

河套平原浅层地下水水化学成分及其相关性分析

刘文波¹ 高存荣² 刘 滨² 陈有鑑²

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 本文通过实地调查, 按照一定的间距在内蒙古河套平原西部采集和分析了 400 组地下水水质样品, 通过分析研究这些水质测试数据, 初步掌握了地下水的水化学特征和其主要元素及离子的分布规律。水化学分析结果表明: 研究区的地下水水质总体较差, 砷、氯化物、硫酸盐、溶解性总固体、总硬度、氟化物和铁等多项指标超标; 区内地下水化学类型以 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$ 、 Cl-Na 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Na}$ 型为主; 主要组分分布图表明, 砷、磷、铁、氯化物、氟化物、硫酸盐等含量较高的点主要分布在研究区西北部地势较低的山前冲、洪积扇扇裙前缘和地势相对低洼的冲积平原以及临河区北部的狼山镇一带。通过对 14 种水质测试指标值进行多元线性回归分析结果表明, 研究区地下水中砷与磷、铁含量具有密切的相关关系。

关键词: 河套平原; 含砷地下水; 水化学特征; 相关性

中图分类号: P641.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2010)03-0816-09

1 引言

河套平原的环境地质问题已经引起国内外众多专家、学者和有关领导的高度重视^[1-9], 特别是地下水的砷污染问题, 已对地区居民身体健康和生活水平的提高产生了严重的影响^[7-11]。为了查明河套平原高砷地下水的分布及水化学特征, 为地下水的开发利用和防砷改水提供依据, 2006—2008 年笔者参与并组织实施了中国地质调查局项目“内蒙河套高砷地区地下水勘查与供水安全示范”, 开展了以防砷改水为主要目的的地下水水质调查工作。本文将以此次调查的资料为基础, 对河套平原西部的临河区、杭锦后旗和磴口县的水化学成分进行分析研究, 阐述地下水中主要化学成分在区域上的分布状况, 查明这些主要化学成分间的相互关系, 从而探讨其形成机理。这将对整个河套平原高砷地下水形成机理的研究以及防砷改水工作的开展具有重要的意义。

2 研究区概况

2.1 自然地理

河套平原位于内蒙古自治区的西部, 东、北、西

分别接乌拉山、阴山山脉和狼山, 南临黄河与库布齐沙漠相接。河套平原属于温带大陆性干旱气候带, 降雨量小、蒸发强烈, 多年平均降雨量为 130~200 mm, 蒸发量为 1900~2500 mm, 年平均气温 5.6~7.8℃。地势总体西高东低, 南高北低。

研究区属于河套平原的西部(图 1), 地理坐标: 北纬 40°10'~41°20', 东经 106°10'~107°45', 行政区划主要包括巴彦淖尔市的磴口县、临河市和杭锦后旗, 总面积约 7600 km², 人口约 97 万, 东临五原县, 西靠阿拉善盟。区内盛产小麦、玉米、葵花、西瓜等。

研究区的地势平坦开阔, 局部有一定的起伏, 形成岗丘和洼地, 从总体上看主要有以下 3 种地貌类型:

1) 狼山山前冲积洪积扇形倾斜平原。宽 5~10 km, 微向南倾, 南部为扇前平原, 包括扇裙前缘洼地和扇间地带, 由于岩性变细, 地势较低, 常构成地下水的溢出带, 形成由地下水补给的湖泊和湿地景观。

2) 黄河冲积湖积平原。地势平坦开阔, 地形自西向东, 由南向北逐渐降低, 总的地势向东北倾斜, 北部总排干一线是全区较为低洼的部分, 区内由于黄河多次改道泛滥和残留湖泊的退缩, 形成许多微地貌地形, 如古河道、牛轭湖、槽形和碟形洼地、带状沙

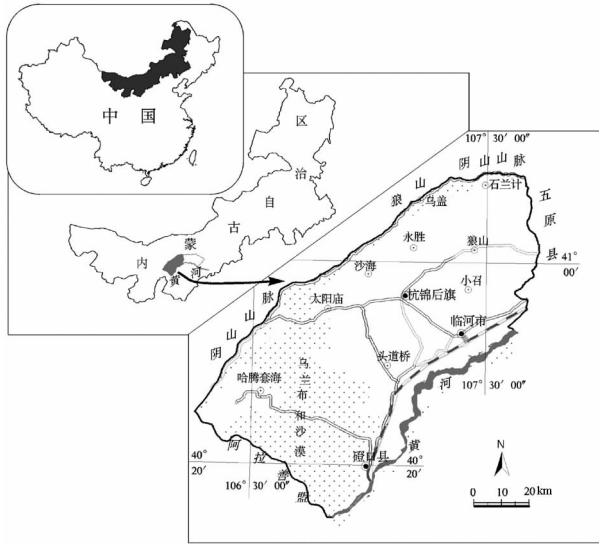


图 1 研究区地理位置图

Fig.1 Location of the study area

丘、丛草沙堆、串珠状湖泊、残留湖泊和湖沼地等。

3) 乌兰布和近代风积沙地。分布于磴口—太阳庙一线以西,面积约 2500 km²。地形总的趋势自东南向西北降低,地面标高 1070~1030 m。沙地位于冲湖积平原之上,为就地起沙形成,目前大部分为固定与半固定沙丘。

2.2 水文地质条件

河套平原的沉积构造条件,形成了以细粒相为主的冲—湖积含水层系统,其中以上更新统冲积湖积粉细砂承压水和半承压水为主,因为含水层颗粒度较细,水平渗透性差而使得径流条件差,加之地形平缓,水力坡度小,地下水径流极其缓慢。

从河套平原全区来看,地下水总的流向自西向东,但是大部分的浅层地下水靠区内数条自南而北的排水干渠,汇入北部的总排干渠,然后又从总排干渠流入东部的乌梁素海,由于乌梁素海的作用,东部地区往往又受到乌梁素海回水的补给,使地下水水位不断抬升,产生了大量的土壤盐渍化。

河套平原几乎无排泄出路,是一个以垂直水交替为主的封闭的地下水盆地。由于河套平原地区的降雨量少,所以除了北部山前的洪积扇的地下水是来自于山区的基岩裂隙水的补给外,大部分的地下水是由引黄灌溉水的补给形成的,在非灌溉期的 8 月份,地下水的水位埋深 1.5~4.26 m,在 10 月份的冬灌期水位可上升到 0.5~3.28 m。

3 样品采集与分析

2006—2008 年 7~8 月,笔者分别在河套平原磴口县—杭锦后旗—临河地区,开展了地下水调查及水质采样工作等。水样点几乎遍布整个研究区,除乌兰布和沙地外,其他地区采样点的间距为 1~4 km,共采集水样 400 组,其中全分析水样 282 组。采样井大部分为当地居民的自用压水井,个别为农用机井,其深度多为 8~35 m。在采集样品过程中,严格按照有关规程规范,同时现场测定了 pH 值、电导率 (EC) 和氧化还原电位 (ORP),当天采集的样品当天送当地的水利科学研究所化验室进行分析,存放时间不超过 24 h。分析的项目主要有: Na⁺+K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻、F⁻、NO₂⁻、NO₃⁻、P、As、Fe、矿化度、总硬度、总碱度等 19 项。

4 地下水水化学特征

野外水样采集和调查的水井深度如上所述,一般在地下水 8~35 m,野外实测水样的水温为 10~13℃,由于采样井较浅,所以深度与水温的关系不是很明显。

pH 值: 河套平原地表水的 pH 值高是一个主要的特征。湖水 pH 值最高达 9.9,排水渠为 8.0~8.45,灌溉水为 8.10~8.22,野外实测的地下水的 pH 值大部分在 7.20~7.50,最高值达 8.88,属于中性—弱碱性。

电导率 (EC): 地下水电导率的范围变化比较大,一般在 0.53~20 ms/cm。盐度 (NaCl) 一般为 0.02%~1.3%,个别的最高达到 11%。

氧化还原电位 (ORP): 从实地测定的结果看有正负值两区间,显示正值的范围是 4~120 mV,显示负值的范围是 -10~-162 mV。

实验室测试的结果看,矿化度为 463.0~19299.0 mg/L, Cl⁻ 含量 17.7~9571.5 mg/L, HCO₃⁻ 含量为 137.3~1296.7 mg/L, SO₄²⁻ 含量为 0.34~2136.00 mg/L, F⁻ 含量 0.08~2.55 mg/L, NO₃⁻ 含量为 0.001~4.318 mg/L, 溶解性总固体 (TDS) 值为 380.0~19040.0 mg/L。

研究区的地下水水质普遍较差。在 282 组地下水水质全分析样品中,超标严重的组分有: As (按 0.01 mg/L 的标准,超标率达 55.32%)、Cl⁻ (超标率 52.12%)、SO₄²⁻ (超标率 54.26%)、TDS (超标率 55.32%)、总硬度 (超标率 67.02%)、F⁻ (超标率 21.63%)、Fe (超标率 59.22%)。

从研究区全区、高砷点分布区和非高砷点分布区主要组分的超标率(图2)可以看出:总铁超标率在高砷区高达76.65%,但在全区和非高砷区明显下降;F⁻的超标率在高砷区远高于全区和非高砷区。

研究区地下水的水化学类型主要为Cl·HCO₃⁻-Na、Cl-Na、HCO₃⁻·Cl-Na和SO₄⁻-Na型。在As≥0.01 mg/L的156组水样中,Na⁺毫克当量百分数(meq%)大于25%的总数为154组,其中Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、HCO₃⁻和SO₄²⁻的meq%大于25%的水样数分别是56组、55组、125组、118组和70组。这反映出砷超标区地下水的水化学类型为Cl·HCO₃⁻-Na、Cl-Na、HCO₃⁻·Cl-Na型。

研究区地下水主要组分含量的分布情况见图3,这些组分含量分级频度(%)见图4。从图3(a、b、c、d)可以看出,As、Cl⁻、F⁻超标点和P含量较高的点主要分布在研究区北部山前冲、洪积扇前缘和冲积平原的低洼地带以及临河区的狼山镇一带,整体呈一北东向的条带状,这一条带与整个狼山北东向的山体走向是一致的,充分说明超标区域的分布明显受区域地质构造等地质环境条件的影响。

尽管Fe与SO₄²⁻含量超标点,在全区均有分布,但是Fe≥1.0 mg/L以及SO₄²⁻≥1000 mg/L的点,也主要分布在研究区北部扇群前缘,与高砷、高氟点的分布区域基本一致。

5 相关性与线性回归分析

研究区水样的相关性采用SPSS软件对282组有效水样进行砷As与其他13项指标间多元回归分析,主要目的是通过该项分析,进一步了解和掌握研究区地下水水质成份之间的相关关系。主要分析步骤如下:

- 1)选取全区内282组有效的化验分析记录;
- 2)对选定的14项指标记录逐一进行正态变换及检验,确保数据满足正态分布特征;
- 3)生成14项指标之间相关性散点图矩阵,进行相关性的初步判读;
- 4)运用逐步法(STEPWISE)^[12],通过建立回归模型从13项指标中引入与As具有相关性的变量;
- 5)确定与研究区As含量具有典型相关性的元素。

研究区水样的14项指标分别是:As、Fe、P、Cl⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺+K⁺、HCO₃⁻、F⁻、NO₃⁻、矿化度、总硬度、总碱度。

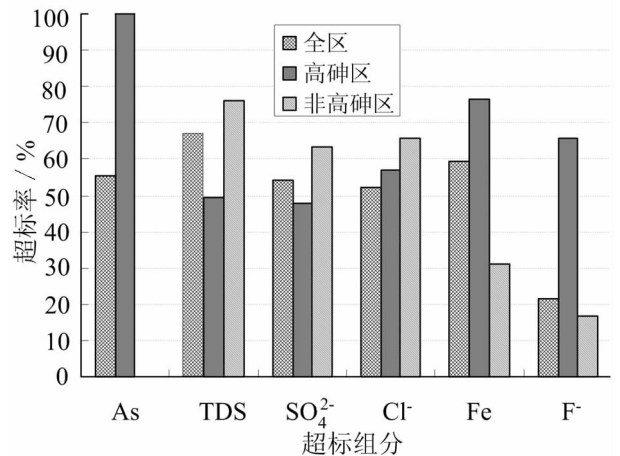


图2 地下水中主要组分的超标率

Fig.2 Over-norm percentage of predominant constituents in groundwater samples

统计分析之前,对上述14项指标的所有数据进行了对数变换后进行正态性检验,结果各指标测试数据呈现出良好的正态分布特征。以总砷(As)含量为例,图5中总砷含量P-P概率图中数据点和理论直线(对角线)基本重合,表现出正态分布的特征,而总As含量去势P-P概率图中数据点均匀分布在Y=0这条直线上,正态离差的评分绝对值都在0.06以内,因此,数据进行对数变换后具有良好的正态性。其他各指标具有相同的正态分布特征,这里不再一一图解。

在对数转换的基础上,为研究As含量与其他13项测试指标之间的线性相关关系,绘制了判断各指标之间相关性的散点图矩阵(图6)。从该矩阵图中可以初步判断As和Fe含量以及P含量之间存在比较明显的线性相关关系,其他各指标之间的线性相关性亦可以从散点的形态进行初步判断。

以上相关性仅是人为判读结果。为了进一步确认上述判断的可靠性,笔者进行了As含量与其他水质指标之间的多元回归分析,建立As及与之密切相关的水质指标之间的关系。

回归分析过程如下:

- 1)对13项指标进行筛选,以判断这些指标是否满足条件而被引入。统计分析结果确定了两个具有显著性意义的回归模型:模型1和模型2。回归模型1和回归模型2均采用逐步法(STEPWISE)进行变量的进入或移出。回归模型1只引入变量总磷(P)含量指标,模型2则在模型1的基础上引入了总铁

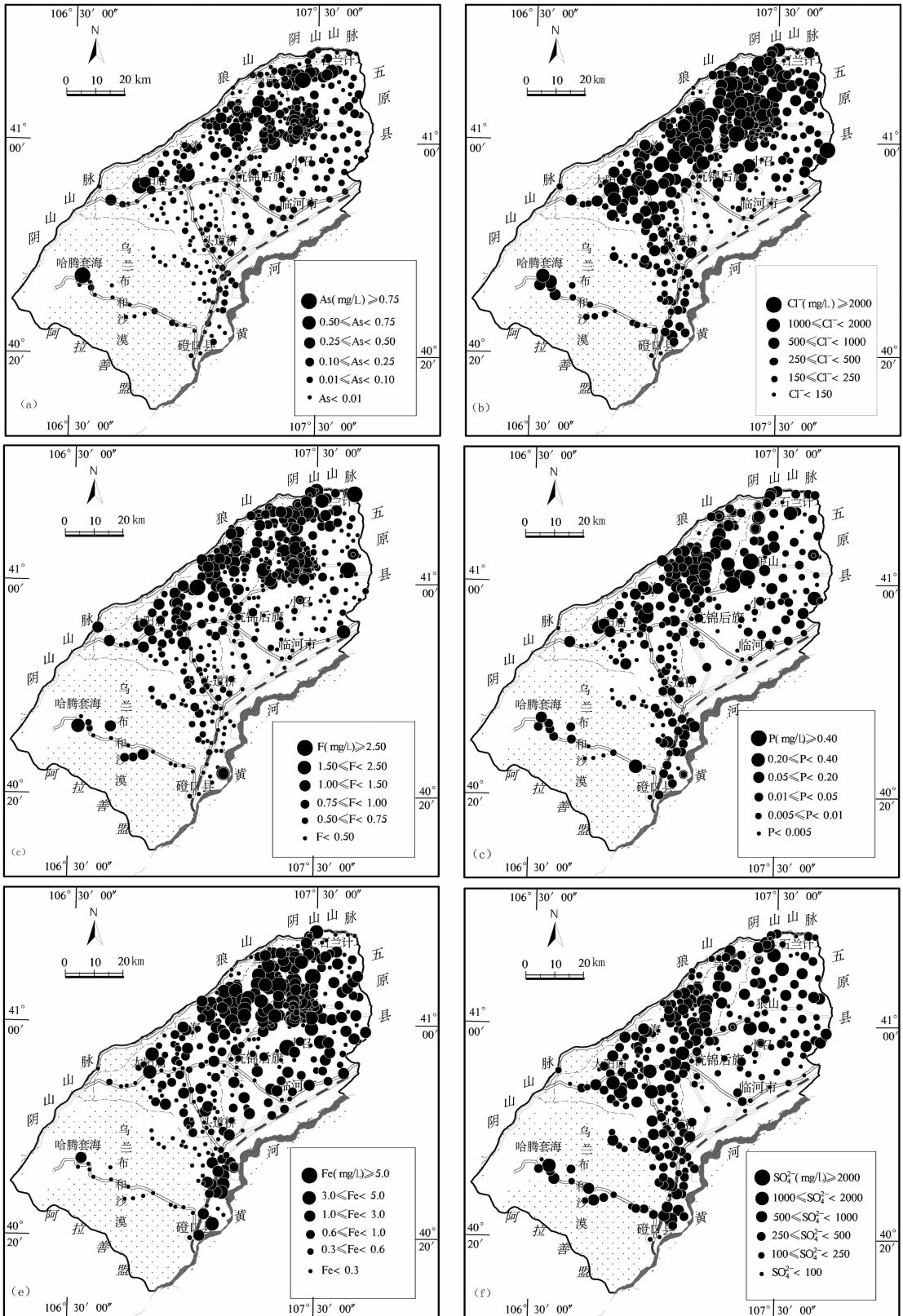


图 3 研究区地下水中主要组分含量分布图

Fig.3 Density distribution of predominant constituents in the study area

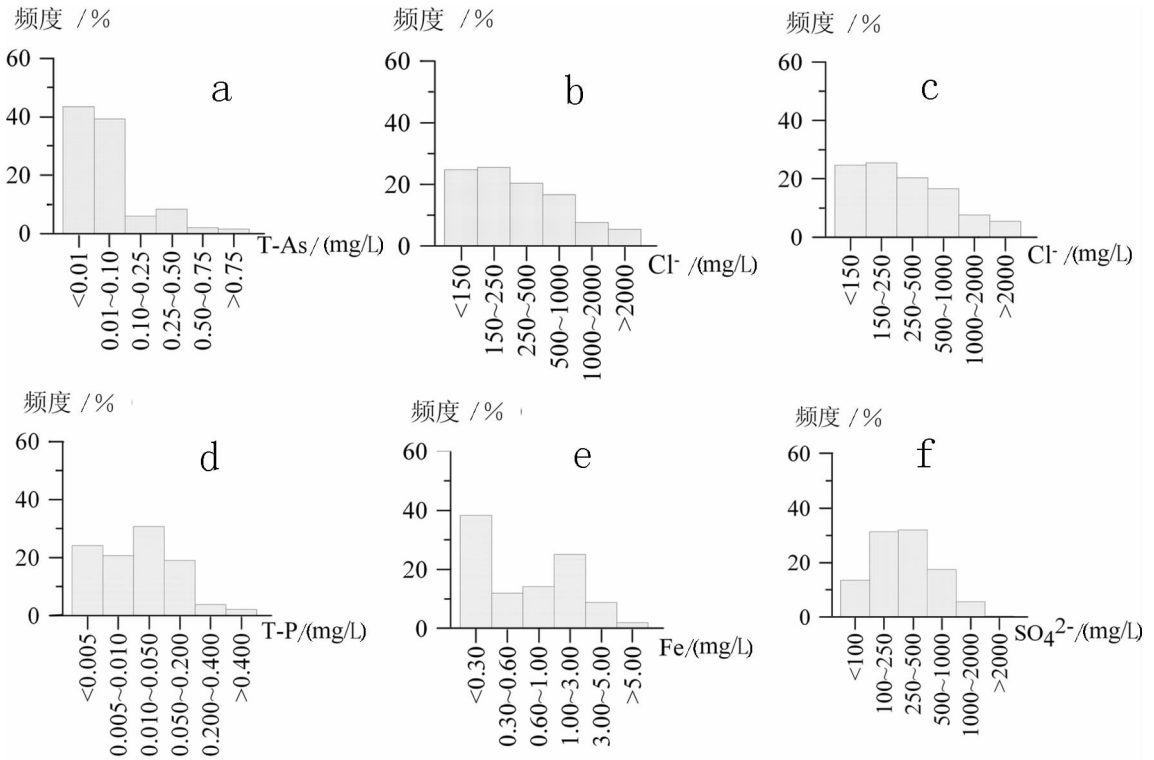


图4 研究区地下水主要组分含量频度分布

Fig.4 Frequency distribution of the density of predominant constituents

(Fe)含量指标。初步确立的线性回归模型1的方程为: $As=0.804P-0.381$; 回归模型2的方程为: $As=0.671P+0.331Fe-0.514$ 。

2) 判断回归模型的拟合优度

表2列出了两个回归模型引入变量过程中决定系数(用来解释变异)的改变情况。从校正的决定系数 R^2 可见,回归模型2随着Fe变量的引入,模型可解释的变异占总变异的比增加。决定系数 R^2 表示因变量(As)的全部变异中,能够通过回归关系被自变量(Fe、P)解释的比例。如回归模型1中 $R^2=0.515$,则说明回归关系可以解释因变量(As)50%以上的变异。

3) 回归模型的检验

为检验方程的回归效果,采用方差分析,对两个回归模型进行检验。检验的结果如表2。从表中回归模型1和模型2所列的F值分别为 $134.480 \gg 1$ 和 $91.313 \gg 1$,P值(显著性概率值) $\ll 0.05$,检验结果表明这两个模型均具有统计学意义,回归效果良好。

表3列出了运用t检验对回归方程的回归系数(包括常数项)的检验结果,表中P值 <0.05 说明回

归方程的回归系数经检验具有统计学意义。

上述As与P、Fe回归方程的构建,使我们实现了一种可通过运用地下水中的P、Fe含量,初步预测河套平原西部地区地下水中As含量空间分布的新方法、新视角。

6 结论

(1)内蒙古河套平原西部地区的地下水水质总体较差,砷、氯化物、硫酸盐、溶解性总固体、总硬度、氟化物和铁等多项指标超标;

(2)水化学分析结果表明:河套平原西部地区的地下水化学类型主要以 $Cl \cdot HCO_3 - Na$ 、 $Cl - Na$ 、 $HCO_3 \cdot Cl - Na$ 型为主;

(3)研究区地下水中主要组分的分布呈现出比较明显的规律性:砷、磷、铁、氯化物、氟化物、硫酸盐等含量较高的点主要分布在研究区西北部地势较低的山前冲、洪积扇前缘和地势相对低洼的冲积平原以及临河区北部的狼山镇一带。

(4)通过对14种水质测试指标值进行多元统计分析结果表明,研究区地下水中砷与磷、铁含量具有

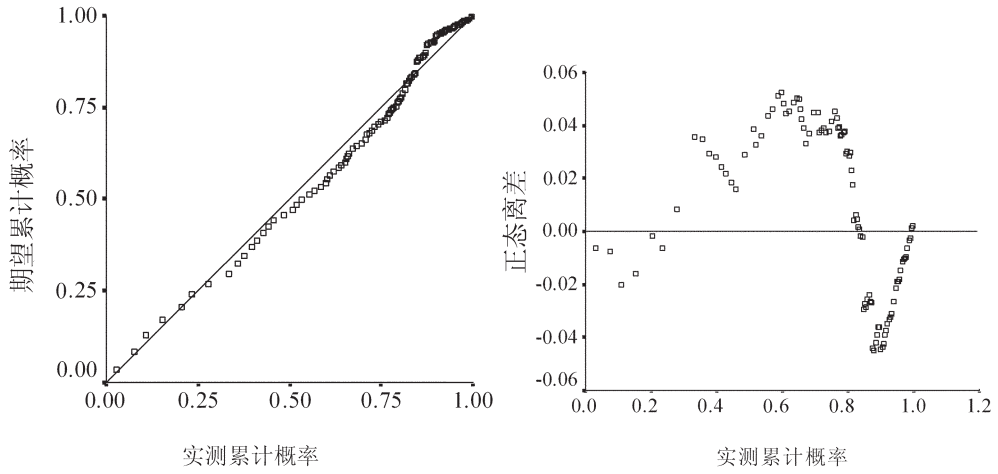


图 5 As 含量 P-P 概率图和趋势 P-P 概率图
Fig.5 Probability plot and de-trended probability plot for total arsenic

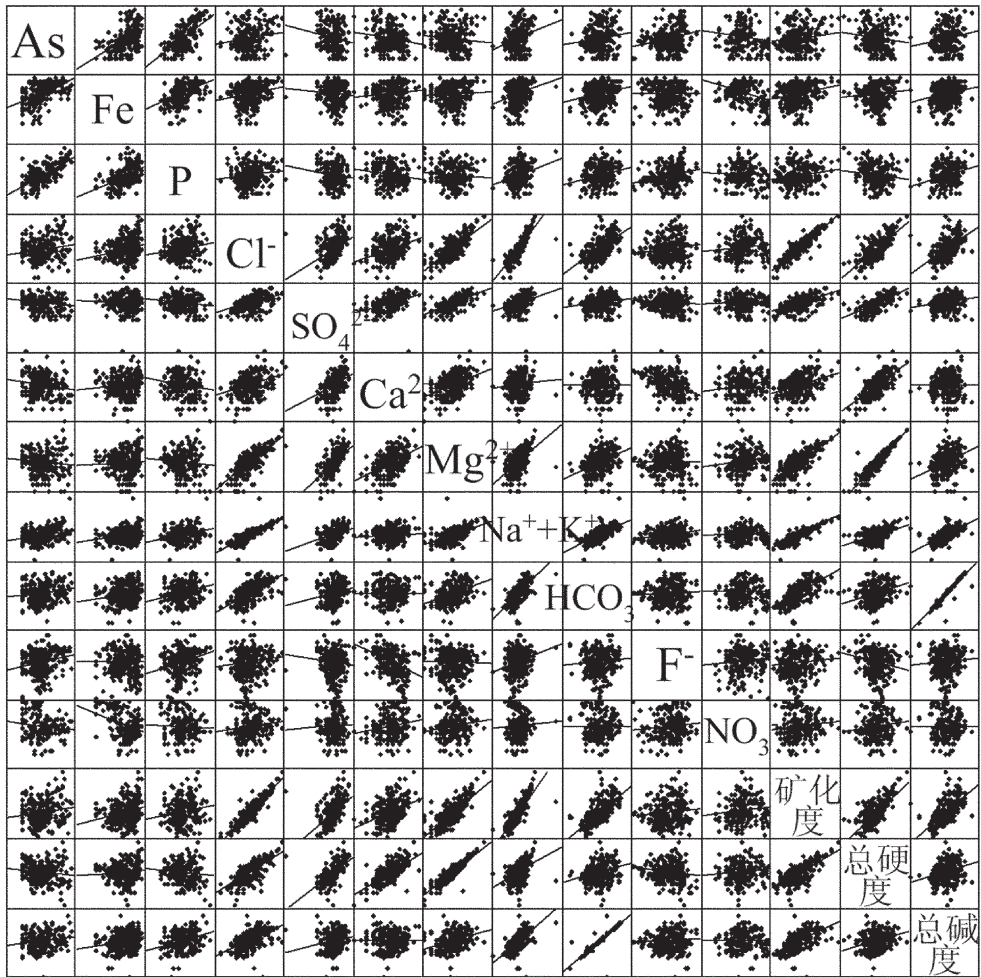


图 6 水质组分之间相关性散点图矩阵
Fig.6 Scatter matrix of 14 constituents in groundwater samples

表 1 回归模型的拟合优度汇总表^c

Table 1 Goodness-of-fit for regression models

回归模型	相关系数R	决定系数R ²	校正的决定系数R ²	估计标准误差
1	0.666 ^a	0.443	0.440	0.56514375
2	0.722 ^b	0.521	0.515	0.52577794

注:a 预测因子(自变量)引入;总磷(P);b 预测因子(自变量)引入;总磷(P);总铁(Fe);c 因变量:总砷(As)

表 2 回归模型的检验结果^c

Table 2 Variance test for the regression models

回归模型	残差平方和	Df (自由度)	均方差	F值	P值 (显著性概率值)
回归	42.951	1	42.951		
1 残差	53.976	169	0.319	134.480	3.00e-23 ^a
合计	96.928	170			
回归	50.485	2	25.243		
2 残差	46.442	168	0.276	91.313	1.44e-27 ^b
合计	96.928	170			

注:a 预测因子(自变量)引入;总磷(P);b 预测因子(自变量)引入;总磷(P);总铁(Fe);c 因变量:总砷(As)

表 3 回归模型得出的回归系数检验(T 检验)

Table 3 Regression coefficient test for the regression models (T-test)

回归模型	未标准化系数		标准化系数 系数β	t值	P值
	系数b	系数标准误差			
1	常数	-0.381	0.114	-3.341	0.001
	总磷(P)	0.804	0.069	11.597	3.00e-23
2	常数	-0.514	0.109	-4.713	5.09e-6
	总磷(P)	0.671	0.069	9.673	7.18e-18
	总铁(Fe)	0.331	0.063	5.221	5.22e-7

密切的线性相关关系。

(5)研究区地下水中 As 与其他组分之间的多元线性回归方程的建立,为预测河套平原西部地区 As 含量空间分布提供了一种新的视角。

参考文献(References):

- [1] 高存荣. 河套平原地下水砷污染机理的探讨 [J]. 中国地质灾害防治学报, 1999, 10(2): 25-32.

Gao Cunrong. Research on the mechanism of arsenic pollution in groundwater in the Hetao Plain, Inner Mongolia, China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1999, 10 (2): 25-32(in Chinese with English abstract).

- [2] 林年丰, 汤洁. 我国砷中毒病区的环境特征研究 [J]. 地理科学, 1999, 19(2):135-139.

Lin Nianfeng, Tang Jie. The study on environmental characteristics in arseniasis areas in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 1999, 19 (2): 135-139(in Chinese with English abstract).

- [3] Xie Zhengmiao, Zhang Yumin, Naidu Ravi. Extent and severity of arsenic poisoning in China [M]//Managing Arsenic in the Environment:from Soil to Human Health, CSIRO Publishing, Australia, 2006:541-552.

- [4] 沈雁峰, 孙殿军, 赵新华, 等. 中国饮水型地方性砷中毒病区和高砷区水砷筛查报告[J]. 中国地方病学杂志, 2005, 24(2):172-175.

Shen Yanfeng, Sun Dianjun, Zhao Xinhua, et al. Screening report in areas of endemic arsenism and high content of arsenic in China [J]. Chinese Journal of Endemiology, 2005, 24 (2):172-175 (in Chinese with English abstract).

- [5] 内蒙古地下水砷污染研究グループ. 中国内蒙古河套平野における地下水砷污染調査の今後の課題[R]. 第7回アジア地下水砷素汚染フォーラム講演要旨集, 2002:153-155.

- [6] Zhang Hui, Ma Dongsheng, Hu Xiongxi. Arsenic pollution in groundwater from Hetao area, China [J]. Environmental Geology, 2002:638-643.

- [7] Smedley P L, Kinniburgh D G. A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters[M]. Appl. Geo. Chem., 2002, 17:517-568.

- [8] Welch A H, Stollenwerk K G. Arsenic in Ground Water [M]. Kluwer Academic Pub, Boston, 2003:475.

- [9] 高存荣, 李朝星, 周晓虹, 等. 河套平原临河区高砷地下水分布及水化学特征[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(6):22-28.

Gao Cunrong, Li Chaixin, Zhou Xiaohong, et al. Occurrence and hydrochemical characteristics of As-rich groundwater in the Linhe district of the Hetao Plain [J]. Hydrogeology and Engineering

- Geology, 2008, 35(6):22-28(in Chinese with English abstract).
- [10] 郭华明, 杨素珍, 沈照理. 富砷地下水研究进展 [J]. 地球科学进展, 2007, 22(11):1109-1117.
- Guo Huaming, Yang Suzhen, Shen Zhaoli. High arsenic groundwater in the world: overview and research perspectives [J]. Advances in Earth Science, 2007, 22 (11):1109-1117 (in Chinese with English abstract).
- [11] 高存荣, 刘文波, 刘滨, 等. 河套平原第四纪沉积物中砷的赋存形态分析[J]. 中国地质, 2010:37(3):760-770.
- Gao Cunrong, Liu Wenbo, Liu Bin, et al. Analysis on the existence speciation of arsenic in the Quaternary sediments in Hetao Plain[J]. Geology in China, 2010:37(3):760-770(in Chinese with English abstract).
- [12] 张文彤. 世界优秀统计工具 SPSS 11.0 统计分析教程 (高级篇) [M]. 北京:北京希望电子出版社, 2002:64-87.
- Zhang Wentong. Tutorial for SPSS 11.0 (Advanced Part)——the World's Excellent Statistical Analysis Tool [M]. Beijing:Beijing Hope Electric Press, 2002:64-87(in Chinese).

Hydro-chemical constituents and correlation analysis of shallow groundwater in the Hetao Plain

LIU Wen-bo¹, GAO Cun-rong², LIU Bin², Chen You-jian²

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. China Institute for Geo-environmental Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: In this study, the authors investigated the hydro-chemical features and distribution of predominant constituents and ions in the groundwater of western Hetao Plain, Inner Mongolia, based on field survey and analyses of 400 water samples. The results indicate that the groundwater quality is generally not satisfactory because the densities of As, Cl⁻, SO₄²⁻, TDS, total hardness, F⁻ and Fe are in excess of the standard levels. Hydrochemical types in the study area are mostly Cl-HCO₃-Na, Cl-Na, and HCO₃-Cl-Na. Predominant components such as As, P, Fe, Cl⁻, F⁻ and SO₄²⁻ are distributed along the boundary of the alluvial and proluvial fans in the northwest of the study area and the alluvial plain with lower topography as well as Langshan Town in northern Linhe area. Furthermore, this study presents the correlations of all the 14 tested constituents based on methods of correlation analysis and multi-variable linear regression. It is shown that the relations between P, Fe and As are significant.

Key words: Hetao Plain; arsenic-bearing groundwater; hydrochemical feature; correlation

About the first author: LIU Wen-bo, male, born in 1977, doctor candidate, majors in hydro-science and engineering; E-mail: liuwb@mail.cigem.gov.cn.