

平邑县农村地区地下水中重金属特征研究

张 芳^{1,2}, 常春平^{2*}, 李 静¹, 宋 帅¹, 蔡文静^{1,2}, 李发东^{1*}

(1.中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101 2.河北师范大学资源与环境科学学院 河北省环境演变与生态建设重点实验室, 石家庄 050024)

摘 要:地下水是农村地区的重要饮用水源之一,对其重金属的评价是水质评价的重要内容。使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)对山东省平邑县 49 个村庄的地下水中的重金属 Cu、Fe、Pb、Zn、Cr 和 Cd 的浓度进行了测定,并对其分布特征和主要来源进行了探讨。结果显示,该研究区地下水中 Cu、Fe、Pb、Zn、Cr 和 Cd 的含量范围分别为 0~0.127、0.01~0.532、0~0.006、0.025~8.459、0~0.035、0~0.001 mg·L⁻¹。取样点的重金属浓度大多符合我国饮用水质量标准和 EPA 饮用水质量标准,只有 2 个样点 Fe 的含量和 3 个样点 Zn 的含量超出了我国饮用水质量标准和 EPA 饮用水质量标准。通过相关分析发现,该区地下水中 6 种重金属元素中 Zn 和 Fe 以及 Cr 和 Pb 存在极显著的相关性,据此可以判断,Zn 和 Fe、Cr 和 Pb 的来源或迁移路径可能相同。利用地理信息系统软件(ArcGis)的反距离权重法(Inverse distance weighting)对该县地下水中重金属浓度的分布特征进行分析,结果发现,该区地下水中 Cu、Fe、Pb、Zn、Cr 和 Cd 的浓度呈现斑块状分布,空间差异性强,这表明该地重金属的浓度差异与人类活动有关。

关键词:地下水;重金属;相关性分析;空间分布;来源分析

中图分类号:X523 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)01-0127-08 doi:10.11654/jaes.2013.01.019

Distribution of Heavy Metal Concentrations of Groundwater in Rural Areas in Pingyi County

ZHANG Fang^{1,2}, CHANG Chun-ping^{2*}, LI Jing¹, SONG Shuai¹, CAI Wen-jing^{1,2}, LI Fa-dong^{1*}

(1.Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2.College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract: Groundwater is one of the most important water resources for drinking in the rural areas, so the assessment of heavy metals in groundwater is essential for evaluating water quality. In this study, groundwater samples were taken from 49 villages in Pingyi County which is a representative mountainous area in the south of Shandong Province, China. The concentrations of Cu, Fe, Pb, Zn, Cr, and Cd were analyzed using Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer(ICP-OES). The results indicated that the concentrations of Cu, Fe, Pb, Zn, Cr, and Cd ranged from 0~0.127 mg·L⁻¹, 0.01~0.532 mg·L⁻¹, 0~0.006 mg·L⁻¹, 0.025~8.459 mg·L⁻¹, 0~0.035 mg·L⁻¹, 0~0.001 mg·L⁻¹ respectively. The concentrations of heavy metals of most samples were lower than the limited values of drinking water standard of China and EPA. However, Fe concentrations of 2 samples and Zn concentrations of 3 samples exceed drinking water standard of China and EPA. Correlation analysis demonstrated that Zn and Fe, Cr, and Pb showed a significant correlation in pairs, which suggest Zn and Fe, Cr and Pb have similar sources or transfer path in the study area. The spatial differentiations of 6 heavy metal concentrations were large with a character of patchy distribution, suggesting their concentrations may be influenced by human activities.

Keywords: groundwater; heavy metal; correlation analysis; spatial distribution; pollution sources

收稿日期:2012-08-16

基金项目:中国科学院“百人计划”项目

作者简介:张 芳(1987—),女,河北沧州人,硕士,主要研究方向为水资源管理与水环境评价。E-mail:zhang870515@126.com

* 通信作者:常春平

李发东 E-mail:lifadong@igsrr.ac.cn

国外尤其是发展中国家对农村地区地下水重金属污染的研究比较普遍^[10-12],并得出了大量具有指导意义的结论。国内对地下水重金属污染的研究也取得了一定的成果,但是很多研究都集中在工业发达地区和污灌区^[13-14],有关山东半岛农村地区地下水中重金属的研究还未见报道。本文以山东省平邑县为研究区域,对该县地下水中 Cu、Fe、Pb、Zn、Cr 和 Cd 的浓度、分布特征、来源以及各元素之间的相关关系进行了分析,为该地区水质安全评价、综合治理及进一步研究重金属的循环和生态环境保护提供科学依据。

1.1 研究区概况

显的沿西北至东南方向以浚河谷地为中轴线的条带状分布规律^[16]。本区地下水的主要来源是大气降水,大气降水后除形成地表径流外,其余渗入地下首先形成表层地下水,表层地下水受地形及重力作用的影响,一部分呈短距离径流排泄转为地表水,另一部分垂直下渗至潜水面以下,形成地下水^[17]。

于 2011 年 7 月采集了平邑县 49 个村庄 (图 1) 的地下水样, 所有水样经 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤后, 加优级纯硝酸酸化至 $\text{pH}<2$, 确保重金属呈离子状态而不被吸附或产生沉淀, 存储于聚乙烯塑料瓶中, 密封保存, 运回实验室置于冰箱 ($4\ ^\circ\text{C}$) 保存。

使用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES) 测定所有水样中 Cu、Fe、Pb、Zn、Cr 和 Cd 的浓度,超纯水、空白及样品的处理测定 6 次,取后 3 次的平均值作为分析结果。样品测定完毕后再次测定标准样品,以确保数据的分析误差控制在 3% 以内。

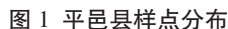


Figure 1 Water sample sites

1.4 统计分析方法

为了研究各重金属元素之间的相关性及其相似性,本文使用数据统计软件(SPSS 17.0)对所有数据进行了线性相关分析和系统聚类分析^[18],采用地理信息系统(ArcGis)的反距离权重法(Inverse distance weighting)插值分析重金属的空间分布特征。

2 结果与讨论

2.1 地下水中主要重金属的含量

研究区内各水样中,Cu、Fe、Pb、Zn、Cr 和 Cd 均有检出,检出率分别为 87.76%、100%、30.61%、100%、51.02%、65.30%,含量范围分别为 0~0.127、0.01~0.532、0~0.006、0.025~8.459、0~0.035 mg·L⁻¹、0~0.001 mg·L⁻¹。该区地下水中重金属的平均浓度为 Zn>Fe>Cu>Cr>Pb>Cd。由表 1 可知,研究区所有样点地下水中 Cu、Pb、Cr 和 Cd 的浓度均低于国家饮用水质量标准^[19]和 EPA 饮用水质量标准^[20],这表明该区地下水暂未受到重金属 Cu、Pb、Cr 和 Cd 的污染。但是该地有 2 个样点 Fe 的含量和 3 个样点 Zn 的含量超出了国家饮用水质量标准和 EPA 饮用水质量标准,Fe 的浓度分别超标 77.33%和 6.33%,Zn 的浓度分别超标 745.90%(EPA 标准 69.18%)、704.40%(EPA 标准 60.88%)和 426.30%(EPA 标准 60.88%)。如果长期饮用,会对身体健康产生威胁。

2.2 相关分析与聚类分析

用数据统计软件(SPSS 17.0)对平邑县地下水中 Cu、Fe、Pb、Zn、Cr 和 Cd 的浓度分别进行了相关分析和聚类分析,目的是探究这 6 种重金属元素之间的相互关系,进而分析重金属在地下水中的分布迁移特征。由表 2 可知,6 种重金属元素中 Zn 和 Fe 具有极显著的正相关性,这与王卫中等^[21]对济宁市地下水中重金属的研究结果相一致。此外,Cr 和 Pb 也呈现出了极显著的正相关性。这表明,该区地下水中 Zn 和

表 2 平邑县地下水中 Cu、Fe、Zn、Pb、Cr 和 Cd 的相关性分析
Table 2 Correlation coefficient between heavy metals of Cu, Fe, Zn, Pb, Cr, and Cd of groundwater samples in Pingyi County

	Cu	Fe	Zn	Pb	Cr	Cd
Cu	1					
Fe	-0.115	1				
Zn	-0.204	0.416**	1			
Pb	0.184	0.059	-0.053	1		
Cr	0.224	0.102	-0.119	0.413**	1	
Cd	0.067	0.201	-0.006	-0.016	0.013	1

注:** 显著性相关 0.01(双尾)。
Note: **Correlation is significant at 0.01 level(2-tailed).

Fe、Cr 和 Pb 的来源或迁移路径可能相同^[7,22-23]。

聚类分析结果(图 2)显示,Zn 和 Fe 以及 Cr 和 Pb 的相似性最好,与相关分析结果相一致。在相对较大测度值上 Zn、Fe 和 Cd 属于同一类,Pb、Cr 和 Cu 属于同一类,这与黄冠星等^[14]在珠江三角洲污灌区地下水重金属含量及其相互关系中的研究结果较一致。已有研究结果发现,属于同一类的元素可能具有相同的来源^[24-25]。

2.3 分布特征及来源

由图 3~图 7 可以看出,平邑县地下水中 Cu、Fe、Pb、Zn、Cr 和 Cd 的浓度总体上呈斑块状分布,个别点

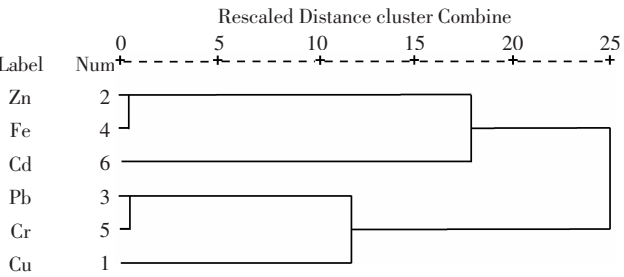


图 2 地下水重金属元素聚类分析树型图
Figure 2 Dendrogram obtained by hierarchical clustering analysis for heavy metals

表 1 平邑县地下水中重金属浓度统计结果
Table 1 Heavy metal concentrations of groundwater samples in Pingyi County

项目	Cu	Fe	Pb	Zn	Cr	Cd
检出率/%	86.20	100	31.03	100	53.45	63.79
最大值/mg·L ⁻¹	0.127	0.532	0.006	8.459	0.035	0.001
最小值/mg·L ⁻¹	0	0.010	0	0.025	0	0
平均值/mg·L ⁻¹	0.021	0.053	0.000 7	0.550	0.005	0.000 7
标准差	0.024	0.084	0.001 4	1.767	0.006 8	0.000 5
国家饮用水标准(GB 5749—2006)	1.0	0.3	0.01	1.0	0.05	0.005
EPA 饮用水质量标准	1.0	0.3	0.015	5	0.1	0.005

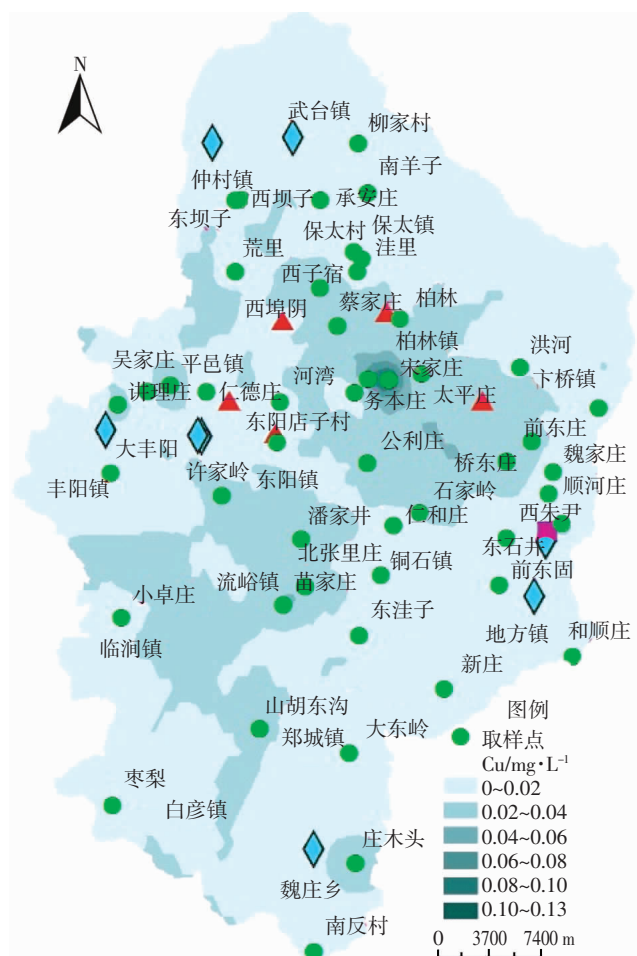


图 3 Cu 含量分布

Figure 3 The distribution of Cu

位含量较高,甚至超标,但大部分样点含量较低,变化范围不大,符合饮用水质量标准。含量较高的样点不连续,且大多分布在工业或农业较发达的地区,所以工业废水和农业面源污染可能是造成重金属含量超标的主要原因。济宁市位于山东省南部,东邻平邑县所在的临沂市,地质构造和水文条件与平邑县相似。通过与 2003 年测得的济宁市深井水中重金属含量^[21]进行比较可以看出,平邑县地下水中重金属含量明显高于济宁市(表 3),这也可以说明,平邑县地下水中重金属的含量已经受到人类活动的影响。

由图 3 可知,平邑县地下水中 Cu 含量最高的区域是柏林镇,其他地区含量均较低。含量最高的两个样点分别是柏林镇的宋家庄($0.127 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和务本庄($0.081 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),这与柏林镇高度发达的石膏生产加工业密切相关。柏林镇在对资源开采利用的同时也产生了大量的废弃物,主要是以硫酸钙为主要成分的工业废渣,在风蚀和溶滤的作用下,这些物质进入土壤

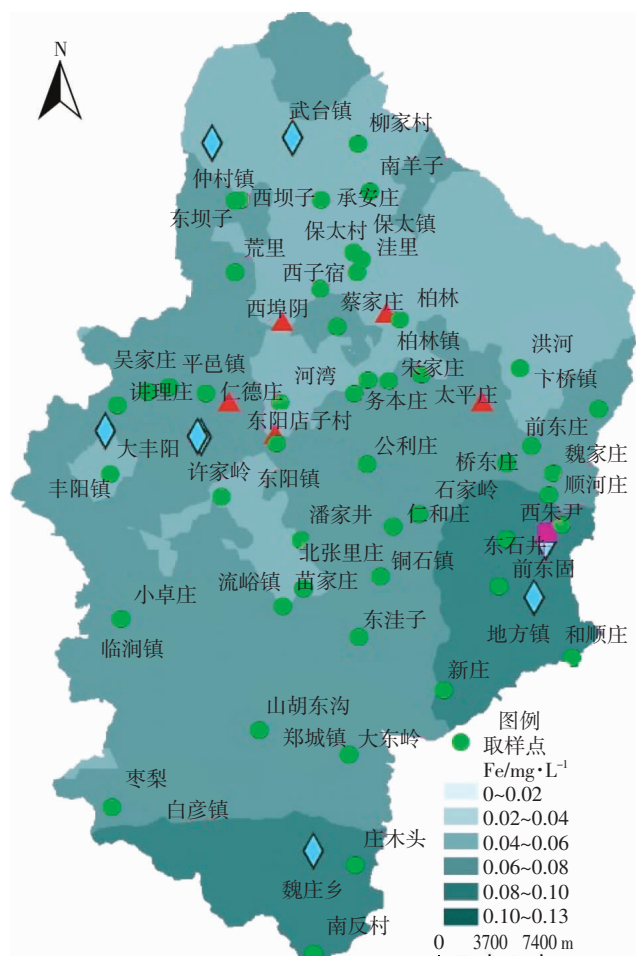


图 4 Fe 含量分布

Figure 4 The distribution of Fe

和地下水中,增强了地下水体的酸度。已有研究表明^[26],水体的酸碱度和水中 Cu 的含量呈负相关关系,即水体的酸性越强,水体中 Cu 含量越高。此外,硬石膏伴生一种疏砷铜矿,可能是该地地下水中 Cu 的另一来源。虽然目前平邑县地下水中 Cu 含量未超出国家饮用水质量标准,但是如果不积极采取治理措施,平邑县地下水将会受到 Cu 的污染,以致破坏生态环境并危害人体健康。

平邑县地下水中 Fe 浓度分布较均匀,两个含量最高的点(图 4)分别出现在地方镇的西朱尹村($0.532 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和魏庄乡的南反村($0.319 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),均超出了我国饮用水质量标准和 EPA 饮用水质量标准。相关研究表明^[27],地下水中 Fe 元素的分布特征主要与区域土壤母质、土壤类型和人为活动等因素相关,已有研究^[28]提出质地粘重、pH 较低的土壤,其中大量的 Fe 离子会游离出来进入到地下水中,有利于 Fe 离子的富集和迁移,从而导致地下水中 Fe 含量较高。西朱尹

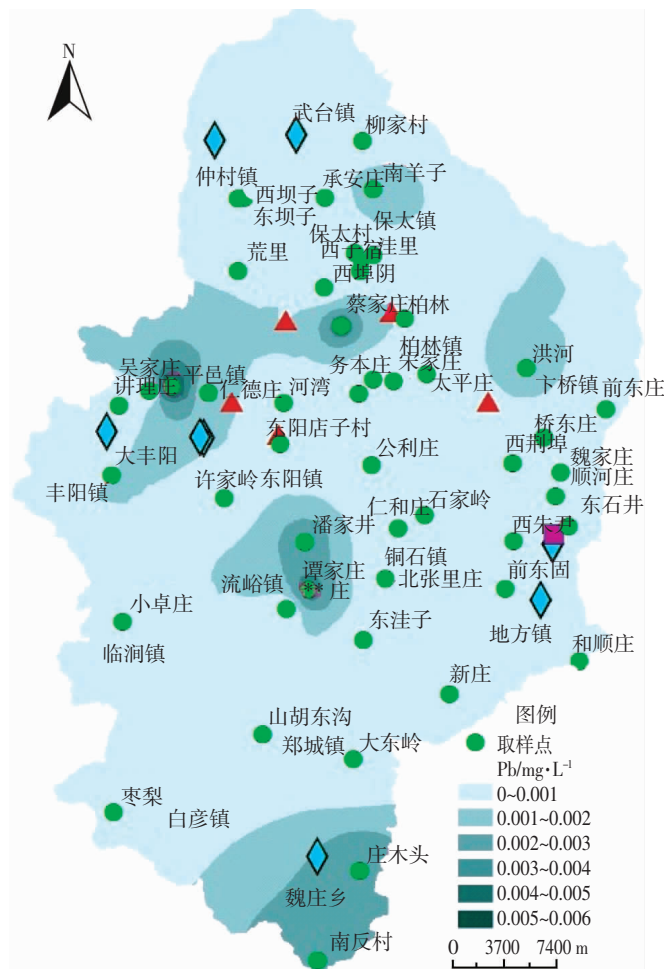


图 5 Pb 含量分布

Figure 5 The distribution of Pb

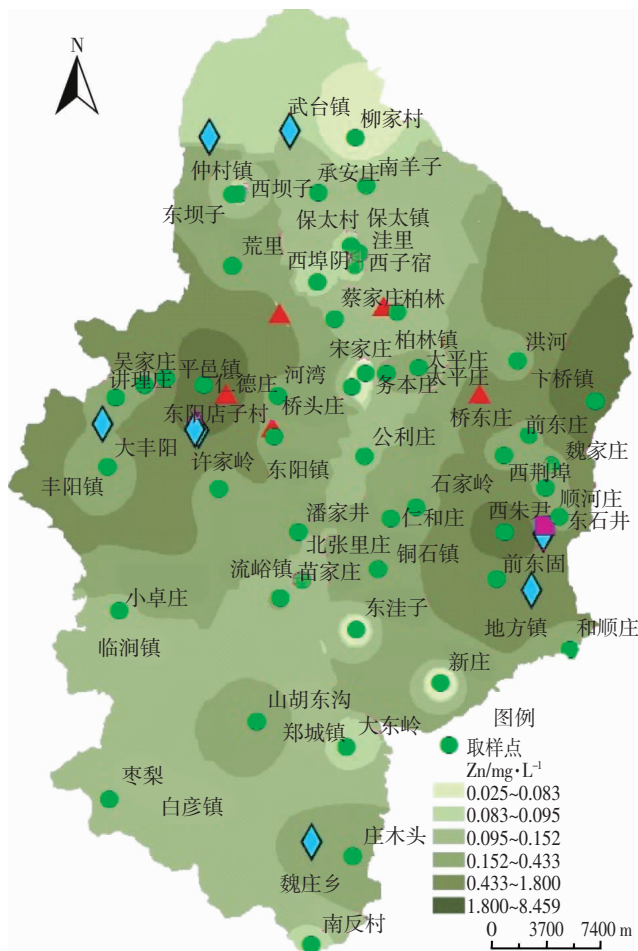


图 6 Zn 含量分布

Figure 6 The distribution of Zn

村属于地方镇,该镇罐头产业十分发达,废水产生量大,并且该村紧邻“齐鲁罐头城”工业园区内的金达印铁制盖厂,此外该镇位于浚河谷地,地势平缓,土层较厚,有利于地表水及降水的下渗^[17],所以大量含 Fe 离子等有毒物质的废水会随地表水直接下渗到地下水中。废水的排出增加了土壤的酸性,也使大量 Fe 离子游离出来进入地下水。魏庄乡南反村位于平邑县的南部山区,附近工业不发达,地下水受人为因素干扰较小,有研究发现^[29],地下水中 Fe 的浓度可能与含水介质中 Fe 含量有关,南反村位于苍山脚下,苍山是临沂市主要的铁矿石储藏地,这可能是南反村附近地下水中 Fe 浓度较高的主要原因。

平邑县地下水中 Pb 的检出率比较低(31%),其浓度变化范围不大($0.001 \sim 0.006 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。整个县域内由北至南出现了蔡家庄($0.004 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、吴家庄($0.006 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、谭家庄($0.004 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 3 个浓度较高的点(图

5),其他样点含量都较低或未检出。已有研究结果显示^[30],Pb 主要来源于人为污染^[25],蔡家庄和吴家庄地下水中的 Pb 可能来源于禽畜的粪便。现场调查发现,这两个村庄都有养殖场,由于饲料添加剂的大量使用,使禽畜粪便中 Pb 的含量越来越高,并且随着堆腐时间的延长呈不断增加趋势^[31],如果处理不当,会随地表水进入到土壤和地下水中。但是谭家庄地下水中的 Pb 可能与该地地质条件有关,谭家庄有丰富的页岩矿藏,页岩中可能有 Pb 的矿床,以致该地地下水中 Pb 浓度较大。

由图 6 可知,平邑县地下水中 Zn 的浓度范围变化较大,其中浓度最高即超标的 3 个样点分别是平邑镇的仁德庄($8.459 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、卞桥镇的前东庄($8.044 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和地方镇的西朱尹村($5.263 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。Zn 的主要污染来源是工业生产和液肥、粪肥以及农药化肥的使用^[32]。平邑镇工业园以造纸包装产业以及机械铸

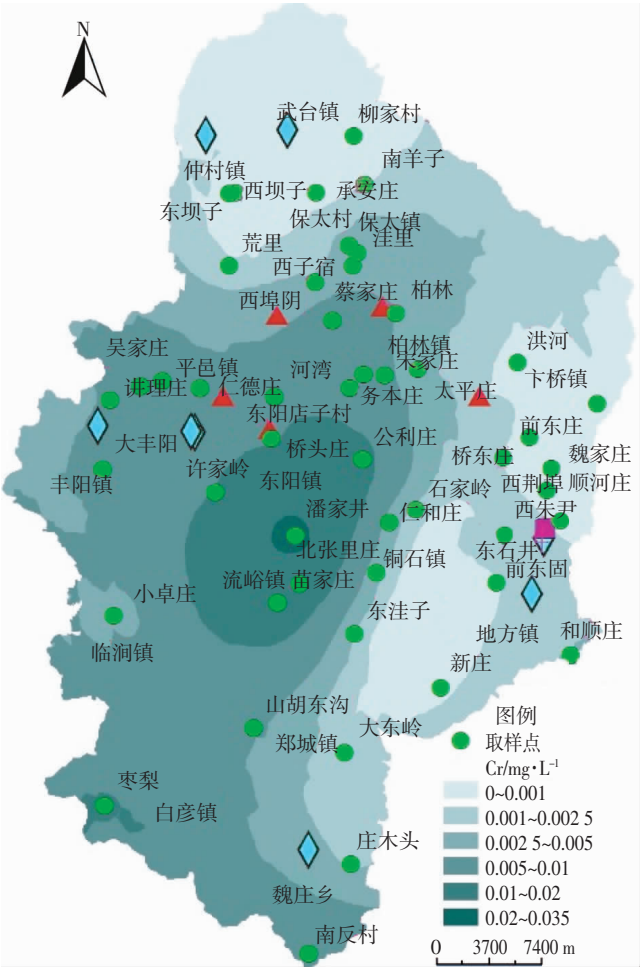


图 7 Cr 含量分布
Figure 7 The distribution of Cr

表 3 不同地区地下水中重金属含量对比($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
Table 3 Comparison of heavy metal concentration in the study area to those in vicinity(Jining City, Shandong Province)($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

重金属	山东省平邑县(2011)	山东省济宁市(2003)
Cu	0~0.127	0.000 9~0.007 2
Fe	0.01~0.532	0.004 7~0.029 2
Pb	0~0.006	0.000 8~0.004 9
Zn	0.025~8.459	0.004 0~0.024 1
Cr	0~0.035	0.004 0~0.024 1
Cd	0~0.001	0.000 8~0.005 7

造加工业为主,产生大量废水,这可能是导致仁德庄地下水中 Zn 浓度超标的主要原因。卞桥镇前东庄地下水中 Zn 超标的主要原因可能是化肥农药的大量使用,以及畜牧养殖业产生的粪便。实地调查发现,卞桥镇拥有多个果品、蔬菜、养殖基地,种植业的大力发展必然会带来化肥农药对土壤和地下水的污染,集约化养殖使用大量饲料添加剂,使禽畜粪便中含有大量的

Zn、Cu 等重金属元素^[33],造成地下水的污染。地方镇西朱尹村地下水中 Zn 的来源可能和 Fe 的来源相一致,此外西朱尹村地下水中的 Zn 也有一部分来源于种植业和畜牧养殖业的污染。

本研究测得平邑县地下水中 Cr 的最大浓度为 $0.035\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,没有超出国家饮用水质量标准($0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),但是明显高于济宁市的本底值。由图 7 可知,平邑县地下水中 Cr 的浓度最高点为东阳镇(现已合并到平邑镇)的潘家井村,并以此为中心呈环带状向四周逐渐降低。Cr 大量被用于制药行业^[34],该村地下水中的 Cr 可能主要来源于村西制药厂。

本研究测得平邑县所有样点地下水中 Cd 的浓度均为 $0.001\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (未检出的除外),即可测得的最小值,低于济宁市地下水中 Cd 的浓度,表明该地地下水暂未受到 Cd 的污染。

本研究中,关于各类重金属的来源,我们没有直接的实验证据,主要是根据实地调查和用前人已有的研究结果来佐证我们的推断,具体的直接证据需要进一步采样分析,进行深入的研究。

3 结论

通过对平邑县农村地下水中重金属浓度进行的测定与分析,得出以下结论:

(1)该区大部分水样的重金属含量符合我国饮用水质量标准和 EPA 饮用水质量标准,只有 2 个样点 Fe 的含量和 3 个样点 Zn 的含量超标,这些样点的水质应该引起有关部门的注意,积极采取措施进行治疗。重金属含量检测结果未超标,并不意味着水质未受到轻度污染,应及早进行动态监测和防治污染。

(2)经反距离权重法(Inverse distance weighting)插值分析可知,Cu、Fe、Pb、Zn、Cr 和 Cd 这 6 种重金属的浓度在平邑县地下水中呈斑块状分布,且空间差异较大。通过相关分析发现,除 Zn 和 Fe ($R^2=0.416, P<0.01$),Cr 和 Pb($R^2=0.413, P<0.01$)显示出了极显著的相关性以外,其他重金属元素之间没有显著的相关性。

(3)该区地下水中重金属 Cu、Fe、Pb、Zn 和 Cr 的浓度,均超出济宁市地下水中 Cu、Fe、Pb、Zn 和 Cr 含量的本底值,表明该研究区地下水中重金属含量超标的主要原因与人类活动有关,主要污染源为矿藏的开采与加工,造纸、机械铸造以及农业面源污染等。

该研究成果可为平邑县水质规划与管理提供一定的参考依据。

致谢:感谢张妍、柳强、赵广帅等在野外采样及室内实验分析中给予的帮助。

参考文献:

- [1] 王海东, 方凤满, 谢宏芳. 中国水体重金属污染研究现状与展望[J]. 广东微量元素科学, 2010, 17(1):14-18.
WANG Hai-dong, FANG Feng-man, XIE Hong-fang. Research situation and outlook on heavy metal pollution in water environment of China[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2010, 17(1):14-18.
- [2] Heredia O S, Cirelli A F. Trace elements distribution in soil, pore water and groundwater in Buenos Aires, Argentina[J]. *Geoderma*, 2009, 149(3-4):409-414.
- [3] 李莉, 张卫, 宋炜, 等. 重金属在水体中的存在形态及污染特征分析[J]. 现代农业科技, 2010(1):269-273.
LI Li, ZHANG Wei, SONG Wei, et al. The analysis of fractions and pollution characteristics of heavy metal in water[J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2010(1):269-273.
- [4] Selinus O. Essentials of medical geology: Impacts of the natural environment on public health[M]. Academic Press, 2005.
- [5] Garrett R G. Natural sources of metals to the environment[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2000, 6(6):945-963.
- [6] Zarazua G, Ávila-Pérez P, Tejeda S, et al. Analysis of total and dissolved heavy metals in surface water of a Mexican polluted river by total reflection X-ray fluorescence spectrometry[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2006, 61(10):1180-1184.
- [7] Salati S, Moore F. Assessment of heavy metal concentration in the Khoshk River water and sediment, Shiraz, Southwest Iran[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 164(1):677-689.
- [8] Alemayehu T. The impact of uncontrolled waste disposal on surface water quality in Addis Ababa, Ethiopia[J]. *Sinet: Ethiopian Journal of Science*, 2004, 24(1):93-104.
- [9] 胡春华, 周文斌, 黄宗兰, 等. 环鄱阳湖区农村饮用水重金属健康风险评估[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2010(1):102-106.
HU Chun-hua, ZHOU Wen-bin, HUANG Zong-lan, et al. The risk assessment of heavy metal of rural drinking water in Poyang Lake Area[J]. *Journal of Jiangxi Normal University(Natural Science)*, 2010(1):102-106.
- [10] Luu T T G, Sthiannopkao S, Kim K W. Arsenic and other trace elements contamination in groundwater and a risk assessment study for the residents in the Kandal Province of Cambodia[J]. *Environment International*, 2009, 35(3):455-460.
- [11] Agusa T, Kunito T, Fujihara J, et al. Contamination by arsenic and other trace elements in tube-well water and its risk assessment to humans in Hanoi, Vietnam[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 139(1):95-106.
- [12] Dhar R, Zheng Y, Stute M, et al. Temporal variability of groundwater chemistry in shallow and deep aquifers of Arai-hazar, Bangladesh[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2008, 99(1):97-111.
- [13] Leung C M, Jiao J J. Heavy metal and trace element distributions in groundwater in natural slopes and highly urbanized spaces in Mid-Levels area, Hong Kong[J]. *Water Research*, 2006, 40(4):753-767.
- [14] 黄冠星, 孙继朝, 张英, 等. 珠江三角洲污灌区地下水重金属含量及其相互关系[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 34(1):228-234.
HUANG Guan-xing, SUN Ji-zhao, ZHANG Ying, et al. Content and relationship of heavy metals in groundwater of sewage irrigation area in Pearl River Delta[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2011, 34(1):228-234.
- [15] 刘兴慧. 山东统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010.
LIU Xing-hui. Shandong statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2010.
- [16] 陈淑芬, 王兆菡, 刘静. 平邑县地下水开发利用研究[J]. 农机化研究, 2005(3):52-53.
CHEN Shu-fen, WANG Zhao-han, LIU Jing. The Research on exploitation and utilization of ground water of Pingyi County[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2005(3):52-53.
- [17] 崔运爱. 平邑县地下水资源分布及其开发利用对策[J]. 地下水, 2003, 25(1):28-30.
CUI Yun-ai. The Distribution and development & utilization of ground water resources of Pingyi County[J]. *Ground Water*, 2003, 25(1):28-30.
- [18] Ashley R, Lloyd J. An example of the use of factor analysis and cluster analysis groundwater chemistry interpretation[J]. *Journal of Hydrology*, 1978, 39(3-4):355-364.
- [19] 张岚, 陈昌杰, 陈亚妍. 我国生活饮用水卫生标准[J]. 中国公共卫生, 2007, 23(11):1281-1282.
ZHANG Lan, CHEN Chang-jie, CHEN Ya-yan. The standard of drinking water in China[J]. *Chinese Journal of Public Health*, 2007, 23(11):1281-1282.
- [20] U. S. EPA. The drinking water standards and health advisories[J]. *Environmental Protection Agency*, 2006.
- [21] 王卫中, 邹红海, 夏雁, 等. 地下水微量元素的本底值及相关性分析[J]. 济宁医学院学报, 2003, 26(3):20-21.
WANG Wei-zhong, ZOU Hong-hai, XIA Yan, et al. Background values of trace elements and correlative analysis of groundwater[J]. *Journal of Jining Medical College*, 2003, 26(3):20-21.
- [22] Taher A G, Soliman A A. Heavy metal concentrations in surficial sediments from Wadi El Natrun saline lakes, Egypt[J]. *International Journal of Salt Lake Research*, 1999, 8(1):75-92.
- [23] Ning L, Liyuan Y, Jirui D, et al. Heavy metal pollution in surface water of linglong gold mining area, China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, (10)914-917.
- [24] Prasanna M, Praveena S, Chidambaram S, et al. Evaluation of water quality pollution indices for heavy metal contamination monitoring: A case study from Curtin Lake, Miri City, East Malaysia[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012:1-15.
- [25] Bhuiyan M A H, Parvez L, Islam M, et al. Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173(1):384-392.
- [26] 曾昭华, 张志良, 唐春梅. 地下水中铜元素的迁移富集及其控制因素[J]. 北京地质, 2003, 15(4):13-17.
ZENG Zhao-hua, ZHANG Zhi-liang, TANG Chun-mei. The Migration enrichment of Cu element in groundwater and the controlling factor[J]. *Beijing Geology*, 2003, 15(4):13-17.

- [27] 胡玉福, 邓良基, 张世熔, 等. 四川盆地西缘浅层地下水铁、锰含量的空间变异特征[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 797-803.
HU Yu-fu, DENG Liang-ji, ZHANG Shi-rong, et al. Spatial variability of iron and manganese contents in shallow groundwater in the west of Sichuan Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 797-803.
- [28] 蓝俊康. 南宁市地下水 Fe 离子的成因及其超标率升高的机理探讨[J]. 广西地质, 1997, 10(1): 57-63.
LAN Jun-kang. Discussion on the mechanism of exceeding-standard rate of iron ionic concentration of groundwater in Nanning City [J]. *Guangxi Geology*, 1997, 10(1): 57-63.
- [29] 曾昭华. 地下水中铁元素的形成及其控制因素[J]. 江苏地质, 2003, 27(4): 220-224.
ZENG Zhao-hua. Formation of Fe element in groundwater and its control factors[J]. *Jiangsu Geology*, 2003, 27(4): 220-224.
- [30] 张伟, 武强, 段保旭. 天津市浅层地下水 Pb 污染研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(1): 89-91, 95.
ZHANG Wei, WU Qiang, DUAN Bao-xu. Research on lead pollution of shallow groundwater in Tianjin City [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2002, 31(1): 89-91, 95.
- [31] 赵秋, 孙毅, 吴迪, 等. 猪粪堆制过程中铅、镉、铜、锌的变化[J]. 黑龙江农业科学, 2007(5): 50-52.
ZHAO Qiu, SUN Yi, WU Di, et al. Change of Pb, Cd, Cu and Zn during the pig manure composting[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2007(5): 50-52.
- [32] Romic M, Romic D. Heavy metals distribution in agricultural topsoils in urban area[J]. *Environmental Geology*, 2003, 43(7): 795-805.
- [33] 索超, 李艳霞, 张增强, 等. 北京集约化养殖畜禽饲料 Zn 含量及粪便 Zn 残留特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(10): 2173-2179.
SUO Chao, LI Yan-xia, ZHANG Zeng-qiang, et al. Residual character of Zn in feeds and their feces from intensive livestock and poultry farms in Beijing[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10): 2173-2179.
- [34] 徐芬, 马腾, Ellis A. 地下水中稳定铬同位素的生物地球化学作用[J]. 地学前缘, 2012, 19(4): 183-193.
XU Fen, MA Teng, Ellis Andre, et al. Biogeochemical processes of chromium stable isotope in groundwater[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(4): 183-193.

欢迎订阅 2013 年《农业环境与发展》

《农业环境与发展》创刊于 1984 年,农业部主管、是由农业部环境保护科研监测所与中国农业生态环境保护协会联合主办的综合指导类科技期刊,为中国科技核心期刊。传播农业可持续发展新思想、新观点、新方略,倡导农业生产、农民生活、农村生态协调发展理念,多视角、多层次、多学科地反映食品安全与健康、资源开发与利用、环境污染与防治、农业清洁生产与农村循环经济等热点问题,直接面向农业、环保、食品、能源、卫生等领域的科研、教学、生产、管理、技术推广人员与大众读者。同时,《农业环境与发展》将在重要版面上宣传各地农业环境保护成就。欢迎大家踊跃投稿,欢迎刊登广告。

《农业环境与发展》为双月刊,大 16 开,96 页,逢双月 25 日出版,刊号 ISSN 1005-4944, CN 12-1233/S,国内外公开发行,各地邮电局(所)均可订阅,邮发代号 6-40,2013 年每册定价 12.00 元,全年 72.00 元。有漏订者可直接与编辑部联系订阅。本刊现有过刊合订本,需订购者请与本刊编辑部联系。

编辑部地址:天津市南开区复康路 31 号

邮政编码:300191

电话:022-23611149

传真:022-23674336

电子信箱:caed@vip.163.com

网址:www.aed.org.cn