

# 内蒙古河套平原高砷地下水赋存环境特征

何 薪<sup>1</sup> 马 腾<sup>1</sup> 王焰新<sup>1</sup> 邓娅敏<sup>1</sup>  
黄 彬<sup>2</sup> 何 军<sup>1</sup> 赵 洁<sup>1</sup> 田春艳<sup>1</sup> 李振龙<sup>3</sup>

(1. 生物地质与环境地质教育部重点实验室(中国地质大学), 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 内蒙古巴彦淖尔市杭锦后旗疾病预防控制中心, 内蒙古 巴彦淖尔 015400)

**摘要:**内蒙古河套平原是世界地方性砷中毒较为严重的地区之一。笔者以平原西部的重病区杭锦后旗为研究区, 对高砷地下水赋存环境进行了调查研究。研究表明: 高砷区沉积物中 As 的含量为 7.7~34.6 mg/kg, 其中粘性土和亚粘性土中 As 含量相对较高。高砷地下水的 pH 值为 7.0~8.3, 平均 Eh 值为 -155.1 mV, 平均矿化度为 1.58 g/L, 主要的水化学类型包括: Cl-HCO<sub>3</sub>-Na 型、Cl-Na 型、HCO<sub>3</sub>-Cl-Na 型, As 的含量为 15.5~1093  $\mu$ g/L, 且主要以 As(III) 形态存在, 水中 DOC(0.73~35.76 mg/L)、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>(283.75~1290.48 mg/L)、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>(0.27~10.48 mg/L) 的浓度较高, 硝酸盐和硫酸盐含量较低。研究区的氟中毒现象也较严重, 高氟地下水中氟含量为 1.11~6.01 mg/L。绝大多数高氟水中砷含量也超标, 出现了一种高砷水与高氟水并存的现象。综合判断, 河套平原的高砷地下水赋存环境处于还原性环境。还原条件下, 高砷区沉积物中的铁/锰氧化物的还原溶解易使吸附的砷释放到地下水中。这是研究区高砷地下水形成的主要原因。

**关键词:** 高砷地下水; 赋存环境特征; 河套平原; 内蒙古

**中图分类号:** P641.69 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2010)03-0781-08

## 1 前 言

高砷地下水是威胁居民身体健康和经济发展的重大环境问题之一。由于饮用高砷地下水而引发的地方性砷中毒在众多国家均有发生(亚洲诸国、南美及北美的一些国家), 其中亚洲的孟加拉国、印度和中国最为严重。现行的世界卫生组织(WHO)以及中国最新颁布的《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006) 均规定饮用水标准中砷的浓度不得高于 10  $\mu$ g/L。

中国的地下水砷污染影响范围广、砷暴露人群多。受其影响的主要省区包括内蒙古、山西、新疆、宁夏、吉林、安徽, 受威胁的人口多达 230 万, 而饮用水

中砷含量超过 50  $\mu$ g/L (该浓度为 GB5749-2006 制定之前的中国饮用水标准中规定的砷浓度限定值) 的高砷暴露人群超过 50 万<sup>[1]</sup>。其中内蒙古河套平原的地方性砷中毒现象尤为严重。据资料显示, 该地区受威胁的人口多达 30 万, 患病人群超过 2000 人。平原西部的杭锦后旗是内蒙古自治区最严重的地方性砷中毒旗县, 共涉及 9 个乡镇, 受影响人口近 20 万, 高砷暴露人群达 76000 人之多。砷中毒高发区的地下水中砷含量为 350~1740  $\mu$ g/L<sup>[2]</sup>。该地区地下水中出现如此高的砷含量与其所处的特殊的地质环境有关。笔者将该旗作为研究区, 对高砷地下水赋存环境进行调查研究, 用以揭示地下水中砷的富集和迁移规律, 并且可为开展高砷区如何寻找优质地下水水

收稿日期: 2010-03-05; 改回日期: 2010-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(40872157, 40830748)、中俄合作基金(NSFC-RFBR-40711120189)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0773)和科技部对发展中国家科技援助项目联合资助。

作者简介: 何薪, 女, 1981 年生, 博士生, 环境科学与工程专业; E-mail: wklxin@126.com。

源的工作提供指导意义。

## 2 研究区介绍

### 2.1 地理位置

河套平原位于内蒙古自治区的西部,平原北部是阴山山脉的主体——狼山,西为乌兰布和沙漠,南临黄河,东依乌梁素海,中部为广阔的冲湖积平原。介于北纬  $40^{\circ}10' \sim 41^{\circ}20'$ ,东经  $106^{\circ}10' \sim 109^{\circ}30'$  之间。本区包括临河区、杭锦后旗、五原县、磴口县、乌拉特前旗 5 个旗县以及乌拉特中旗、乌拉特后旗 2 个旗县的山前部分。总面积约为  $1.3 \text{ 万 km}^2$ 。在狼山一带分布有东升庙和炭窑口硫铁多金属矿床(图 1)。

### 2.2 自然环境

河套平原海拔  $900 \sim 1200 \text{ m}$ , 总的地势是由西南向东北微倾。按其地貌特征可分为四类:北部狼山和乌拉山山前冲洪积倾斜平原,向南的黄河冲湖积平原亦称后套平原,西部为乌兰布和近代风积沙地,东部乌拉山和包头市之间的三湖河地区。其中三湖河地区是一个地理上相对独立的部分<sup>[1]</sup>。

本区属于温带大陆性干旱半干旱气候带。降水少,蒸发强烈,干燥多风。

河套平原为一历史悠久的灌溉农业区,是中国最大的引黄河水自流灌溉区之一。灌区以三盛公拦河枢纽控制引水,由总干渠供水,220 km 的总排干沟排水,以乌梁素海作为排水承泄区。但由于灌溉不合理,盐渍土广泛分布于灌区。

### 2.3 地质、水文地质条件

河套平原在地质构造上属于华北地台鄂尔多斯

台向斜的北缘部分,为形成于侏罗纪晚期的中生代断陷盆地,新生代地层广布全区。在构造形态上,呈现北深南浅、西深东浅的不对称箕状拗陷<sup>[2]</sup>。

河套盆地地表几乎全部为全新世沉积物覆盖,形成广阔的黄河冲积平原。盆地地层及岩性划分详见表 1。第四纪以来,以更新世中早期湖水波及范围较大,以淡水湖积层为主,以厚层淤泥质土与粉细砂互层;中更新世形成了一套富含有机质及石灰质的具细微薄层理的以粘土为主的沉积层。沉积物为黄灰、青灰以及黑色,局部有泥炭夹层,而且含盐量高。自湖滨向湖心,沉积物粒度由粗到细。中更新世以后,湖水范围渐小,还原环境弱。上更新世晚期至全新世,由于黄河的形成,湖水逐渐萎缩,形成一些残留湖泡和牛轭湖,以黄河冲积层和冲湖积层为主<sup>①</sup>。

河套平原主要的水文地质特征为:

(1)含水层在成因上以湖积层为主,含水层颗粒细,厚度大,地层含盐量高,形成广布的咸水。

(2)盆地构造封闭,潜水径流不畅,地下水无水平排泄出路,以垂直交替为主。黄河灌溉水的大量渗透抬高地下水水位,经蒸发使土壤积盐,成为导致土壤盐渍化的重要因素。

(3)由于长期以湖相为主的古地理环境和封闭的构造条件,形成了以还原为主的地球化学环境,造成大范围的脱硫酸作用,形成低矿化度的  $\text{Na}-\text{HCO}_3$  型水和高矿化度的  $\text{Na}-\text{Cl}$  型水,并且含有硫化氢、甲烷气体以及大量有机质<sup>①</sup>。

## 3 样品采集和分析方法

### 3.1 水样采集与分析

为了研究河套平原浅层高矿地下水系统中的水文地球化学过程,结合降水量的影响,笔者分别于 2006 年 11 月(枯水期)和 2007 年 8 月(丰水期)在河套平原的杭锦后旗进行水样采集工作。采样点的布置主要依据河套平原水文地质分区以及 2005 年杭锦后旗地方性砷、氟中毒地区分布资料,共采集地下水水样 97 件。地下水水样均采自压把井或机井,采集机井中的水时是在开泵半小时后取样,采集压把井中的水时则是将井中残留的水排净后再取样。

采样瓶选用 50 mL 和 500 mL 的聚乙烯瓶,事先将其用去离子水清洗,取样时再用所采水样润洗

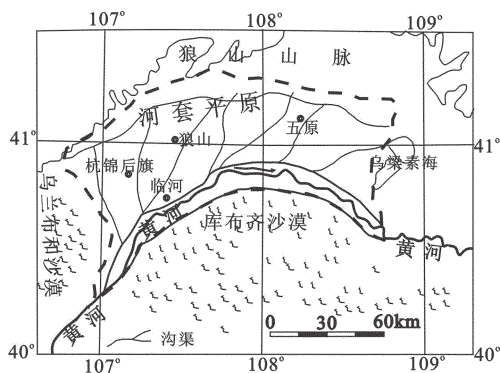


图 1 河套平原地理位置<sup>[1]</sup>

Fig.1 Location of Hetao plain<sup>[1]</sup>

①内蒙古自治区水文地质队. 内蒙古巴盟河套平原土壤盐渍化水文地质条件及其改良途径的研究, 1982.

表 1 河套盆地地层及岩性划分<sup>①</sup>

Table 1 Stratigraphic division and lithostratigraphic classification of Hetao plain

界	系	统	符号	岩性描述	厚度/m
新生界	第四系	全新统	Q <sub>4</sub>	棕黄、棕灰、浅灰色粉砂	50~300
		上更新统	Q <sub>3</sub>	灰色泥岩、粉砂质泥岩与灰色粉砂岩、泥质粉砂岩互层淤泥,夹芒硝、腐殖土	500~2300
		中更新统	Q <sub>2</sub>		
		下更新统	Q <sub>1</sub>		
	新近系	上新统	N <sub>2</sub>	灰-棕灰-灰褐色泥岩、粉砂质泥岩与灰色粉砂岩、泥质粉砂岩互层	231~2388
		中新统		棕褐、棕紫色泥岩为主,夹浅色细砂岩。局部以含砾砂、泥岩为主	703~1125
		渐新统	E <sub>3</sub>	灰-褐-棕褐泥岩、粉细砂岩泥灰岩、白云岩,偶见石膏及粒状赤铁矿	483~1069
	古近系	始新统		灰紫-浅灰-棕红色泥岩、夹灰色粉细砂岩、白云质泥灰岩	172~290
		古新统	E <sub>1-2</sub>		
	中生界	上统	K <sub>2</sub>	浅-深灰黑色泥岩与粉砂岩互层,富含有机质	263~489.5

3 遍。取样后用真空泵通过 0.45 μm 微孔滤膜对水样进行抽滤,分别装入 2 个 50 mL 的聚乙烯瓶中,充满水样,其中一个瓶中加浓 HNO<sub>3</sub> 使水样的 pH 值<2,用于常规阳离子和微量金属元素分析;另外一瓶不加任何试剂,用于阴离子分析。另取一瓶 500 mL 原水样用于采样当天的碱度滴定。用于氨氮分析的水样加硫酸使其酸化至 pH 值<2,于 4℃下保存。水中的溶解性有机碳采用德国 Elementar TOC 分析仪测定。

现场水化学指标测定包括:pH、溶解氧、电导率、氧化还原电位,采用美国 Hach sension2 和 Hach LDOTM HQ10 便携式仪器测定。常规阳离子用美国热电公司的 IRIS Intrepid II XSP 型 ICP-AES 进行测定;阴离子用美国 Dionex 公司的 DX-120 离子色谱仪进行测定;As 采用北京吉天公司 AFS830 氢化物原子荧光法测定;其他微量元素用 POEMS 等离子体光谱仪 ICP-MS 测定。以上分析在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质教育部重点实验室和地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。水中溶解的甲烷气体含量分析是在中国科学院兰州地质所天然气地球化学国家重点实验室完成,采用真空脱气-气相色谱法检测,气相色谱仪为美国安捷伦公司 HP6890 型。

采用 Le 等(2000)<sup>[4]</sup>的方法将滤膜过滤器和强阳离子交换柱、强阴离子交换柱串联对 44 个水样中的砷形态进行现场分离。方法如下:1)用体积比为 1:1 的甲醇和去离子水对离子交换柱进行活化;2)将 20 mL 水样以 1~2 mL/min 的流速依次通过上述分离装置,流出液收集在 50 mL 聚乙烯瓶中,该流出液即为 As(Ⅲ);3)水样通过分离装置后,将交换柱拆开,用 0.5 M 的 HCl 以 1 mL /min 的流速洗涤过滤器 3 遍,收集滤膜上的悬浮微粒态砷,每次洗涤 HCl 的用量分别为 10 mL 和 5 mL。分析每次的洗涤液。在两次洗涤液中检测到的 As 的总量除以通过滤膜的原始水样 20 mL,即得到颗粒态 As 的含量 Asp;4)用 5 mL 浓度为 1 M 的 HCl 洗脱保留在强阳离子交换柱上的 DMAA 两次,洗脱液分别保存于 50 mL 聚乙烯瓶中。计算浓度时需转换体积;5)用 5 mL 浓度为 60 mM 的醋酸洗脱阴离子交换柱 3 次,洗脱液分别保存于 50 mL 聚乙烯瓶即为 MMAA;6)再

①内蒙古自治区水文地质队. 内蒙古巴盟河套平原土壤盐渍化水文地质条件及其改良途径的研究, 1982.

用 10 mL 浓度为 1 M 的 HCl 洗脱阴离子交换柱,洗脱液保存于 50 mL 聚乙烯瓶即为 As(V)<sup>[2]</sup>。

3.2 沉积物样品采集与分析

依据 2006 年的水样数据,笔者于 2007 年 8 月 24 日至 8 月 27 日在研究区开凿了 2 个 50 m 深的钻孔并采集不同深度的代表性岩土样。钻孔 1(SH)位于研究区中部的沙海镇乌兰六社,属于砷中毒重病区;钻孔 2(TYS)位于研究区南部二道桥镇太阳升一社,为对照钻孔。起钻后,结合岩性变化立即采集沉积物柱心并进行岩性描述记录。样品采集后立即用保鲜膜包裹 5 层以上,再用两个保鲜袋密封,装入 PVC 管中,用胶带密封,送往实验室冷藏,两周内进行分析测试。

沉积物的矿物组成分析用荷兰 X'Pert PRO 衍射仪 DY2198 进行分析,在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成;沉积物中化学成分的测定采用国家环保局颁布的标准方法(HCl+HNO<sub>3</sub>+HF+HClO<sub>4</sub>)混酸消解,ICP-AES 检测;沉积物中的 As、Sb 含量测定采用王水水溶溶解,采用氢化物发生原子荧光法检测。以上分析测试在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质教育部重点实验室完成。

4 结果与分析

研究区地下水水化学指标统计结果见表 2。从

北面阴山山前冲洪积倾斜平原和南面靠近黄河的冲积湖积平原到平原中心的低洼带(主要集中在双庙镇、三道桥、沙海镇、蜜会镇、团结镇),地下水中的 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>含量呈现增加的趋势。

高砷地下水中阴离子以 Cl<sup>-</sup>和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>为主,阳离子以 Na<sup>+</sup>为主(图 2)。主要的水化学类型包括:Cl-HCO<sub>3</sub>-Na 型、Cl-Na 型、HCO<sub>3</sub>-Cl-Na 型。pH 值呈中性、偏碱性(7.0~8.3),平均 Eh 值为-155.1 mV,矿化度为 0.35~4.38 g/L。地下水砷分布(图 3)的特点是北高南低。在研究区南部及中心地带水砷含量都低于 10 μg/L,但在北面平原的低洼带(双庙镇、三道桥镇、沙海镇、蜜会镇、团结镇)高砷地下水呈不连续的条带状分布。高砷地下水中 DOC、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的浓度较高,平均含量分别为 5.63 mg/L 和 3.23 mg/L;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量普遍低于 2 mg/L,多数地下水中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度低于检出限(<0.1 mg/L);部分地区 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度较低,这可能是由于研究区长期以湖相为主的古地理环境和封闭的构造条件,形成了以还原为主的地球化学环境,造成部分地下水中的硫酸盐和硝酸盐被还原。

从图 4 中可以看出,除一个水样点之外,其余的高砷水样点随着 Cl<sup>-</sup>浓度的增加,Cl/Br 比值的增加量不明显。Cartwright I 等<sup>[5]</sup>指出 Cl/Br 比值可用来区分蒸发浓缩过程与盐岩溶解过程对地下水水化学特征的影响。因为盐岩可阻止更多的 Br 进入其矿物

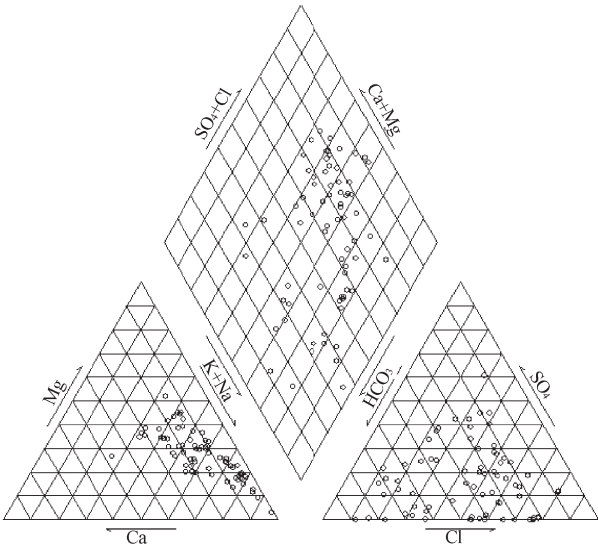


图 2 杭锦后旗高砷地下水三线图  
Fig.2 Piper's diagram of high As groundwater in Hanggin Rear Banner

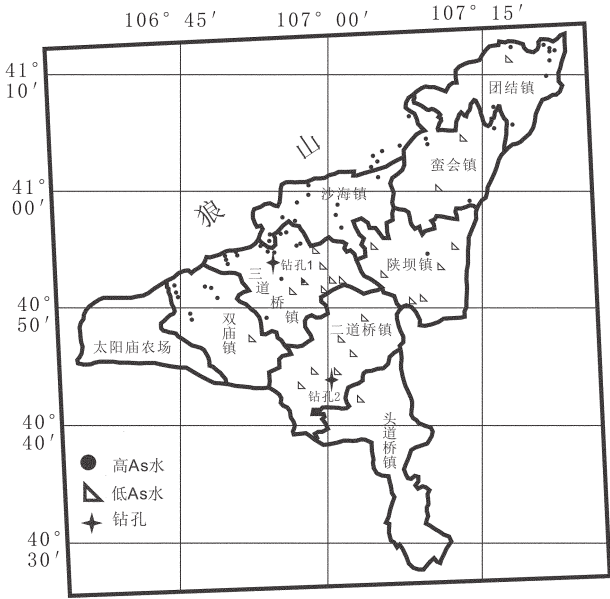


图 3 地下水采样点分布图  
Fig.3 Locations of groundwater sampling sites



表 2 杭锦后旗地下水水化学指标

Table 2 Hydrochemical analyses of groundwater in Hanggin Rear Banner

项目	最大值	最小值	平均值
pH	8.28	7.00	7.60
溶解氧(mg/L)	6.80	1.80	3.99
氧化还原电位 (mV)	136.00	-431.00	-85.66
F <sup>-</sup> (mg/L)	6.01	0.30	1.15
K <sup>+</sup> (mg/L)	31.14	0.48	5.81
Na <sup>+</sup> (mg/L)	1833.73	38.94	449.54
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	372.90	2.10	77.34
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	321.37	4.71	101.55
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	1550.75	0.01	296.96
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	4531.15	36.73	612.83
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	1290.48	243.77	589.67
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	55.16	ND	1.77
As (μg/L)	1093.00	1.00	249.84
Fe (μg/L)	5262.67	3.22	920.01
Mn (μg/L)	1548.35	6.32	231.84
B (μg/L)	2527.81	130.00	906.90
Ba (μg/L)	5763.91	16.15	511.18
Sr (μg/L)	9112.51	107.79	2167.53
Si (mg/L)	5.00	1.77	3.56
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	10.48	0.10	2.72
DOC (mg/L)	12.88	2.31	5.48
Al (μg/L)	59.00	9.00	30.89

注:“ND”表示未检测出,在计算中作为 0 处理。

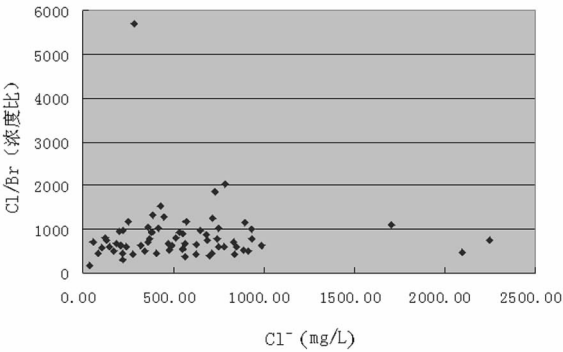


图 4 杭锦后旗高砷地下水中 Cl<sup>-</sup>浓度与 Cl/Br 比值之间的关系

Fig.4 Relationship between Cl concentration and Cl/Br ratio in high-As groundwater

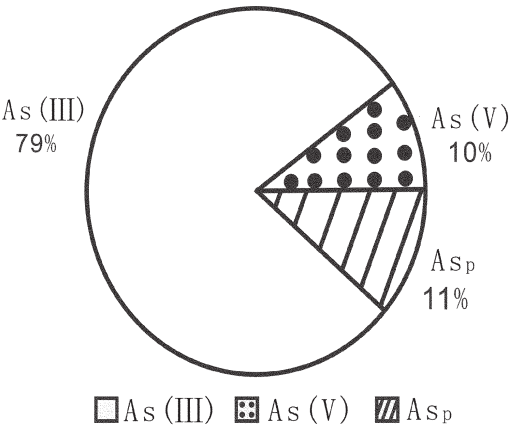


图 5 杭锦后旗地下水中砷形态分布特征

Fig.5 Distribution of arsenic species in groundwater of Hanggin Rear Banner

晶格,因此盐岩溶解将导致 Cl/Br 比值明显增大,而蒸发浓缩作用不会改变 Cl/Br 比值。由此可以判断蒸发浓缩过程是造成研究区高砷地下水中 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>浓度增加的主要过程。

研究区高砷水中 As 的含量为 15.5~1093 μg/L。高砷水的水井深度基本上处于 15~35 m。44 个水样的砷形态现场分离测试结果显示地下水中以 As(Ⅲ)为主,浓度为 19.4~902.5 μg/L,约占总砷的 79%;As(V)和颗粒态砷(As<sub>p</sub>)含量明显低于 As(Ⅲ)的含量,平均含量分别为 37.9 μg/L 和 45.1 μg/L;有机态砷含量更低,一般低于 2 μg/L(图 5)。由大比例的 As(Ⅲ)可知研究区高砷地下水处于还原环境。

另外,研究区的氟中毒现象也较严重,据有关部

门统计,该地区的氟中毒人数达到 36 000 人<sup>①</sup>。分析结果显示大约有 33%的水样中 F<sup>-</sup>的浓度超过了 1 mg/L,据患病村民介绍,他们饮用的高氟水又苦又咸,口感差。高氟地下水中 F<sup>-</sup>的浓度为 1.11~6.01 mg/L,分布于北面平原的低洼带且多数沿排干两侧分布。除 3 个水样点之外,其余的高氟水中 As 含量均超标,出现了一种高砷水与高氟水并存的现象。

图 6 显示了两个钻孔的沉积物岩性变化情况,从图中可知:钻孔 1 从地表到地下 10.5 m 的范围内是以粉砂为主,有亚粘土和粘土层覆盖;10.5~30 m

①杭锦后旗卫生防疫站. 杭锦后旗中央和自治区补助地方公共卫生专项资金地方性砷中毒、氟中毒、高碘地区分布和病情调查项目资料汇编,2005.

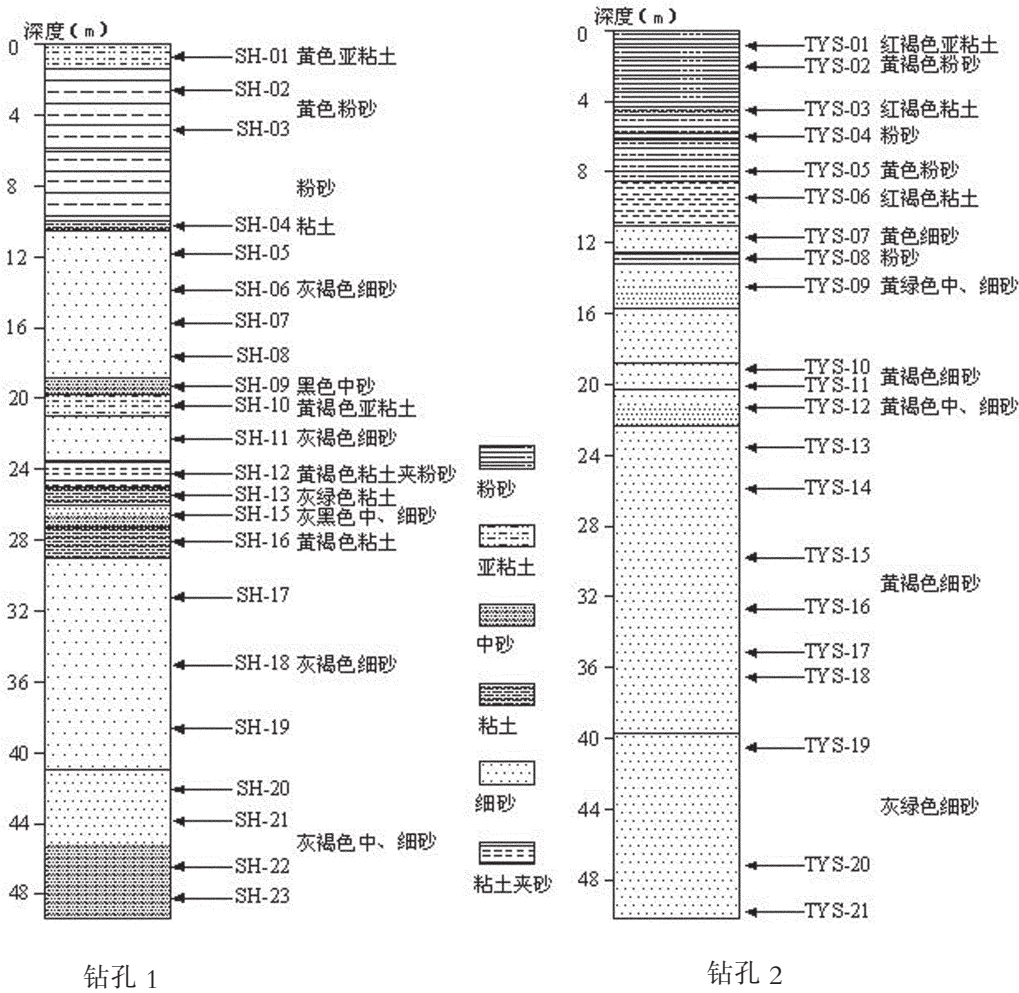


图 6 研究区两钻孔沉积物岩性变化特征

Fig.6 Lithological variations of sediments in two boreholes of Hanggin Rear Banner

以灰褐色或黑色的中、细砂为主,中间夹土层粘土,有浓烈的腐臭味,有机质含量较高。30 m 以下均为灰褐色中、细砂层;钻孔 2 从地表到地下 13.2 m 的范围内主要为粉砂和粘土、亚粘土互层;13.2 m 以下为细砂,从颜色上看,多数为黄褐色,未见灰、黑色砂层。由此可知,高砷区含水层上部的粘土和亚粘土盖层阻止了大气中  $O_2$  的进入,促使含水层还原环境的产生,这点可从有机质含量较高的粘土和浓烈的腐臭味得到证实。而低砷区含水层多为黄褐色的细砂组成,无腐臭味,含水层上部的粉砂、粘土和亚粘土盖层密封性较差,含水层为弱氧化环境。

由沉积物化学成分分析结果得知钻孔 1 沉积物

中的 As 含量高于钻孔 2,分别为 7.7~34.6 mg/kg 和 3~21.8 mg/kg(图 7)。在钻孔 1 中高砷的沉积物主要集中在地下 10 m、20 m、25 m 以及 28 m 处,这 4 个层位的沉积物岩性均为粘土和亚粘土;钻孔 2 的沉积物中的 As 含量仅在地下 13 m 范围内相对较高且出现在粘土层中。与这两个钻孔相对应的两户村民家的压把井井深均在 30 m 左右,从图 7 中可以看出在这一层位上处于高砷区的钻孔 1 中的沉积物含 As 量明显高于非高砷区的钻孔 2 中的。由于高砷区含水层处于还原环境中,因此沉积物中的铁/锰氧化物(或氢氧化物)的还原溶解易使吸附的砷释放到地下水中。这是研究区高砷地下水形成的主要原因。

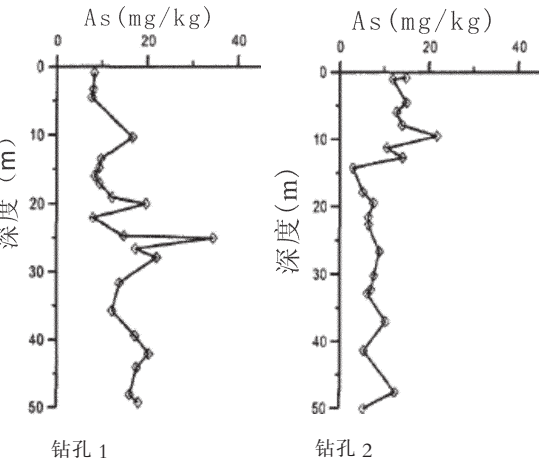


图 7 杭锦后旗沉积物中 As 含量垂向分布特征  
Fig.7 V ertical distribution of As in sediments of two boreholes

5 结 论

- (1)研究区高砷地下水主要的水化学类型包括:  $\text{Cl-HCO}_3\text{-Na}$  型、 $\text{Cl-Na}$  型、 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$  型。高砷地下水呈不连续的条带状分布在研究区北面的低洼地带,且水中  $\text{DOC}$ 、 $\text{NH}_4^+$  的浓度较高, $\text{NO}_3^-$  含量普遍较低,部分地区  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度较低。
- (2) 研究区高砷水中总 As 的含量为  $15.5\sim 1093\text{ }\mu\text{g/L}$ ,且主要以  $\text{As(III)}$  形式存在。
- (3)地下水中大比例的  $\text{As(III)}$  含量,较高浓度的  $\text{DOC}$ 、 $\text{NH}_4^+$  以及较低含量的  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  说明研究区高砷地下水处于还原环境。
- (4)由  $\text{Cl/Br}$  比值与  $\text{Cl}^-$  浓度之间的关系可以判断蒸发浓缩过程是造成研究区高砷地下水中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  浓度增加的主要过程。
- (5)长期以湖相为主的古地理环境和封闭的地

质构造,干旱半干旱的气候条件以及水交替滞缓的水文地质特征是构成高砷地下水形成的外部环境。

(6)高砷区含水层沉积物中的 As 含量普遍高于低砷区中的。高砷区含水层处于还原环境中,而低砷区含水层处于弱氧化环境。还原条件下,高砷区沉积物中的铁/锰氧化物的还原溶解易使吸附的砷释放到地下水中。这是研究区高砷地下水形成的主要原因。

**致谢:** 野外工作得到了内蒙古巴彦淖尔市杭锦后旗疾病预防控制中心的鼎力协助,在此表示诚挚的感谢。

参考文献 (References):

[1] 杨素珍. 内蒙古河套平原原生高砷地下水的分布与形成机理研究 [D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2008.  
Yang Suzhen. Formation of High Arsenic Groundwater and Water-rock Interaction in Shallow Aquifers from Hetao Plain, Inner Mongolia [D]. China University of Geosciences(Beijing), 2008(in Chinese).

[2] 邓娅敏. 河套盆地西部高砷地下水系统中的地球化学过程研究 [D]. 中国地质大学(武汉)博士学位论文, 2008.  
Deng Yamin. Geochemical Processes of High Arsenic Groundwater System at Western Hetao Basin[D]. China University of Geosciences (Wuhan), 2008(in Chinese).

[3] 李建彪. 河套盆地晚第四纪成湖环境变化与构造活动研究[D]. 中国地震局地质研究所博士学位论文, 2006.  
Li Jianbiao. A Study on the Lake Forming Environment and Tectonic Activity during the Late Quaternary in the Hetao Basin [D]. Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2006(in Chinese).

[4] Le X C, Yalcin S, Ma M. Speciation of submicrogam perliter levels of arsenic in water: On -site species separation integrated with sample collection[J]. Environmental Science and Technology, 2000, 34:2342-2347.

[5] Cartwright I, Weaver T R, Fifield L K. Cl/Br ratios and environmental isotopes as indicators of recharge variability and groundwater flow: an example from the southeast Murray Basin, Australia [J]. Chemical Geology, 2006, 231:38-56.

## Geochemical characteristics of the As-bearing aquifer in the Hetao plain, Inner Mongolia

HE Xin<sup>1</sup>, MA Teng<sup>1</sup>, WANG Yan-xin<sup>1</sup>, DENG Ya-min<sup>1</sup>,  
HUANG Bin<sup>2</sup>, HE Jun<sup>1</sup>, ZHAO Jie<sup>1</sup>, TIAN Chun-yan<sup>1</sup>, LI Zhen-long<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, Ministry of Education; China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. College of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Hanggin Rear Banner Center for Disease Control and Prevention, Hanggin Rear Banner 015400, China)

**Abstract:** The Hetao plain of Inner Mongolia is one of the serious endemic arsenic poisoning areas in the world. The authors took Hanggin Rear Banner in western Hetao plain as a typical study area, where endemic arsenic poisoning constitutes a very severe problem. Studies show that As concentration is 7.7–34.6mg/kg in sediments of the high As groundwater area and As concentrations are relatively high in clay and mild clay. According to the results of the authors' investigation, As is incorporated in amorphous iron oxides and is associated with sulfides and targeting acid volatile sulfurs, carbonates constitute the main association of sedimentary As, accounting for over 50% of total As. pH values of high As groundwater are 7.0–8.3, average Eh value is –155.1mV, average TDS value is 1.58 g/L, main hydrochemical types are Cl–HCO<sub>3</sub>–Na, Cl–Na and HCO<sub>3</sub>–Cl–Na, and As concentration ranges from 15.5 to 1093 μg/L and is mainly represented by As (III), high level DOC (0.73–35.76mg/L), HCO<sub>3</sub><sup>–</sup>(283.75–1290.48mg/L), NH<sub>4</sub><sup>+</sup>(0.27–10.48 mg/L) and minor nitrates and sulfate. Hanggin Rear Banner is also one of the serious endemic fluorosis areas, with fluoride content being 1.11–6.01mg/L in high F groundwater. Due to the presence of excessive As in most high F groundwater areas, there exists a coexistence phenomenon of high F groundwater and high As groundwater. A comprehensive analysis shows that high As groundwater was formed in a reductive environment in Hetao plain. Under reducing conditions, the reductive dissolution of Fe/Mn oxides (or hydroxide) from sediments in high As areas can release arsenic into groundwater. This is the main factor responsible for the formation of high As groundwater in the study area.

**Key words:** High-As groundwater; geochemical characteristics; Hetao plain; Inner Mongolia

---

**About the first author:** HE Xin, female, born in 1981, doctoral candidate, engages in environmental science and engineering; E-mail: wklxin@126.com.