,贡献比例依次为 41.44%, 20.81%, 18.72%, 12.57% 和 6.46%,但不同来源对各重金属的贡献具有显著差异性。工业源作为工业生产过程集中排放的污染源,是 Al, Cu, Hg, Fe 和 Ni 等重金属污染的主要来源,贡献比例均在 55% 以上,数值分别为 83.51%, 61.87%, 61.60%, 55.76% 和 55.34%;自然源是自然界自行产生的污染源,对 Mn, Fe 和 Ni 等重金属有着重要影响,贡献率分别为 29.75%, 22.20% 和 18.75%;交通源是交通工具运行产生的污染源,对 As, Cr, Fe, Pb, Mn 和 Zn 等有着一定的影响,其中,对 As 和 Cr 的影响较大,贡献率分别为 21.09% 和 10.34%;农业源是农业生产活动(种植、养殖)中形成的污染物通过地表径流等分散进入环境所形成的污染源,对 Pb, Zn, Cr 和 As 等的影响较大,贡献率均在 25% 以上,数值分别为 39.87%, 39.30%, 38.71% 和 25.35%。此外,未知源作为无法明确归因到上述已知类别的污染部分,也对各重金属具有一定的影响,平均影响为 20.81%,其中对 Zn, As, Mn, Cr, Cu 和 Pb 的影响超过平均水平。

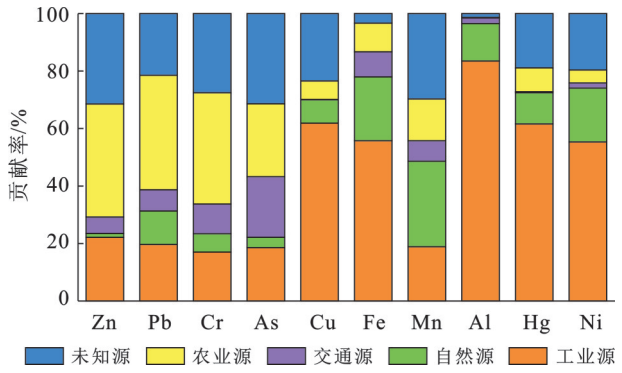


图5 豫东地区地下水重金属来源解析结果

Fig.5 Analysis results of heavy metal sources in groundwater in eastern Henan Province

通过上文分析结果可知,豫东地区地下水Mn的污染程度最高,结合APCS-MLR模型解析结果可知,工业源、自然源、交通源、农业源和未知源对Mn的贡献率分别为18.89%,29.75%,7.11%,14.55%和29.69%。豫东地区作为黄淮海平原的重要组成部分,黄河冲积平原有广泛富含Mn,Fe等矿物的土层,同时此类元素的富集经水文地球环境的还原等过程,使Mn,Fe重金属富集于地下水中[28]。邵丰收和周皓韵的已有研究结果也显示河南省土壤环境中Mn元素背景值较高[29];同时相关研究也发现,豫东地区部分区域地下水Mn元素超标,如郑连科等研究显示商丘市浅层地下水中的Mn和Fe等元素超标,部分样点Mn的超标倍数为12.4倍[30]。以上均可说明自然源是Mn污染的重要来源。此外,冶炼与加工行业、化工与制药行业和工业固废堆放等工业行业,以及化肥与农药使用、农业灌溉等农业生产都会从直接或间接等渠道影响地下水中的Mn元素;与此同时,未知源也会对该重金属产生一定的影响。

2.4 地下水重金属健康风险评估

本文根据USEPA健康风险评价模型,从饮水摄入和皮肤接触两种途径对豫东地区地下水重金属健康风险进行评价,具体评价结果见表9。非致癌元素在饮水摄入途径下,成人和儿童的非致癌健康风险具有相似性,Mn,Pb,Cu,Ni,Zn,Al,Hg和Fe的非致癌风险用危害商HQ依次递减,各元素的HQ均为成人大于儿童。在皮肤接触途径下,成人和儿童的非致癌健康风险同样具有相似性,Mn,Al,Cu,Ni,Hg,Fe,Pb和Zn的HQ依次递减,且成人的HQ均大于儿童的HQ。

通过对比饮水摄入和皮肤接触两种途径发现,皮肤接触途径的非致癌健康风险显著低于饮水摄入途径,两者相差2~4个数量级。从多种暴露途径下的综合风险数值HI来看,Mn,Pb,Cu,Ni,Al,Zn,Hg和Fe的成人HI依次递减,其中,Mn元素的HI最大,其值为1.14 E-01,但小于1,表示非致癌化学物质Mn对成人人体的非致癌风险在可接受范围内,其余元素的HI的数值范围为9.52 E-04~2.54 E-02,同样表明这些元素对成人人体的非致癌风险在可接受范围内;儿童的HI值从大到小依次为:Mn>Pb>Cu>Ni>Zn>Al>Hg>Fe,数值范围为4.58 E-04~5.44 E-02,表明这些元素对儿童人体的非致癌风险在可接受范围内。

对于致癌元素,As元素成人和儿童的致癌风险指数CR分别为1.17 E-05,5.66 E-06,Cr元素成人和儿童的CR分别为7.76 E-05,3.74 E-05。由此可见,As和Cr元素的CR数值均介于USEPA分级中的1.00×10^{-6}~1.00×10^{-4},表明致癌元素的健康风险在可接受范围内。

表9 豫东地区地下水非致癌重金属健康风险

Table 9 Health risks of non-carcinogenic heavy metals in groundwater in eastern Henan Province

元素	$HQ_{饮水摄入}$		$HQ_{皮肤接触}$		$HI_{综合风险}$	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
Zn	2.98 E-03	1.44 E-03	3.20 E-07	8.80 E-08	2.98 E-03	1.44 E-03
Pb	2.54 E-02	1.22 E-02	6.06 E-07	1.66 E-07	2.54 E-02	1.22 E-02
Cu	6.21 E-03	2.99 E-03	7.40 E-05	2.03 E-05	6.28 E-03	3.01 E-03
Fe	9.48 E-04	4.57 E-04	3.77 E-06	1.04 E-06	9.52 E-04	4.58 E-04
Mn	1.12 E-01	5.40 E-02	1.71 E-03	4.69 E-04	1.14 E-01	5.44 E-02
Al	2.88 E-03	1.39 E-03	1.72 E-04	4.72 E-05	3.05 E-03	1.44 E-03
Hg	2.64 E-03	1.27 E-03	6.55 E-06	1.80 E-06	2.65 E-03	1.28 E-03
Ni	3.25 E-03	1.56 E-03	7.17 E-06	1.97 E-06	3.25 E-03	1.57 E-03

3 讨 论

本文以河南省豫东地区为研究区,在揭示地下水重金属元素的浓度与空间分布等基本特征的基础上,对豫东地区地下水重金属污染特征和健康风险状况进行评价。研究结果显示,豫东地区Mn,As,

Pb和Ni元素的最大值均超过《地下水质量标准(GB/T 14848—2017)》,本文数值均高于张妍等[31]对黄河下游引黄灌区研究的对应元素数值,低于杨彦等[32]对常州市浅层地下水重金属的分析结果,并与中国不同地区地下水重金属含量变化差异相对较小[10],但其中Mn元素作为超标的主要元素,其是引起豫东地区地下水重金属污染的主要元素,主要分布于开封市东北部、商丘市中西部和周口市西南部等区域,与郑连科等研究结果基本相符[30]。经过对豫东地区地下水重金属污染来源解析结果可知,工业源、未知源、农业源、自然源和交通源等维度对各种地下水重金属的影响具有较大的差异性,作为典型的农业区,随着社会经济的发展,工业源和农业源是多数地下水重金属的重要来源,此外,自然源和未知源也是各种地下水重金属的重要来源,该研究与段海静等[33]、刘德新等[34]和罗静等[35]研究结果具有较高相似性。

本文借助USEPA健康风险模型对豫东地区地下水重金属健康风险进行评价,结果显示,豫东地区10种地下水重金属中的非致癌元素和致癌元素在饮水摄入和皮肤接触两种途径对成人和儿童的健康风险均低于USEPA推荐的分级标准,表明豫东地区这10种重金属元素通过饮水摄入和皮肤接触等途径对人体的影响均在可接受范围内,同时通过对比两种途径发现饮水摄入比皮肤接触的健康风险高2~4个数量级的结果与师环环等[11]的研究结果具有一致性。此外,研究发现,虽然Mn元素的HI最大,为1.14 E−01,表明Mn对成人人体的非致癌风险在可接受范围内,但作为影响人体健康的数值最高的元素,仍需要加强监管。这与本文对地下水重金属污染评价的结果一致。

本文选取了饮水摄入和皮肤接触两种途径对豫东地区地下水重金属健康风险状况进行评价,仍可从吸入和食入等途径详细研究各类重金属对人体的健康风险状况;同时,本文选用的部分参数按照了USEPA给定的数值,与豫东地区的基本情况存在些许差异,致使结果存在一些不确定性[36]。然而,本研究结果仍可对豫东地区地下水重金属监管与调控提供理论参考。针对豫东地区地下水重金属污染状况,秉承预防为主、防治结合、系统治理等原则,构建多策略、分阶段、长期性的综合方案,有针对性地对Mn, As, Pb和Ni的来源进行系统解析与有效甄别,通过源头管控、过程阻断、末端修复、制度保障与公众参与的协同推进机制,最大限度地减轻豫东地区地下水重金属污染的危害,保障区域水资源安全和生态环境健康。

4　结 论

(1) 各重金属元素平均浓度顺序为:Mn>Zn>Al>Fe>Cu>As>Ni>Pb>Cr>Hg,其中,Mn元素浓度平均值超过了《地下水质量标准(GB/T 14848—2017)》中的Ⅲ类标准限值,超标率为89.06%;As,Pb和Ni的最大值均超过国家Ⅲ类标准限值。豫东地区地下水不同重金属的浓度状况与空间分布等具有较为显著的差异性,其是该区域地下水合理利用与重金属管控的基础。

(2) 从平均水平来看,单因子污染指数的数值从大到小依次为:Mn>As>Pb>Ni>Al>Fe>Hg>Zn>Cu>Cr,其中,除Mn的平均水平为重度污染以外,其余重金属的平均水平均为清洁。从内梅罗综合指数来看,处于轻度污染和重度污染的样点比例分别为36.13%和31.09%;研究表明影响豫东地区地下水重金属的主导因素是Mn,其是未来该区域地下水重金属监管与调控的重要内容。

(3) APCS-MLR模型解析结果显示,工业源、未知源、农业源、自然源和交通源的平均贡献率依次递减,贡献比例依次为41.44%, 20.81%, 18.72%, 12.57%和6.46%,但不同来源对各重金属的贡献具有显著差异性。在识别不同地下水重金属污染来源的基础上,科学有序制定针对性措施,因地制宜地推进豫东地区地下水重金属污染源管控是推进该区域地下水持续利用的关键。

(4) 在饮水摄入和皮肤接触途径下,成人和儿童的非致癌风险均在可接受范围内,且皮肤接触途径的非致癌健康风险显著低于饮水摄入途径;对于致癌元素,As和Cr元素对成人和儿童的致癌风险指数均介于USEPA分级中的1.00×10^{-6}~1.00×10^{-4},其致癌元素的健康风险在可接受范围内。充分结合地下水重金属健康风险状况,适时动态监测其健康风险变化状况,仍是该区域地下水健康风险研究的重要内容。

参考文献(References)

[1] 中华人民共和国水利部.中国水资源公报[R].北京:中国水利水电出版社,2024.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China water resources bulletin [R]. Beijing: China Water&Power Press, 2024.

[2] 钱建平,李伟,张力,等.地下水中重金属污染来源及研究方法综析[J].地球与环境,2018,46(6):613-620.
Qian Jianping, Li Wei, Zhang Li, et al. Source and research status of heavy metal pollution in groundwater: A review [J]. Earth and Environment, 2018, 46(6): 613-620.

[3] 陈慧,赵鑫宇,常帅,等.华北平原典型城市(石家庄)地下水重金属污染源解析与健康风险评价[J].环境科学,2023,44(9):4884-4895.
Chen Hui, Zhao Xinyu, Chang Shuai, et al. Source analysis and health risk assessment of heavy metals in the groundwater of Shijiazhuang, a typical city in north China Plain [J]. Environmental Science, 2023, 44(9): 4884-4895.

[4] Zhang Yaobin, Zhang Qiulan, Chen Wenfang, et al. Source apportionment and migration characteristics of heavy metal (loid) s in soil and groundwater of contaminated site [J]. Environmental Pollution, 2023, 338: 122584.

[5] 艾提业古丽·热西提,麦麦提吐尔逊·艾则孜,王维维,等.博斯腾湖流域地下水重金属污染的人体健康风险评估[J].生态毒理学报,2019,14(2):251-259.
Atiyagul Rixit, Mamattursun Eziz, Wang Weiwei, et al. The human health risk assessment of heavy metal pollution of ground-water in Bosten Lake basin [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019,14(2):251-259.

[6] 吕海洋,党秀丽,朱影影,等.河南省典型工业区地下水水质分析及重金属健康风险评价[J].农业环境科学学报,2023,42(12):2740-2751.
Lü Haiyang, Dang Xiuli, Zhu Yingying, et al. Groundwater quality analysis and health risk assessment of heavy metals in industrial areas of Henan Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(12): 2740-2751.

[7] 姜雪涵,彭红霞,潘羽杰,等.广州市地下水重金属污染溯源及健康风险评价[J].环境科学,2025,46(11):6880-6893.
Jiang Xuehan, Peng Hongxia, Pan Yujie, et al. Source determination and health risk assessment of heavy metals in groundwater of Guangzhou [J]. Environmental Science, 2025,46(11):6880-6893.

[8] 艳艳,高瑞忠,刘廷玺,等.西北盐湖流域地下水重金属的污染特征及健康风险[J].环境化学,2023,42(12):4217-4228.
Yan Yan, Gao Ruizhong, Liu Tingxi, et al. Pollution characteristics and health risks of groundwater from heavy metals in northwest salt lake basin [J]. Environmental Chemistry, 2023,42(12):4217-4228.

[9] 王晓东,田伟,张雪艳.宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评价[J].环境科学,2022,43(1):329-338.
Wang Xiaodong, Tian Wei, Zhang Xueyan. Distribution characteristics and health risk assessment of metal elements for groundwater in the Ningxia region of China [J]. Environmental Science, 2022,43(1):329-338.

[10] 艾提业古丽·热西提,麦麦提吐尔逊·艾则孜,迪力夏提·司马义,等.博斯腾湖流域浅层地下水重金属分布特征[J].地球与环境,2019,47(3):345-351.
Rixit Atiyagul, Eziz Mamattursun, Ismayil Dilxat, et al. Distribution characteristics of heavy metals in shallow groundwater in the Bosten Lake basin [J]. Earth and Environment, 2019,47(3):345-351.

[11] 师环环,潘羽杰,曾敏,等.雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价[J].环境科学,2021,42(9):4246-4256.
Shi Huanhuan, Pan Yujie, Zeng Min, et al. Source analysis and health risk assessment of heavy metals in groundwater of Leizhou Peninsula [J]. Environmental Science, 2021,42(9):4246-4256.

[12] 陈雯,余绍文,廖金,等.南昌东北部地下水重金属污染源解析及健康风险评价[J].环境科学,2025,46(2):854-863.
Chen Wen, Yu Shaowen, Liao Jin, et al. Source analysis and health risk assessment of heavy metals in groundwater in the northeast of Nanchang City [J]. Environmental Science, 2025,46(2):854-863.

[13] Peng Yizhou, Yu G I. Assessment of heavy metal pollution on agricultural land in Chengdu City under different anthropogenic pressures based on APCS-MLR modelling [J]. Ecological Indicators, 2024,165:112183.

[14] 和永贤,许鸿,王健康,等.新疆典型地区地表水与地下水重金属分布特征及健康风险评价[J].环境化学,2024,43(11):3716-3732.
He Yongxian, Xu Hong, Wang Jiankang, et al. Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface water and groundwater in typical areas of Xinjiang [J]. Environmental Chemistry, 2024, 43(11):3716-3732.

[15] 姬晓雅,乔家君,夏兴,等.豫东地区专业村人-地-业时空耦合状态与动态特征[J].河南大学学报(自然科学版),2024,54(1):1-14.
Ji Xiaoya, Qiao Jiajun, Xia Xing, et al. Dynamic and static characteristics of spatiotemporal coupling among professional villages population, land and industry in eastern part of Henan Province [J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2024,54(1):1-14.

[16] 黄鑫鹤.基于GRACE卫星和MODFLOW模型的河南省地下水时空演变特征研究[D].河南 开封:河南大学,2024.
Huang Xinhe. Characterization of spatial and temporal evolution of groundwater in Henan Province based on GRACE satellite and MODFLOW models [D]. Kaifeng, Henan: Henan University, 2024.

[17] Thurston G D, Spengler J D. A quantitative assessment of source contributions to inhalable particulate matter

pollution in metropolitan Boston [J]. Atmospheric Environment (1967), 1985,19(1):9-25.

[18] 王美华.PCA-APCS-MLR和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析[J].环境科学,2023,44(6):3509-3519.
Wang Meihua. Source analysis of heavy metals in typical farmland soils based on PCA-APCS-MLR and geostatistics [J]. Environmental Science, 2023, 44(6): 3509-3519.

[19] United States Environmental Protection Agency. Edition of the drinking water standards and health advisories [S]. Washington DC: Office of Water, United States Environmental Protection Agency, 2012.

[20] 刘蕊,张辉,勾昕,等.健康风险评估方法在中国重金属污染中的应用及暴露评估模型的研究进展[J].生态环境学报,2014,23(7):1239-1244.
Liu Rui, Zhang Hui, Gou Xin, et al. Approaches of health risk assessment for heavy metals applied in China and advance in exposure assessment models: A review [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(7):1239-1244.

[21] 赵秀阁,段小丽.中国人群暴露参数手册:成人卷概要[M].北京:中国环境出版社,2014.
Zhao Xiuge, Duan Xiaoli. Highlights of the Chinese exposure factors handbook: Adults [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014.

[22] 段小丽.中国人群暴露参数手册概要:儿童卷[M].北京:中国环境出版社,2016.
Duan Xiaoli. Highlights of the Chinese exposure factors handbook: Children [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016.

[23] 常帅,宋圆梦,陈慧,等.华北典型区域地下水重金属来源解析及健康风险识别[J].中国环境监测,2024,40(4):172-182.
Chang Shuai, Song Yuanmeng, Chen Hui, et al. Source apportionment and health risk identification of heavy metals in groundwater for typical district in north China [J]. Environmental Monitoring in China, 2024, 40(4):172-182.

[24] 付蓉洁,辛存林,于奭,等.石期河西南子流域地下水重金属来源解析及健康风险评价[J].环境科学,2023,44(2):796-806.
Fu Rongjie, Xin Cunlin, Yu Shi, et al. Analysis of heavy metal sources in groundwater and assessment of health risks: An example from the southwest sub-basin of the Shiqi River [J]. Environmental Science, 2023,44(2):796-806.

[25] 刘勐琦,邬梦成,徐东,等.典型历史遗留氰化尾渣堆场周边土-水系统中重金属源解析及风险评估[J].环境科学学报,2025,45(5):401-413.
Liu Mengqi, Wu Mengcheng, Xu Dong, et al. Source analysis and risk assessment of heavy metals in the soil-water system surrounding a typical historical cyanide tailings landfill site [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2025,45(5):401-413.

[26] 谢龙涛,潘剑君,白浩然,等.基于GIS的农田土壤重金属空间分布及污染评价:以南京市江宁区某乡镇为例[J].土壤学报,2020,57(2):316-325.
Xie Longtao, Pan Jianjun, Bai Haoran, et al. GIS-based spatial distribution and risk assessment of heavy metals in farmland soils: A case study of a town of Jiangning, Nanjing [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(2):316-325.

[27] 赵曼宇,马泉来,孙晓兵,等.河南省黄河流域耕地NPP时空变化特征及其驱动因子[J].水土保持通报,2025,45(3):385-396.
Zhao Manyu, Ma Quanlai, Sun Xiaobing, et al. Spatio-temporal variation in NPP of cultivated land and its driving factors in Yellow River basin of Henan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(3):385-396.

[28] 寇亚飞,陈光宇,王利.黄淮海平原劣质地下水分布及其成因分析[J].人民黄河,2013,35(2):39-41.
Kou Yafei, Chen Guangyu, Wang Li. Analysis of the inferior groundwater distribution and formation causes in Huang-Huai-Hai Plain [J]. Yellow River, 2013, 35(2):39-41.

[29] 邵丰收,周皓韵.河南省主要元素的土壤环境背景值[J].河南农业,1998(10):29.
Shao Fengshou, Zhou Haoyun. Soil environmental background values of main elements in Henan Province [J]. Agriculture of Henan, 1998(10):29.

[30] 郑连科,王媛媛,郑华山.商丘市浅层地下水水质现状及安全饮水对策[J].河南水利与南水北调,2006,35(3):14.
Zheng Lianke, Wang Yuanyuan, Zheng Huashan. Present situation of shallow groundwater quality in Shangqiu City and countermeasures for safe drinking water [J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2006,35(3):14.

[31] 张妍,李发东,欧阳竹,等.黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估[J].环境科学,2013,34(1):121-128.
Zhang Yan, Li Fadong, Ouyang Zhu, et al.Distribution and health risk assessment of heavy metals of groundwaters in the irrigation district of the lower reaches of Yellow River [J]. Environmental Science, 2013, 34(1):121-128.

(下转第 171 页)