

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2017.02.03

# 内蒙古河套平原典型高砷区地下水中砷的演化规律

张 扬<sup>1</sup>, 郭华明<sup>2</sup>, 贾永峰<sup>3</sup>, 张 卓<sup>2</sup>

(1. 浙江广川工程咨询有限公司, 浙江 杭州 310020; 2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 3. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要:**通过对高砷地下水典型区完整地质单元不同深度含水层地下水进行监测,分析了与砷释放、迁移和富集有关的敏感因素(水位、Eh、总铁、亚铁等)的时间和空间变化规律,探讨了高砷地下水的形成机理。结果发现,地下水灌溉区和黄河水灌溉区,地下水水位均受人为灌溉活动的影响。地下水砷含量在空间和时间尺度上发生有规律的变化。在空间尺度上,地下水中砷含量随着深度的增加而升高,井深小于10 m的地下水砷含量在1.88~2.58 μg/L;井深在10~15 m之间的地下水中砷含量在18.2~217 μg/L;井深在15~25 m之间的地下水中砷含量在38.3~226 μg/L。受人为灌溉影响,地下水中砷的含量会随着地下水位的抬升而升高。地下水砷含量随时间变化的原因是水位抬升使水位变化造成氧化还原环境改变。地下水系统含砷铁氧化物矿物的还原性溶解、脱硫酸作用等是控制地下水砷含量的主要水文地球化学过程。

**关键词:**高砷地下水;含水层;地下水位;时间;空间

中图分类号:P641.3

文献标识码:A

文章编号:1000-3665(2017)02-0015-08

## Geochemical evolution of high arsenic groundwater in a typical area of the Hetao Basin, Inner Mongolia

ZHANG Yang<sup>1</sup>, GUO Huaming<sup>2</sup>, JIA Yongfeng<sup>3</sup>, ZHANG Zhuo<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Guangchuan Engineering Consulting Co. Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310020, China;  
2. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;  
3. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Based on monitoring of groundwater levels and chemical components at different aquifers in a typical hydrogeological section of the Hetao basin, spatial and temporal variations in As, redox-sensitive parameters (including Eh, total dissolved Fe, Fe(II)) were assessed, and the formation mechanisms of high As groundwater were evaluated. Results showed that groundwater levels were affected by agricultural irrigation in both groundwater irrigation area and surface water irrigation area. Spatial and temporal variations of groundwater As were observed. Spatially, groundwater As concentrations increased with the increasing sampling depths. In aquifers at depths <10 m, groundwater As was less than 5.0 μg/L, between 18.2 and 217 μg/L at depths 10~15 m, and between 38.3 and 226 μg/L at depths 15~25 m. Affected by agricultural irrigation, groundwater As generally increased with the increase in groundwater levels. The reason for the increases in As concentrations with increasing water levels is that the fluctuation of groundwater level induced the change of groundwater redox conditions. The major hydrogeochemical processes controlling groundwater As

收稿日期: 2016-10-08; 修订日期: 2017-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(41222020, 41672225)

第一作者: 张 扬(1985-), 男, 工程师, 主要从事水利规划、水环境研究。E-mail: zhangyangqj@163.com

通讯作者: 郭华明(1975-), 男, 教授, 主要从事水文地质学的教学与科研工作。E-mail: hmguo@cugb.edu.cn

concentrations included reductive dissolution of Fe(Ⅲ) oxides and bacterial sulfate reduction.

**Keywords:** High As groundwater; Aquifer; Groundwater level; Spatial; Temporal

地方性砷中毒作为一个世界性难题一直困扰着人类。其发病周期长,中毒初期很难被发现,给砷中毒的防治带来了很大难度<sup>[1-2]</sup>。地方性砷中毒可分为饮水型砷中毒和燃煤型砷中毒,而又以饮水型砷中毒分布最广,中毒人数最多<sup>[3]</sup>。2004 年世界卫生组织(WHO)对砷的生活饮用水标准限定值由 50  $\mu\text{g/L}$  降到 10  $\mu\text{g/L}$ 。我国是地方性砷中毒的重灾区,饮水型砷中毒分布在山西、内蒙古、新疆、宁夏、吉林、四川、安徽、青海、黑龙江、河南、山东等省(区),其中以山西、内蒙古病情最重<sup>[4-5]</sup>。

内蒙古自治区是地下水砷污染范围最大、暴露人口最多、中毒情况最为严重的地区<sup>[4]</sup>。砷中毒区域涉及巴彦淖尔市临河区、杭锦后旗、五原县、乌拉特前旗、乌拉特中旗、乌拉特后旗、磴口县等十一个旗县,区域面积达 30 000  $\text{km}^2$ ,涉及 30 万人,患病人数超过 2 000 人。其中,河套平原是最典型的高砷地下水分布区,地下水最大砷浓度达 857  $\mu\text{g/L}$ <sup>[6]</sup>。该平原地下水中稀土元素异常较好的反应了砷含量的变化规律<sup>[7]</sup>。地下水砷含量不仅受地表排干和灌渠的影响,还与地表/

近地表的黏土层分布有关<sup>[8]</sup>。此外,地下水中有有机胶体,特别是分子量在 5 ~ 10 kDa 之间的有机胶体,与地下水砷含量密切相关,可以影响砷在含水层中的迁移转化<sup>[9]</sup>。

在以往研究的基础上,选择河套平原的一个典型高砷地下水分布区作为研究区。在该区相应位置进行了钻孔,采集沉积物样,并成井监测地下水化学特征,以研究地下水化学特征随时间的演化规律,并探讨高砷水形成的水文地球化学过程。

## 1 研究区概况

该典型高砷地下水分布区位于内蒙古巴彦淖尔市杭锦后旗西北 15 km 沙海镇,北靠狼山(图 1),属于中温带大陆性半干燥半湿润气候,海拔 1 010 ~ 1 050 m,年降水量 130 ~ 220 mm,年蒸发量 1 900 ~ 2 500 mm,年平均气温 6.2 ~ 7.9  $^{\circ}\text{C}$ 。山前地下水补给区以及地下水径流区,由于地势较高无法使用引黄灌渠的黄河水进行灌溉,这些区域大部分使用地下水进行灌溉。

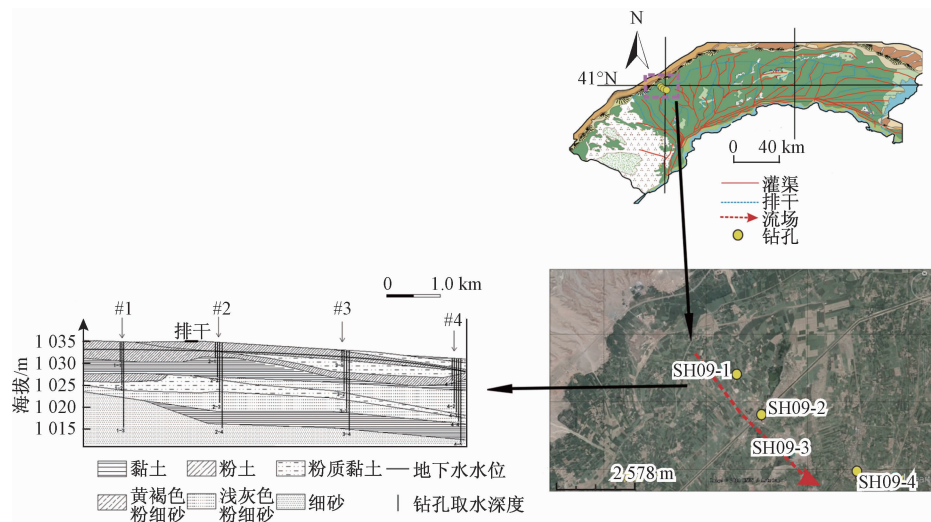


图 1 研究区地理位置、地质剖面及钻孔取水深度示意图

Fig. 1 Locations of study area, hydrogeological section and sampling sites of groundwater

研究区包含完整的水文地质单元(即山前溶滤区、径流区、浓缩还原区和排泄区)。通过前期对河套平原地下水的采集与分析,发现该区高砷水主要集中在浅层地下水中,超标严重的水样埋深集中在 15 ~ 30 m 之间<sup>[10]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 监测井的设立

在 4 个代表性位置上开展了钻探工作(图 1),以获取地层岩性特征。#1 钻孔靠近山前冲洪积扇,地质

条件相对简单,上层黄褐色粉土较厚,在埋深4~7.5 m处有3.5 m厚的黄褐色黏土;在埋深9.2 m以下由粉细砂向细砂过度,在埋深11.5 m以下均为细砂;由于还原环境的增强,在埋深18.5 m以下细砂由黄褐色变为浅灰色。#2 钻孔处,地层中黏土层出现在4~7 m间,厚度3 m,上部由上到下分别为黄褐色粉细砂、黄褐色粉土和黄褐色粉黏土,黏土以下主要以粉砂和细砂为主;在埋深12 m处,砂层颜色由黄褐色变为灰色。#3 钻孔黏土层逐渐增多,9.5 m以上黏土、粉质黏土和粉细砂交替出现;在9.5 m以下均为细砂和粉细砂层;在12~19 m砂层颜色变为浅灰色;在19 m处夹杂有少量黑色粉质黏土,19.3 m以下为黑色细砂。#4 钻孔处于平原还原区,黏土多层次分布于粉土、粉质黏土、粉细砂和细砂之间,除18 m以下砂层厚度较大,其他各层厚度均较小。

在钻孔#1、#2、#3和#4的位置分别设立分级监测井。监测井的滤管长度为1.0 m,滤管处均用滤网(150目)包裹,并对钻孔进行止水填埋,防止不同层次含水层水样混合<sup>[11]</sup>。监测井中放入水位计进行实时观测。定期采集水样,在空间和时间尺度上对于高碑地下水的演化进行分析研究。在钻孔岩性剖面见图1。多层监测井的位置以及岩性详见文献<sup>[12]</sup>。

## 2.2 地下水样品采集

在2010年5月—2011年11月,共进行了9次地下水样品采集。现场测定水温、pH值、Eh值、电导率、总铁、Fe(II)、氨氮、硫化物等,并滴定水样碱度。地下水样采集均通过0.45 μm膜现场过滤。样品过滤后装入聚乙烯瓶中,对于阳离子和微量元素分析的水样,加入1:1(V/V) HNO<sub>3</sub>酸化进行保护;形态砷的水样加入乙二胺四乙酸(EDTA)酸化至pH为2加以保护,防止形态变化;有机碳保存于20 mL棕色玻璃瓶中(防止光照分解),并加入1:9重蒸过的硫酸1.4 mL酸

化;阴离子测试样品不需要加入保护液。所有样品在野外保存在0~4℃保温箱中,到室内后放入冰柜冷藏保存。

## 2.3 地下水样品分析

地下水样的主要阳离子(Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>等)由美国热电 ICP-AES(iCAP6000, Thermo)分析测定;微量元素(As、Fe、Zn、Cd、Mn、Co、Cu、Se、Ba等)分析由 ICP-MS 测定(7500C, Agilent);水中溶解有机碳(TOC)由岛津 TOC-V 仪器测定;阴离子(Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、F<sup>-</sup>、Br<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)由美国戴安公司 ICS2000 测定。

分析地下水样时,加设5%的重复样,所有重复样品的误差小于5%。所有样品分析的各项指标的准确度和精密性均符合质量要求,误差小于5%,合格率为100%。

## 3 地下水水位动态

研究区每年4—10月为耕作季节,区内大部分地区采用黄河水灌溉。在山前补给区由于地势较高,引黄水量少,为满足灌溉用水,2001年起,当地村民相继开采地下水进行灌溉。受引黄灌溉和地下水开采等人为因素的影响,研究区内地下水水位存在季节性变化,且地下水水位的波动规律在山前补给区和平原区不同。

#1 钻孔位于山前补给区。灌溉期大量抽取地下水灌溉,导致水位埋深自4月初的4 m急剧下降到7.3 m;6月上旬小麦等农作物成熟收获后到6月下旬下一季农作物播种之前,地下水得到了短时间的恢复,地下水水位有所上升;秋季作物生长期,正值当地最炎热的7—9月,为保证作物正常生长,所需水量也更多,地下水埋深降到最低值7.9 m;在秋季作物收获后,灌溉用水量减少,地下水位上升;在每年10月还要进行一次冬灌,保证土壤墒情,为来年耕作做准备。11月—翌年3月底,地下水水位恢复到埋深4 m(图2)。

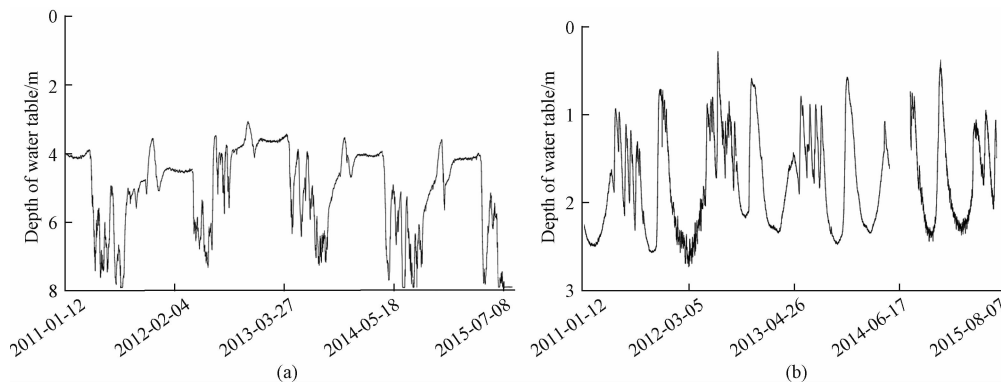


图2 钻孔水位随时间的变化关系(A: #1; B: #3)

Fig.2 Dynamics of groundwater levels in two wells (A: #1; B: #3)

#2、#3、#4 均位于平原区,该区域主要采用引黄灌溉。每年从 4 月初引黄灌溉开始,每次灌溉后,地下水水位均会升高,产生一个峰,下次灌溉前,灌溉水通过自由重力水或者蒸散发作用逐渐消退。除了在耕作期为保证作物生长进行灌溉外,每年 10 月,平原区也会进行一次引黄冬灌,地下水水位抬升,出现一个峰。11 月—翌年 3 月底,地下水水位稳定,埋深维持在 3 m 左右(图 2)。

该区地下水水位受到人类活动影响较大<sup>[13]</sup>。山前径流区抽取地下水灌溉,地下水水位降低,停止灌溉时,水位会由径流补给而上升。平原区引黄灌溉,由于外来水源的补给,使得地下水水位抬升,灌溉停止后,水位发生回落。

## 4 地下水砷含量动态变化规律

### 4.1 砷含量随深度变化

采用 9 次监测结果的平均值作为不同深度和位置上地下水砷含量进行分析。下层地下水中砷含量和还原强度高于上层(图 3)。地下水砷含量一般随深度的增加而增加(图 4),这说明了还原作用促进砷的释放。在一个完整的水文地质单元,从补给区到径流区,地下水的还原条件逐渐增加,砷含量在同一含水层应该呈现逐渐升高的趋势,#2 钻孔地下水砷含量低于#1 钻孔,这是由于#2 钻孔受其西侧 50 m 处排干的影响。由于水位的波动,排干水补给地下水或者地下水补给排干,在排干附近氧化还原环境随着水位埋深上下变动而发生变化,使得砷重新被沉积物吸附,导致地下水中砷含量降低。#3 钻孔由于受到局部地质环境条件的影响,其砷含量较低,随着埋藏深度的增加,ORP 降低,地下水中砷含量升高,总体规律与其他钻孔规律相同(图 4)。

### 4.2 砷含量随时间变化特征

不同时间不同深度地下水砷含量见图 5。在地下水灌溉区,灌溉季节(4—10 月)地下水水位急剧下降,包气带变厚,还原强度降低,不利于砷的还原释放,地下水中砷含量降低。当灌溉结束(11 月—翌年 3 月)后,地下水水位恢复,含水层重新达到饱和,含水层还原强度增强,地下水中砷含量升高。

在引黄灌溉区域,灌溉期地下水水位上升,较浅层地下水中砷由于稀释作用含量降低。灌溉引起的地下水水位升高使包气带的氧化还原环境发生变化,含水层还原环境增强,沉积物中砷释放加速,地下水中砷含量升高。由于地表水灌溉多次,砷含量变化存在波动。

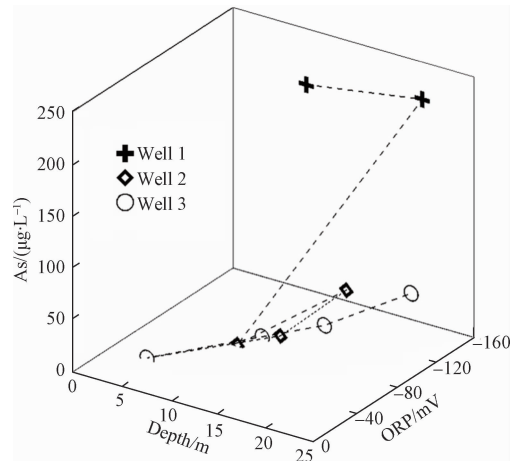


图 3 不同深度和位置上地下水中平均砷浓度与平均 ORP 值  
(监测时间为 2010 年 5 月—2011 年 11 月)

Fig. 3 Average As concentrations and ORP values  
in multilevel wells at different depths

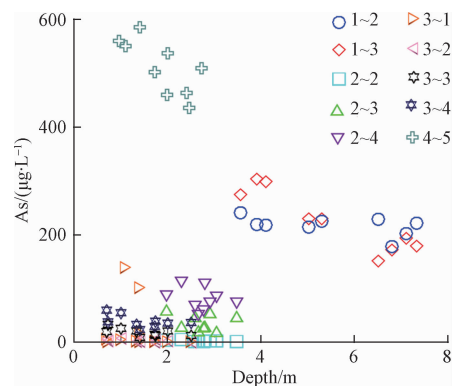


图 4 井深与砷浓度关系图(监测时间为  
2010 年 5 月—2011 年 11 月)

Fig. 4 Scatter plots of well depths and arsenic concentrations

## 5 地下水砷含量影响因素

### 5.1 Fe 和 Fe(Ⅱ)对地下水中砷含量影响

地下水 Fe、Fe(Ⅱ)与砷均呈现出了正相关关系,深层地下水中正相关关系更为明显;浅层地下水影响因素较多,相关性较差(图 6)。随着铁氧化物矿物的还原,Fe(Ⅱ)进入地下水中,地下水中的总溶解铁含量升高。在此过程中,砷释放出来,随即砷含量也升高。经过分析发现,除井 4-5 外,其它各井总 Fe 和 Fe(Ⅱ)成明显的正相关关系。井 4-5 中总 Fe 与 As 存在明显的不协调性,这可能与该井地下水中硫化物含量较高有关(达到 14 μg/L)。由于 FeS 和 FeS<sub>2</sub> 等硫化物矿物溶解度较低,地下水中 Fe(Ⅱ)易与 S<sup>2-</sup>产生沉淀。这些硫化物沉淀通常会结合一部分砷<sup>[14~15]</sup>。以

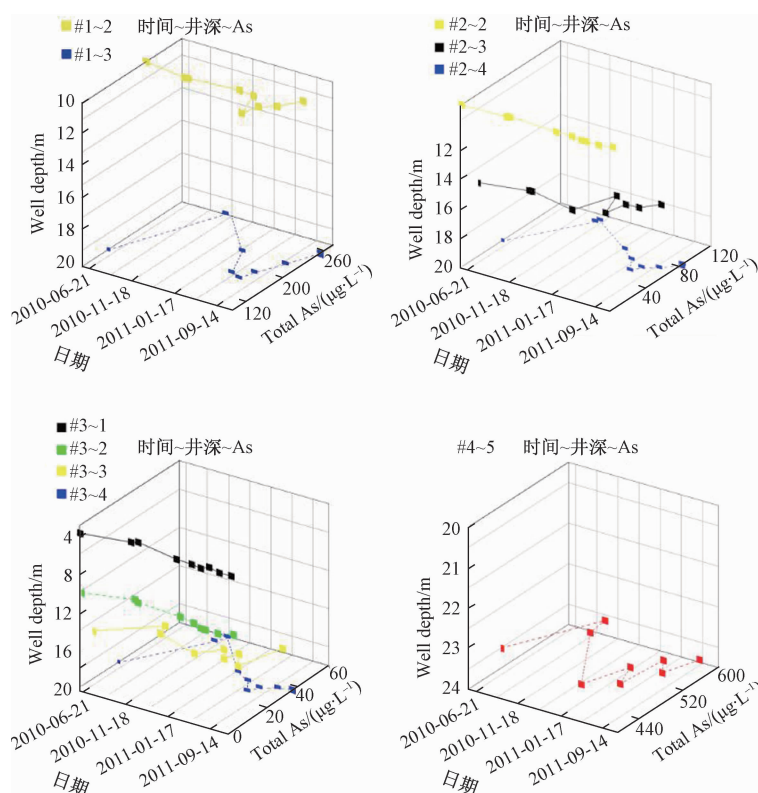


图5 四个钻孔不同时间地下水砷含量图

Fig. 5 Groundwater As concentrations at different times in four multilevel wells

前的研究也表明,井4-5中 $\text{SO}_4^{2-}$ 的含量低于检出限,且 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ 达到39.65‰<sup>[16]</sup>,表明含水层中发生明显的脱硫酸作用<sup>[17]</sup>。随着Fe和Fe(II)的含量增加,砷含量随之升高,进一步证明了含砷铁锰矿物的还原是地下水中砷的主要来源<sup>[18]</sup>。

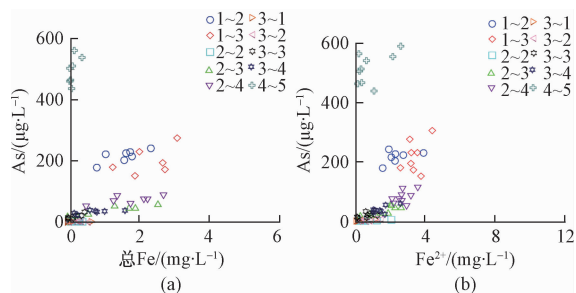


图6 地下水总Fe(a)和Fe(II)(b)与砷关系图

(监测时间为2010年5月—2011年11月)

Fig. 6 Plot of arsenic concentrations and total Fe (A) and Fe(II) (B) concentrations in groundwater from multilevel wells

由人类活动引起的地下水周期性动态变化使得含水层氧化还原环境发生变化,地下水位较高时,含水层还原环境增强,含砷铁锰氧化物矿物的还原性溶解,地下水位较低时,包气带增厚,含水层还原强度降低,不利于砷铁锰氧化物矿物的还原性溶解。在时间尺度

上,地下水中砷与总铁的变化规律相同(图7)。

### 5.2 $\text{SO}_4^{2-}$ 还原对地下水中砷含量的影响

对于还原环境的判断,一般情况下以Eh作为判定依据,但是结果受外界影响较大。在该研究区通过相关关系定量分析,计算 $\text{SO}_4^{2-}$ 还原判断还原环境的强度, $\text{SO}_4^{2-}$ 还原比例越高,还原强度越高,水砷含量越高<sup>[19-20]</sup>。四个钻孔中,地下水中硫酸根与砷含量呈现一定的负相关关系(图8)。这是由于还原作用使得 $\text{SO}_4^{2-}$ 减少,而较强的还原作用促进了砷的释放。但浅层地下水中相关性较差,除了受入渗水影响较大外,采样数量有限也是总体趋势并不十分明显的一个重要原因。

时间尺度上,人类活动引起含水层还原环境的变化,在地下水水位较低时,含水层还原强度降低,地下水中砷含量降低, $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度升高;在地下水水位升高后,含水层还原强度增强,地下水中砷含量升高, $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度降低。地下水水位周期性变化直接影响含水层氧化还原环境的变化,使得地下水中 $\text{SO}_4^{2-}$ 与砷含量出现波动(图9)。

### 5.3 TOC对地下水中砷含量的影响

地下水砷与TOC关系呈现正相关关系,但是相关

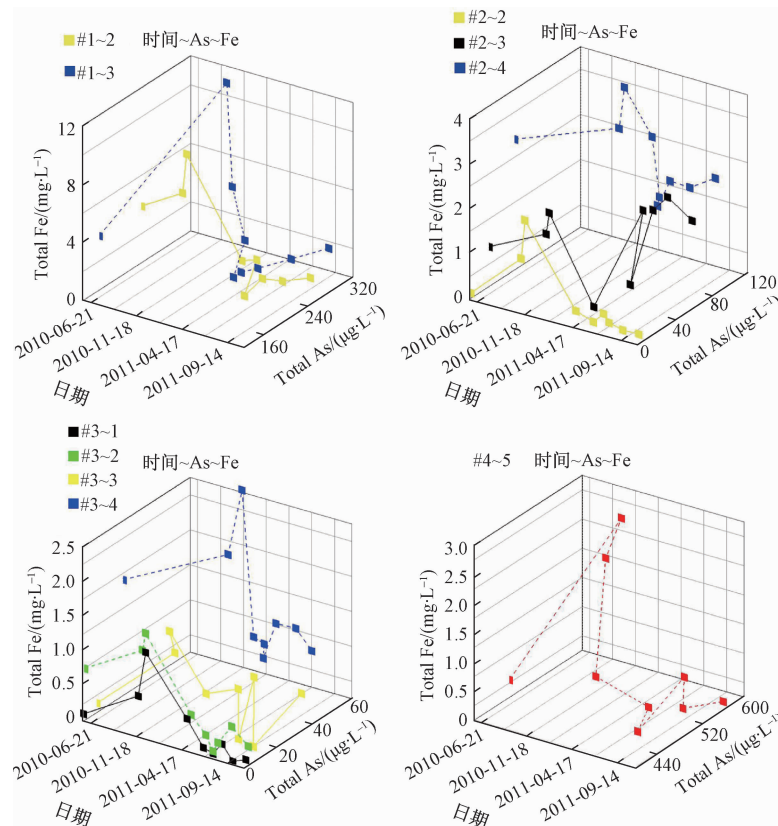
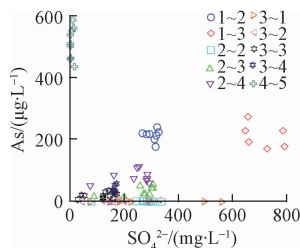


图 7 时间尺度上地下水中总 Fe 与砷关系图

Fig. 7 Plot of arsenic concentrations and total Fe concentrations in groundwater with time

图 8 地下水  $\text{SO}_4^{2-}$  与砷关系图 (监测时间为 2010 年 5 月—2011 年 11 月)Fig. 8 Groundwater arsenic versus  $\text{SO}_4^{2-}$  from multilevel wells

性不是很明显。深层地下水中砷与 TOC 正相关性较好。砷由沉积物释放到水的过程中,微生物作用是一个不可忽视的影响因素,而 TOC 是微生物的重要碳源,促进微生物的生长繁殖,加速砷的释放。相比而言,浅层水中砷与 TOC 没有呈现出较好的相关性。可能存在两方面的原因:浅层地下水受到入渗水影响较大,地表及浅层土壤中有有机物被带入到浅层地下水中<sup>[21]</sup>,其 TOC 含量较高,但所处还原环境较弱,因而其砷含量较低;另一方面,具有微生物活性的溶解性有机物在不同地下水中存在差异<sup>[22]</sup>。因此,表征地下水

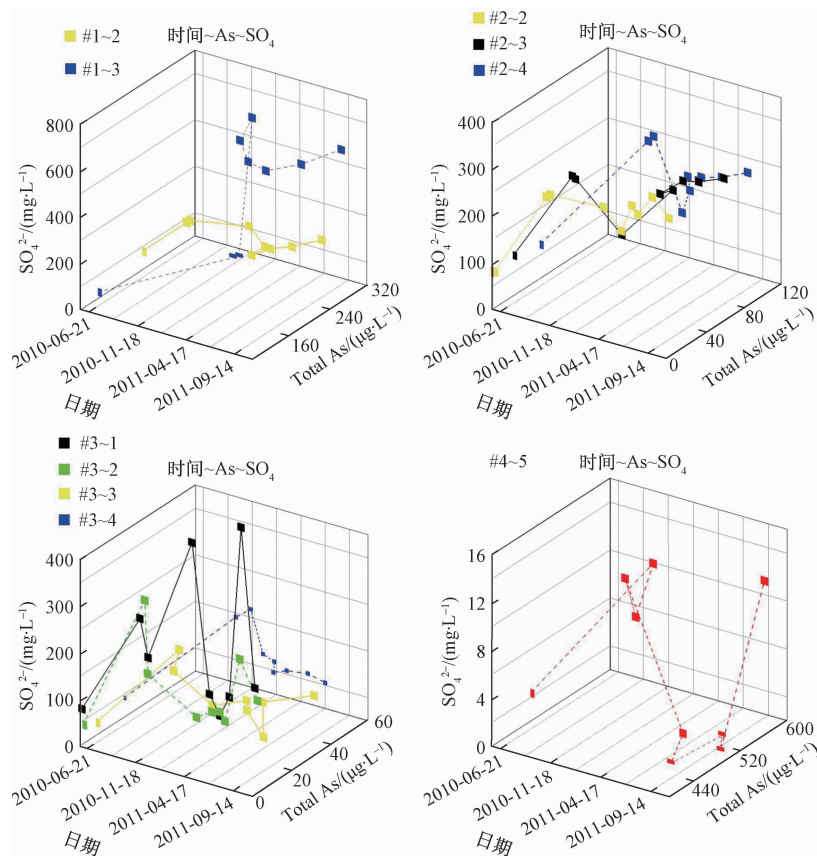
中具有微生物活性的溶解性有机物的含量、特征将是下一步的研究重点。

## 6 结论

(1) 地下水水位受人为灌溉影响较大。在地下水灌溉区,灌溉季节,地下水位降低,包气带变厚。灌溉结束后,地下水水位恢复,含水层重新达到饱和。在引黄灌溉区域,灌溉期地下水位上升;灌溉结果后,地下水位降低。这种地下水位的变化特征决定了地下水的径流模式。

(2) 地下水砷含量受人为灌溉影响较大,砷浓度随着地下水水位的周期性变化也发生周期性起伏。在地下水灌溉区,灌溉季节,包气带变厚,还原强度降低,不利于砷的还原释放,地下水中砷含量降低。灌溉结束后,地下水水位恢复,含水层重新达到饱和,含水层还原强度增强,地下水中砷含量升高。引黄灌溉区域,灌溉期灌溉引起的地下水水位升高使得含水层还原环境增强,沉积物中砷的释放加速,地下水中砷含量随之升高。

(3) 铁锰氧化物矿物的还原性溶解和次生矿物的

图 9 时间尺度上地下水中  $\text{SO}_4^{2-}$  与砷关系图Fig.9 Groundwater arsenic versus  $\text{SO}_4^{2-}$  with time

沉淀共同决定地下水中砷等化学成分的变化。#1—#3 钻孔地下水中  $\text{Fe}(\text{II})$  与砷呈现出较好的正相关关系, 进一步证明了砷的释放与还原环境有关。井 4-5 中地下水由于 S 与  $\text{Fe}(\text{II})$  共沉淀作用, 使得  $\text{Fe}(\text{II})$  与 As 未呈现出较好的相关关系。

#### 参考文献:

- [1] 董兵, 刘健荣. 内蒙地区水砷和人体血、尿砷含量的测定 [J]. 中国卫生检验杂志, 2006, 16(9): 1098 - 1099. [DONG B, LIU J R. Determination of arsenic in water, human blood and urine in Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2006, 16(9): 1098 - 1099. (in Chinese)]
- [2] 候少范, 王五一, 李海蓉, 等. 我国地方性砷中毒的地理流行病学规律及防治对策 [J]. 地理学科学进展, 2002, 21(4): 391 - 40. [HOU S F, WANG W Y, LI H R, et al. Study on the geographically epidemic character of arsenism and its countermeasures [J]. Progress in Geography, 2002, 21(4): 391 - 40. (in Chinese)]
- [3] Ahmed K M, Bhattacharya P, Hasan M A, et al. Arsenic enrichment in groundwater of the alluvial aquifers in Bangladesh: An overview [J]. Applied Geochemistry, 2004, 19(2): 181 - 200.
- [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 Y F, SUN D J, ZHAO X H. Screening report in areas of endemic arsenism and high content of arsenic in China [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2005, 24(2): 172 - 175. (in Chinese)]
- [5] Zhang H. Heavy-metal Pollution and arseniasis in Hetao region, China [J]. Ambio, 2004, 33(3): 138 - 140.
- [6] Guo H M, Tang X H, Yang S Z, et al. Effect of indigenous bacteria on geochemical behavior of arsenic in aquifer sediments from the Hetao Basin, Inner Mongolia: Evidence from sediment incubations [J]. Applied Geochemistry, 2008, 23(12): 3267 - 3277.
- [7] Guo H M, Yang S Z, Tang X H, et al. Groundwater

- geochemistry and its implications for arsenic mobilization in shallow aquifers of the Hetao Basin, Inner Mongolia [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 393(1): 131 – 144.
- [ 8 ] 郭华明, 杨素珍, 唐小惠, 等. 内蒙古河套平原浅层高砷地下水分布及形成机理研究[J]. *水文地质工程地质*, 2008, 35(增刊1): 92 – 99. [ GUO H M, YANG S Z, TANG X H, *et al.* Distribution of high As groundwater and mechanisms of As mobilization in shallow aquifers from the Hetao basin, Inner Mongolia [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2008, 35(Sup1): 92 – 99. (in Chinese) ]
- [ 9 ] Guo H M, Zhang B, Zhang Y. Control of organic and iron colloids on arsenic partition and transport in high arsenic groundwaters in the Hetao basin, Inner Mongolia[J]. *Applied Geochemistry*, 2011, 26(3): 360 – 370.
- [10] Ni P, Guo H M, Cao Y S, *et al.* Aqueous geochemistry and its influence on the partitioning of arsenic between aquifer sediments and groundwater: a case study in the northwest of the Hetao Basin[J]. *Environ Earth Sci*, 2016, 75(4): 356.
- [11] Kim K J. Long-term disturbance of ground water chemistry follow well installation[J]. *Ground Water*, 2003, 41(6): 780 – 789.
- [12] Guo H M, Zhang Y, Xing L N, *et al.* Spatial variation in arsenic and fluoride concentrations of shallow groundwater from the Shahai town of the Hetao basin, Inner Mongolia [J]. *Applied Geochemistry*, 2012, 27(11): 2187 – 2196.
- [13] 赵焕, 王仕琴, 孔晓乐, 等. 华北低山丘陵区褚龙河流域地下水水质特征及成因分析[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(2): 17 – 24. [ ZHAO H, WANG S Q, KONG X L, *et al.* A study of the water quality characteristics and factors in the Zhulong river basin in the hilly region of North China [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(2): 17 – 24. (in Chinese) ]
- [14] O Day P A, Vlassopoulos D, Root R, *et al.* The influence of sulfur and iron on dissolved arsenic concentrations in the shallow subsurface under changing redox conditions [J]. *Proc Nat Acad Sci USA*, 2004, 101(38): 13703 – 13708.
- [15] Polizzotto M, Harvey C F, Sutton S R, *et al.* Processes conducive to the release and transport of arsenic into aquifers of Bangladesh [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2005, 102(52): 18819 – 18823.
- [16] Guo H M, Zhang B, Li Y, *et al.* Hydrogeological and biogeochemical constrains of arsenic mobilization in shallow aquifers from the Hetao basin, Inner Mongolia [J]. *Environ Pollut*, 2011, 159(4): 876 – 883.
- [17] Postma D, Jakobsen R. Redox zonation: Equilibrium constraints on the Fe ( III )/SO<sub>4</sub>-reduction interface [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60: 3169 – 3175.
- [18] Xiu W, Guo H M, Shen J X, *et al.* Stimulation of Fe ( II ) oxidation, biogenic lepidocrocite formation and arsenic immobilization by *Pseudogulbenkiania* Sp. Strain 2002 [J]. *Environ Sci Technol*, 2016, 50(12): 6449 – 6458.
- [19] 张扬, 郭华明, 贾永峰. 不同还原阶段浅水含水系统砷的释放特征: 以内蒙古河套平原为例[C]//*水文地球化学研究进展*, 2012: 156 – 166. [ ZHANG Y, GUO H M, JIA Y F. Release characteristics of arsenic in shallow water system at different reduction stages from Hetao basin, Inner Mongolia [C]//*Advances in Hydrogeochemical Researches*, 2012: 156 – 166. (in Chinese) ]
- [20] Guo H M, Jia Y F, Wanty R, *et al.* Contrasting distributions of groundwater arsenic and uranium in the western Hetao basin, Inner Mongolia: Implication for origins and fate controls [J]. *Sci Total Environ*, 2016, 541: 1172 – 1190.
- [21] 张波, 宋进喜, 曹明明. 河床沉积物中有机质对其垂向渗透系数的影响分析[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(4): 108 – 112. [ ZHANG B, SONG J X, CAO M M. Influence of organic matter on vertical hydraulic conductivity of streambed sediments [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(4): 108 – 112. (in Chinese) ]
- [22] Mladenov N, Zheng Y, Simone B, *et al.* Dissolved Organic Matter Quality in a Shallow Aquifer of Bangladesh: Implications for Arsenic Mobility [J]. *Environ Sci Technol*, 2015, 49(18): 10815 – 10824.