

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.418



卡休他他矿床地下水纳米微粒特征及意义

王彩云^{1,2}, 曹建劲^{1,2*}, 戴冬乐^{1,2}

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东广州 510275

2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东广州 510275

摘要:采集内蒙古卡休他他矿区附近的地下水微粒进行相关分析,同时也采集远离矿区的井水微粒作为对照,利用高分辨率透射电镜对这些微粒进行单颗粒纳米微粒分析,研究表明:卡休他他矿床地下水中的异常金属微粒主要为含 Fe、Cu、Zn 微粒,含 Zn、Cu 微粒原子百分含量分别可达 80.3%、22.7%,而背景区井水样品中无 Ag、Cu 微粒,且矿区地下水与成矿相关的金属元素含量大大高于井水;含金属微粒与深部矿体成分(磁铁矿、黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿等)具有很好的对应性,表明了矿区地下水含金属微粒来自于深部矿体,能携带深部矿体的信息,这为深部隐伏矿体的勘探提供了思路,也能为今后同类型的矿床勘探提供一定的参考。此外,本次研究还表明矿区附近的地下水可能受到了成矿微粒的影响,这可能也会影响到地下饮用水的品质,地下水含金属微粒研究方法也可用于检测地下饮用水的污染。

关键字:卡休他他矿床;地下水;含金属微粒;单微粒分析;饮用水污染;环境地质。

中图分类号: P66

文章编号: 1000-2383(2018)05-1650-13

收稿日期: 2017-08-27

Nanoparticles Features of Groundwater in Kaxiutata Deposit and Its Significance

Wang Caiyun^{1,2}, Cao Jianjin^{1,2*}, Dai Dongle^{1,2}

1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources Exploration, Guangzhou 510275, China

Abstract: In order to get a better understanding of the deep orebody information of Kaxiutata deposit in the Inner Mongolia, the groundwater particles were collected near the mining area. To have a contrast, the well water particles away from the mining area were also collected. It is found that the samples of groundwater in the mining area contain metal particles, and a high resolution transmission electron microscope was used to study these metal-bearing nanoparticles. The anomalous metal particles in the groundwater of this deposit are mainly Fe, Cu and Zn particles. The contents of Zn and Cu particles in the groundwater of the deposit are up to 80.3% and 22.7% respectively, and there are no Ag, Cu particles in the well samples in the background area, and the metal elements in the mining area are much higher than those in the well water. Metal-bearing nanoparticles and deep orebody (magnetite, pyrite, sphalerite, yellow copper ore, etc.) have a good correspondence. It is also proved that the groundwater containing metal particles from the deep orebody can carry the information of the deep orebody, which provides both a new perspective for the exploration of the deep concealed orebody and reference for the future exploration of the same type of deposit as well. In addition, the study also shows that the groundwater near the mining area may be affected by ore-forming particles, which may also affect the quality of underground drinking water, and the research method of groundwater containing metal particles can also be used to detect contamination of underground drinking water.

Key words: Kaxiutata deposit; groundwater; containing metal particle; single particle analysis; drinking water pollution; environmental geology.

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos.41030425,41473040,41072263).

作者简介:王彩云(1993-),女,硕士生,地质学专业. ORCID: 0000-0002-1432-9996. E-mail: 875159872@qq.com

*** 通讯作者:**曹建劲, ORCID: 0000-0001-9622-2780. E-mail: eesjj@mail.sysu.edu.cn

引用格式:王彩云,曹建劲,戴冬乐,2018.卡休他他矿床地下水纳米微粒特征及意义.地球科学,43(5): 1650-1662.

0 引言

随着社会的不断进步与科学研究技术水平的不断提高,地球矿床资源作为各科学领域的基础,已经达到了高度开发利用的状态.浅部地下矿体的勘探技术手段已经十分成熟,但浅部地下矿体的资源有限,可供开采的矿产资源日益短缺,这就需要我们进一步寻找、勘探地下深部的隐伏矿体,以满足社会日益增长的矿产资源需求.

对于深部隐伏矿体的勘探研究这一重大科学难题,前人做出了许多努力和尝试.使用地球物理方法(许东青等, 2006a; 袁桂琴等, 2010; 刘彦等, 2012; 时永志和李凯成, 2014; 李星等, 2015)研究深部隐伏岩体在近几年来取得了一些成果,包括借助重力异常(刘彦等, 2012)、磁法(许东青等, 2006b)、电法等研究手段来勘探深部岩体;地球化学方法包括土壤地球化学(王学求和谢学锦, 2000; 张爽等, 2012)、生物地球化学(胡西顺等, 1993)、水文地球化学(Ramesh *et al.*, 1995; Chen *et al.*, 2007)等方法.特别地,水文地球化学通过测定研究区附近的水中的元素含量特征来研究深部隐伏矿体,前人的研究表明,矿体与水介质存在着物质交换(Edmunds and Smedley, 2000),信息可以从深部携带上来,通过水介质来分析研究深部矿体特征取得了较好的效果.

常规的水文地球化学是通过测量元素含量来反映致矿异常,包括主微量元素、同位素等.而测定结果受较多因素影响,如生物介质、环境的 pH 值(Hochella *et al.*, 1999; 杜尧等, 2017)、环境的氧化还原条件(周帆等, 2017)等,对深部隐伏矿体的判断存在一定的误差.Li *et al.*(2016)通过透射电镜研究内蒙古东升庙矿区地下水中的纳米微粒,证明了地下矿体产生大量的纳米或接近纳米级微粒在地下水流经区域,能够被地下水搬运至地表.

本文选取内蒙古卡休他他铁矿床为研究区,选择离矿区 SSE 方向 13 km 左右的区域为背景区,分别采集了矿区深部地下水中的微粒样品和背景区井水的微粒样品,进行对比分析.利用高分辨率透射电镜分析矿区地下水中单颗粒纳米微粒的特征(包括形貌特征、成分、结构、晶体特征、含量特征等),发现矿区地下水中存在较多的含金属微粒,并讨论了地下水中含金属微粒的含矿性,探讨了通过地下水中的含金属微粒找隐伏矿体的可行性、地下水含金属微粒研究方法应用于检测地下饮用水污染、以及金

属微粒对地下饮用水安全可能产生的影响.

1 研究区地质背景

卡休他他铁矿床位于内蒙古自治区阿拉善盟右旗,该区域大地构造位置上位于华北克拉通西部的阿拉善地块,区内主要构造单元为 NW-SE 向的北大山杂岩带、龙首山杂岩带及潮水盆地,该区为第四系风成砂所覆盖,在地貌上呈沙漠景观(许东青等, 2006a, 2006b; 赖新荣, 2007; 宫江华等, 2012; 高洪雷等, 2013; 史兴俊等, 2014; 王东升等, 2016).

矿区内广泛出露第四系风成砂(图 1),约占全区总面积的 2/3,矿区包括南北两个矿带,北矿带一般厚 25~40 m,主要矿体为 3 号矿体,呈东西向分布于 3~16 号勘探线之间,总长约 1 300 m,呈透镜状赋存于砂卡岩带中;南矿带一般厚为 2~10 m,南矿带最大矿体为 22 号矿体,呈似层状产于透辉石砂卡岩内(许东青等, 2006a).矿区内的主要构造有近 EW 向的断裂破碎带和 NE 向断裂;卡休他他部分矿体为地下隐伏矿体,采矿勘测工程表明,在矿体埋藏的深度上,有地下水存在.

研究区内岩性以千枚岩和云母石英片岩为主,还有少量黑云母斜长片麻岩、石英岩、混合岩等(许东青, 2006a).矿区主要经济矿产为含铁矿石,铁矿石中主要金属矿物为磁铁矿,半自形粒状结构;其他金属矿物主要有磁黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、钴毒砂、辉钴矿、斜方砷钴矿等,还有极少量的自然金、自然铋和辉铋矿;脉石矿物主要为砂卡岩类矿物如透辉石、阳起石和石榴石等(许东青等, 2006b).矿体围岩的主要岩性为海西期辉长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、石英正长岩、花岗斑岩等,局部相变为辉绿岩,呈近东西向展布;围岩的主要矿物组合以辉石、斜长石为主,含少量磁黄铁矿、黄铜矿和黄铁矿等.卡休他他矿床的磁铁矿体多伴生有钴、镓、铜富集体,矿石多为微粒状结构,具致密块状、脉状及角砾状等构造,矿石中伴生有益组分有 Co、Cu、Ga,有害元素有 S、P 等.

根据张竞等(2015)对阿拉善右旗地区水文地质条件开展的研究,表明研究区附近覆盖在第四系之下的新近系和白垩系砂岩含水层分布广,厚度普遍大于 1 000 m,且断层并不阻水,研究区的地下水流具有很好的连续性.在研究区采集的地下水是在矿区通道顶部流动的地下水,未受到矿体污染,理论上,在此地采集的地下水能够反映研究区的地质信

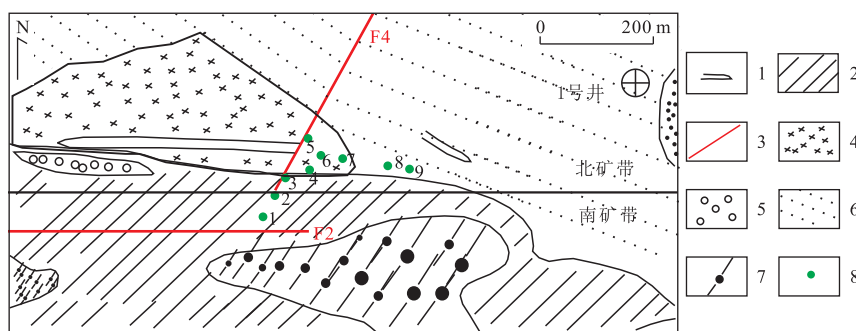


图 1 内蒙古卡休他他矿区地质图及采样位置

Fig.1 Geological map and sampling location of Kaxiutata mining area, Inner Mongolia

据矿区内部资料及赖新荣(2007).1.矿体;2.岩性分界线;3.断层;4.二长花岗岩;5.辉长岩;6.震旦系千枚岩;7.二长花岗岩;8.矿区地下水样采样点

息,具有可行性.

2 采样及分析方法

2.1 采样与样品处理

在卡休他他矿区 1030 水平巷道中采集了井下巷道壁裂隙渗出的地下水样品,同时也采集了矿区外的背景区不同深度水井中的样品,共采集了 9 个地下水样品和 3 个井水样品.9 个井下地下水样品采集于卡休他他矿区 1030(约 270 m 深)中段的巷道顶部的裂隙水,采样点的位置如图 1. 3 个井水样品采集于矿区 SSE 方向 13 km 处的 3 口水井中,采样点未受矿区成矿影响,深度分别为 140 m、120 m 和 6 m.采集到的地下水样品和井水样品清澈不浑浊,看不到明显的悬浮物.

我们使用容量为 500 mL 聚乙烯瓶放置于裂隙水渗出的位置,先装少量地下水,涮洗聚乙烯瓶一次,然后装满 400 mL 以上,盖上瓶盖密封储存.井水采集于矿区以南的 3 口井中,深度分别为 140 m、120 m 和 6 m.3 口井都有抽水设备,并安装了水龙头,在采样前先放水约 1 min,然后用井水涮洗瓶子,再用聚乙烯瓶装水约 400 mL 并密封好.地下水和井水样品保存温度约为 5~15 °C.

制样过程如下:把透射电镜载网放置在干净滤纸上,然后使用高纯水洗净的滴管,取水样滴 4~5 滴在载网上.等滤纸吸干液滴,载网上看不到液体之后,将滤纸和载网置于红外灯下烘干,干燥好的样品放入透射电镜载网盒储存备用,样品制作选用碳膜镍网.

2.2 样品分析

透射电镜分析测试在扬州大学分析测试中心进行,使用 Tecnai G2 F30S-TWIN 场发射透射电镜.

最高放大倍数:TEM 100 万倍;STEM 230 万倍;最高加速电压:300 kV;点分辨率:0.20 nm;线分辨率:0.102 nm;STEM HAADF 分辨率:0.17 nm.

3 实验分析结果

本文共有 12 个样品(其中矿区地下水 9 个,背景区井水 3 个)参与分析且结果有效,研究表明矿区附近的地下水中确实有含金属微粒存在,背景区井水中也有少量含金属微粒.镜下观察到的微粒尺寸变化范围较大,从几百纳米到数微米的微粒都有.样品中存在大量的盐类微粒,如氯化钠、碳酸钙、硫酸钙、硫酸钡微粒等,基本代表了深部水样的组成.与成矿有关的微粒主要为含 Fe、Cu、Zn 等元素的微粒(分析结果见表 1、表 2、表 3).

3.1 矿区地下水中的纳米微粒

内蒙古卡休他他矿区地下水样品的特征是可溶性盐微粒数量非常多,如 NaCl、CaCO₃、CaSO₄ 等.除可溶性盐类,样品中也发现了大量的硅酸盐类微粒,如图 3 中的微粒,通常这些微粒结晶度非常高,且成群出现.地下水中还发现了含金属微粒,主要为含 Fe、Zn、Cu 微粒.这些含金属微粒大部分以氧化物的形式存在.选取典型微粒进行如下分析.

3.1.1 含钙微粒 含钙微粒在采集的样品中共有 2 类,分别为样品 B4-3-0002 中的硫酸钙微粒和样品 B3-1-0001 中的碳酸钙微粒.如图 2a 微粒来自样品 B4-3-0002,该微粒呈不规则长条形,衬度中等,微粒大小约 1.5×0.5 nm,EDS 分析结果显示该微粒仅含 O(79.2%)、S(8.2%)、Ca(12.7%) 3 种元素(表 1),且 S 和 Ca 的原子百分含量比值接近 1,从高分辨照片上量得的晶格间距为 2.69×10⁻¹⁰ m 和 2.27×10⁻¹⁰ m,符合石膏的 PDF 卡片值.结合微粒

表1 内蒙古卡休他他矿区地下水(270 m深)纳米微粒(微粒1~22)EDS分析数据(%)

元素	纳米微粒号-样品编号																					
	1-B4	2-B3	3-B5	4-B5	5-B4	6-A5	7-A3	8-B5	9-B3	10-B5	11-C2	12-A3	13-A3	14-A3	15-A3	16-A4	17-A4	18-A4	19-A4	20-A5	21-A5	22-A5
Ow	79.2	79.6	45.5	49.8	65.3	68.4	24.6	69.1	63.0	14.5	72.5	32.4	70.4	68.7	61.1	62.8	29.7	40.4	67.6	6.7	62.0	70.2
Oa	89.7	90.0	61.2	84.3	75.4	85.4	51.1	88.6	82.8	36.2	88.8	44.7	87.7	80.6	74.5	83.6	58.7	64.1	78.4	19.5	82.1	88.8
Stw		1.8	29.9		16.3	4.2	3.1		13.9	2.2		0.8	5.1		12.6	4.7	2.7	6.5	14.3	0.5	1.6	
Sia		1.2	22.9		10.7	3.0	3.7		10.4	3.1		0.6	3.6		8.8	3.5	3.0	5.9	9.5	0.9	1.2	
Alw		0.5	9.4												8.3			2.9	6.9	0.1		
Ala		0.3	7.5												6.0			2.7	4.8	0.2		
Few		0.6			0.1		23.8	30.9		55.8	1.0		24.5		6.4	30.1	53.6	6.1	0.4	86.3		24.7
Fea		0.2			0.0		14.2	11.4		40.0	0.3		8.7		2.2	11.5	30.3	2.8	0.1	72.0		9.0
Ca _w	12.7	16.2			0.1	3.6	4.6					3.1		10.6		0.7	0.7		3.5	6.3	2.0	
Ca _a	5.7	7.3			0.0	1.8	3.8					1.7		5.0		0.4	0.5		1.6	7.3	1.0	
Na _w		0.5							0.9			38.3		9.9	5.4				1.3	6.1		
Na _a		0.4							0.9			36.7		8.1	4.6			1.5	5.0			
K _w			15.2																			
K _a			8.4																			
Mg _w		0.6			18.2		2.3					1.1		0.7	3.1		0.6				3.4	
Mg _a		0.5			13.8		3.1					1.0		0.5	2.5		0.8				2.9	
Sw	8.2			8.2		3.2						2.5		8.2		0.9		1.0			2.4	
Sa	4.6			7.0		2.0						1.7		4.8		0.6		0.6			1.6	
Cl _w		0.2				5.4	6.1		4.0			21.8		1.8	1.6		0.5	1.3			6.0	1.4
Cl _a		0.1				3.0	5.7		2.4			13.5		1.0	0.9		0.4	0.9			3.6	0.8
K _w															0.4		0.7		0.1			
K _a															0.2		0.5		0.1			
Mn _w							2.3			13.1					0.8		1.0					
Mn _a							1.4			9.5					0.3		0.6					
Pb _w																						
Pb _a																						
Zn _w				2.0			33.2										10.5				22.7	
Zn _a				0.8			16.9										5.1				7.6	
Cu _w						15.3																
Cu _a						4.8																
Ag _w									18.2													
Ag _a									3.5													3.7
Cr _w										14.5												1.4
Cr _a										11.2												
Ba _w																						
Ba _a				40.0																		
Ti _w				7.9							26.5											40.1
Ti _a											10.9											21.3

注:下标中:W.Weight,质量;A.Atomic,原子。

表 2 内蒙古卡休他他矿区地下水(270 m 深)纳米微粒(微粒 23~43)EDS 分析数据(%)
Table 2 Data for EDS analysis of particles (particles 23-43) in underground water of Kaxiutata mine, Inner Mongolia, at a depth of 270 m (%)

元素	纳米微粒号—样品编号																				
	23-B2	24-B2	25-B2	26-B3	27-B3	28-B3	29-B4	30-B4	31-B5	32-B5	33-B5	34-B5	35-B5	36-B5	37-C1	38-C1	39-C1	40-C1	41-C1	42-C2	43-C2
Ow	72.3	20.6	61.1	62.7	66.5	66.4	74.5	62.7	7.9	19.7	11.2	71.1	83.0	62.1	69.7	61.3	68.6	61.6	75.1	55.1	68.0
Oa	87.5	47.5	84.3	77.3	78.6	79.4	84.9	74.1	25.4	50.1	29.9	82	92.5	84.7	82.7	84.3	84.2	81.7	85.4	70.6	79.2
Siw	3.6		2.2		10.2		0.6	18.3		1.8				2.9	9.3	3.8	5.2	2.8	3.0	3.0	13.1
SiA	2.5		1.7		7.0		0.3	12.3		2.8				2.3	6.3	3.0	3.7	2.1	2.1	2.2	8.7
Alw	4.3				2.7		6.7							0.8	3.8	0.5					5.3
AlA	3.1				1.9		4.7							0.6	2.7	0.4					3.7
Few	19.2	79.4	25.4			9.6	0.4	1.6	2.0	68.4				22.1	2.0	29.2	0.8	29.6			3.4
FeA	6.6	52.5	10			3.3	0.1	0.6	3.7	52.2				8.6	0.7	11.5	0.3	11.3			1.1
CaW	0.3		1.0	15.8	9.1	0.5	9.0	0.3	1.6			8.9	17	0.4	12.5		1.2	1.1	10.0	17.5	0.7
CaA	0.2		0.5	7.8	4.3	0.2	4.1	0.2	4.2			4.1	7.5	0.2	5.9		0.6	0.6	4.5	9.0	0.3
NaW				7.8	12.9	3.2	7.6	9.6				10.9			1.0		6.5	4.0	7.4	8.2	2.0
NaA				6.7	10.6	2.7	6.0	7.9				8.8			0.9		5.6	3.7	5.8	7.3	1.6
Kw																					
KA						6.3														3.1	6.4
Mgw						5.0														2.6	4.9
MgA																					
Sw	0.3		0.7	13	6.9	0.4	7.9					8.1		1.5	0.3		5.6	0.6	7.5	13.0	0.5
SA	0.2		0.5	8.0	4.1	0.2	4.5					4.7		1.0	0.2		3.5	0.4	4.3	8.3	0.3
Clw				0.4	4.6	0.5						1.0			0.2		1.0	0.4			0.2
ClA				0.2	2.4	0.3						0.5			0.1		0.5	0.2			0.1
Kw															1.2						0.5
KA															0.6						0.2
Mnw								0.3													
MnA								0.1													
Pbw																					
PbA																					
Znw			1.1							80.3											
ZnA			0.4							49.9				1.8							
Cuw			3.5											0.6							
CuA			1.2											3.6							
Agw														1.2							
AgA																					
Crw																					
CrA																					
Strw				0.3																	
StrA				0.1																	
Snw			2.2																		
SnA			0.4																		
Sbw																					
SbA			1.7																		
Zrw			0.4																		
ZrA																					
Baw									88.5												9.9
BaA									66.7												1.4
Tiw			1.2																		
TiA			0.6																		

注：下标中：W.Weight,质量；A.Atomic,原子。

表 3 背景区井水中纳米微粒 EDS 分析数据 (%)

Table 3 Data for EDS analysis of nanoparticles in well water in background area (%)

元素	纳米微粒号—样品编号														
	44-C3	45-C4	46-C5	47-C4	48-C4	49-C5	50-C5	51-C4	52-C4	53-C3	54-C3	55-C3	56-C3	57-C3	
O _w	61.4	71.6	72.0	74.2	70.2	12.8	50.9	73.8	68.1	71.0	72.0	71.6	68.9	56.7	
O _A	74.9	84.8	89.7	91.0	89.0	32.9	85.8	90.4	87.0	85.1	89.7	84.8	85.9	79.7	
Si _w	1.4	14.0	4.1			2.5		4.9	2.1	10.8	4.1	14.0	4.6	0.8	
Si _A	1.0	9.4	2.9			3.6		3.4	1.5	7.3	2.9	9.4	3.3	0.6	
Al _w	10.5	0.7								2.5		0.7			
Al _A	7.6	0.5								1.8		0.5			
Fe _w	10.0	10.0	0.5	25.8		56.1			25.6	12.9	0.5	10.0	19.8	36.4	
Fe _A	3.5	3.4	0.2	9.0		41.3			9.4	4.4	0.2	3.4	7.1	14.6	
Ca _w	0.5	0.6							0.5	2.1		0.6	2.1		
Ca _A	0.2	0.3							0.2	1.0		0.3	1.1		
Na:w													1.1	4.6	
Na _A													0.9	4.5	
K _w		0.7										0.7			
K _A		0.3										0.3			
Zn _w									1.6				0.4	1.1	
Zn _A									0.5				0.1	0.4	
Mg _w	15.8	0.8							1.1			0.8	0.5		
Mg	12.7	0.7							0.9			0.7	0.4		
P _w													0.4		
P _A													0.3		
S _w		0.1	7.8				7.1	6.8	0.1		7.8	0.1	0.2		
S _A		0.1	4.8				6.0	4.2	0.1		4.8	0.1	0.1		
Cl _w		0.4							0.2	0.8		0.4	0.3		
Cl _A		0.2							0.1	0.4		0.2	0.2		
Mn _w	0.4	0.8			29.8	13.0						0.8		0.4	
Mn _A	0.1	0.3			11.0	9.7						0.3		0.2	
Cr _w						15.7			0.7				1.6		
Cr _A						12.4			0.3				0.6		
Ba _w			14.5				42.0	14.5			14.5				
Ba _A			2.1				8.2	2.1			2.1				
Ti _w		0.3											0.3		
Ti _A		0.1											0.1		
Sr _w			1.1								1.1				
Sr _A			0.2								0.2				

注:下标中:W.Weight,质量;A.Atomic,原子.

呈长条状(针状、纤维状)的特征,可以认为这些微粒的主要成分为 CaSO₄.

图 2b 微粒来自样品 B3-1-0001,该微粒呈方形,衬度中等,微粒大小约 200×250 nm,EDS 能谱分析显示该微粒主要元素为 O(79.6%)、Ca(16.2%),含少量的 Si(1.8%)、Mg(0.6%)、Fe(0.6%)等元素,该微粒的选区衍射花样照片显示其为结晶良好的单晶,且晶形较完整.根据元素百分含量特征推测该微粒的主要成分为 CaCO₃.

3.1.2 钾长石微粒 图 2c 微粒来自样品 B5-3-0002,该微粒呈不规则圆形,衬度较高,微粒大小约 200×400 nm,直径达 1.5 μm.EDS 能谱分析显示该微粒主要元素为 O(45.5%)、Si(29.9%)、

K(15.2%)、Al(9.4%).该微粒的选区衍射花样图显示其为结晶良好的单晶,且晶形较完整.微粒中 Si、Al、K 的原子百分含量比值接近 3:1:1,与钾长石元素组成一致.选区衍射花样显示其为单晶,高分辨照片中量得 2 组晶格间距分别为:3.67×10⁻¹⁰ m 和 3.45×10⁻¹⁰ m,对比 PDF 卡片,该微粒可能为钾长石微粒.

3.1.3 BaSO₄ 微粒 图 2d 微粒来自样品 B5-6-0002,该微粒呈不规则球形,衬度较高,微粒大小约 400×600 nm,EDS 分析显示该微粒主要元素为 O(49.8%)、Ba(40.0%)、S(8.2%),极少量的 Zn(2.0%)元素.该微粒的选区衍射花样照片显示其为结晶良好的单晶,且晶形较完整.根据元素百分含量

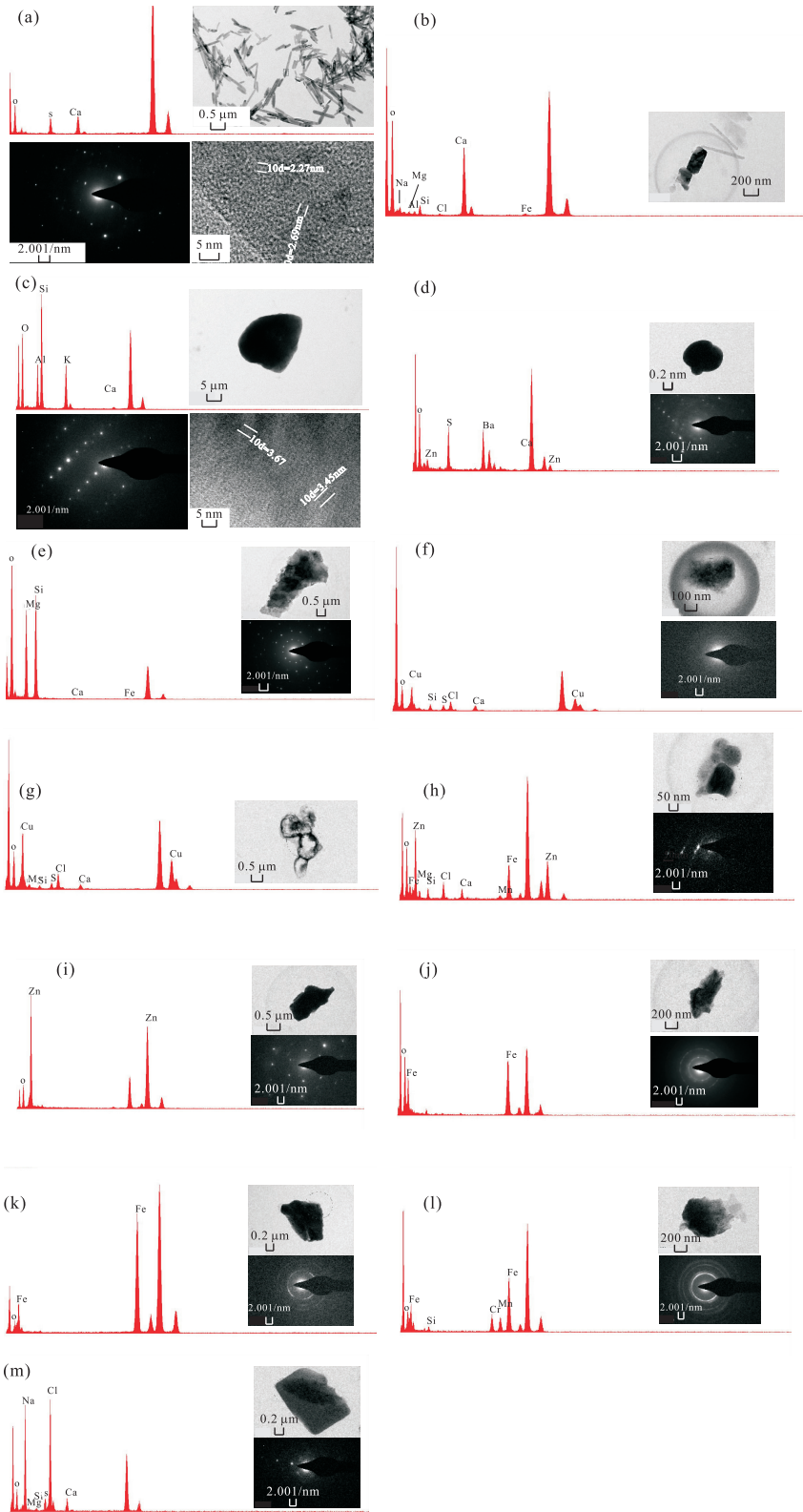


图 2 卡休他他矿区地下水纳米微粒群的(a)EDS 分析结果、(b)TEM 高分辨率透射照片、(c)选区衍射图片、(d)高分辨照片
 Fig.2 The nanoparticles of the groundwater in Kaxituta mining area: (a) EDS analysis results, (b) TEM high-resolution transmission photographs, (c) selection diffraction pictures, (d) high-resolution photographs
 a. CaSO_4 纳米微粒; b. CaCO_3 纳米微粒; c. 钾长石纳米微粒; d. BaSO_4 纳米微粒; e. 含 Mg 纳米微粒; f, g. 含 Cu 纳米微粒; h, i. 含 Zn 纳米微粒; j, k. 含 Fe 纳米微粒; l. 含 Fe-Cr-Mn 纳米微粒; m. NaCl 纳米微粒

特征推测该微粒的主要成分为 BaSO_4 。

3.1.4 含 Mg 微粒 图 2e 微粒来自样品 B4-2-0001, 该微粒呈不规则阴影状, 衬度不均匀, 微粒大小数微米, EDS 分析显示该微粒主要元素为 O(65.3%)、Mg(18.2%)、Si(16.3%), 含极少量的 Ca(0.1%)、Fe(0.1%) 元素。该微粒的选区衍射花样照片显示其为一个结晶良好的单晶体, 且晶形较完整。根据该微粒的元素百分含量特征, 结合 Si 和 Mg 的原子比值接近 1:1, 推测该微粒主要成分可能为 MgSiO_3 。

3.1.5 含铜微粒 图 2f 微粒来自样品 A5-2-0001, 该微粒呈不规则雾状, 衬度不均匀, 微粒大小约 $600 \times 800 \text{ nm}$, EDS 能谱分析显示该微粒主要元素为 O(68.4%)、Cu(15.3%)、Cl(5.4%)、Si(4.2%), 含少量的 Ca(3.6%)、S(3.2%) 元素。选区衍射花样照片显示其为结晶程度较低, 元素百分含量显示该微粒主要成分为含 Cu 的氧化物。微粒中衬度较深的絮状物质应为 Cu 化合物。

图 2g 微粒来自样品 A5-3, 该微粒呈不规则絮状, 衬度不均匀, 微粒大小约微米级, EDS 分析显示该微粒主要元素为 O(62.0%)、Cu(22.7%)、Cl(6.0%)、Mg(3.4%), 含少量的 S(2.4%)、Ca(2.0%)、Si(1.6%) 元素。该微粒的元素百分含量显示该微粒主要成分为含 Cu 的氧化物。

3.1.6 含 Zn 微粒 图 2h 微粒来自样品 A3-3-0002, 该微粒呈不规则聚集体, 衬度不均匀, 微粒大小约 $200 \times 400 \text{ nm}$, EDS 分析显示该微粒主要元素为 Zn(33.2%)、O(24.6%)、Fe(23.8%)、Cl(6.1%), 含少量的 Ca(4.6%)、Si(3.1%)、Mg(2.3%)、Mn(2.3%) 元素。该微粒的选区衍射花样照片显示其结晶程度中等。该微粒为含 Zn 氧化物微粒。

图 2i 微粒来自样品 B5-2, 该微粒呈不规则形, 衬度较高, EDS 分析显示该微粒仅含 Zn(80.3%)、O(19.7%) 元素。该微粒的选区衍射花样照片显示其结晶程度中等。该微粒的元素百分含量显示该微粒为 ZnO 微粒。

3.1.7 含铁微粒 图 2j 微粒来自样品 B5-10-0002, 该微粒呈不规则形, 衬度不均匀, 微粒大小约 $250 \times 600 \text{ nm}$, EDS 分析显示该微粒只含 O(69.1%)、Fe(30.9%) 元素。该微粒的选区衍射花样照片显示其为结晶良好的单晶, 且晶形较完整。该微粒的元素百分含量显示该微粒为氧化铁微粒。

图 2k 微粒来自样品 B2-2, 该微粒呈不规则形, 衬度不均匀, 微粒大小约 $400 \times 800 \text{ nm}$, EDS 分析显

示该微粒只含 O(20.6%)、Fe(79.4%) 元素。该微粒的选区衍射花样照片显示其为结晶良好的单晶, 且晶形较完整。该微粒的元素百分含量显示为氧化铁微粒。

3.1.8 含 Fe-Cr-Mn 微粒 图 2l 微粒来自样品 B5-8-0002, 该微粒呈不规则圆形, 衬度不均匀, 微粒大小数微米, EDS 分析结果显示该微粒含 Fe(55.8%)、Cr(14.5%)、O(14.5%)、Mn(13.1%), 少量的 Si(2.2%) 元素。选区衍射花样照片显示该微粒为多晶, 推测该微粒主要成分为含 Fe、Cr、Mn 的氧化物, 较大的含铁氧化物微粒与较细小的其他微粒共同组成此微粒。

3.1.9 NaCl 微粒 图 2m 微粒来自样品 A3-3-001, 该微粒呈不规则片状, 衬度较高, 微粒大小约 $2 \times 4 \mu\text{m}$, EDS 能谱分析显示该微粒主要元素为 Na(38.3%)、O(32.4%)、Cl(21.8%), 以及少量的 Ca(3.1%)、S(2.5%)、Mg(1.1%)。该微粒的选区衍射花样照片显示其为结晶程度一般。微粒中 Na、Cl 的原子百分含量比值接近 1:1, 可以确定该微粒的主要成分为 NaCl。

3.2 背景区井水中的纳米微粒

背景区井水样品主要含有硅酸盐、硫酸钡以及其他可溶性盐。含金属微粒主要为含 Fe、Mn、Cr 微粒, 样品中没有发现含 Cu、Ag 的微粒, 仅个别含 Zn 的微粒, Zn 元素在微粒中的原子百分含量为 0.5%。选取部分典型微粒进行如下分析。

3.2.1 含 Al-Fe-Mg 微粒 图 3a 微粒来自样品 C3-5-0001, 该微粒呈不规则方形, 衬度不均匀, 微粒大小约 $250 \times 250 \text{ nm}$, EDS 分析结果显示该微粒含 O(61.4%)、Mg(15.8%)、Al(10.5%)、Fe(10.0%) 以及少量的 Si(1.4%)、Ca(0.5%) 等元素。选区衍射花样照片显示该微粒为多晶, 推测该微粒主要成分为含 Fe、Al、Mg 的氧化物, 较大的含镁化合物微粒与较细小的其他微粒共同组成此微粒。

3.2.2 含铁微粒 图 3b 微粒来自样品 C3-3-0001, 该微粒近圆球形, 由多个小球形组成, 衬度不均匀, 微粒大小约 $100 \times 150 \text{ nm}$, EDS 分析显示该微粒含 O(71.6%)、Si(14.0%)、Fe(10.0%), 含有少量的 Mn(0.8%)、Mg(0.8%)、Al(0.7%)、K(0.7%)、Ca(0.6%) 等元素。该微粒的选区衍射花样照片显示其结晶程度较好。根据该微粒的元素百分含量特征推测该微粒主要成分为硅酸铁, 微粒可能由硅酸铁和其他元素的氧化物共同组成。

图 3c 微粒来自样品 C4-3-0001, 该微粒近圆球

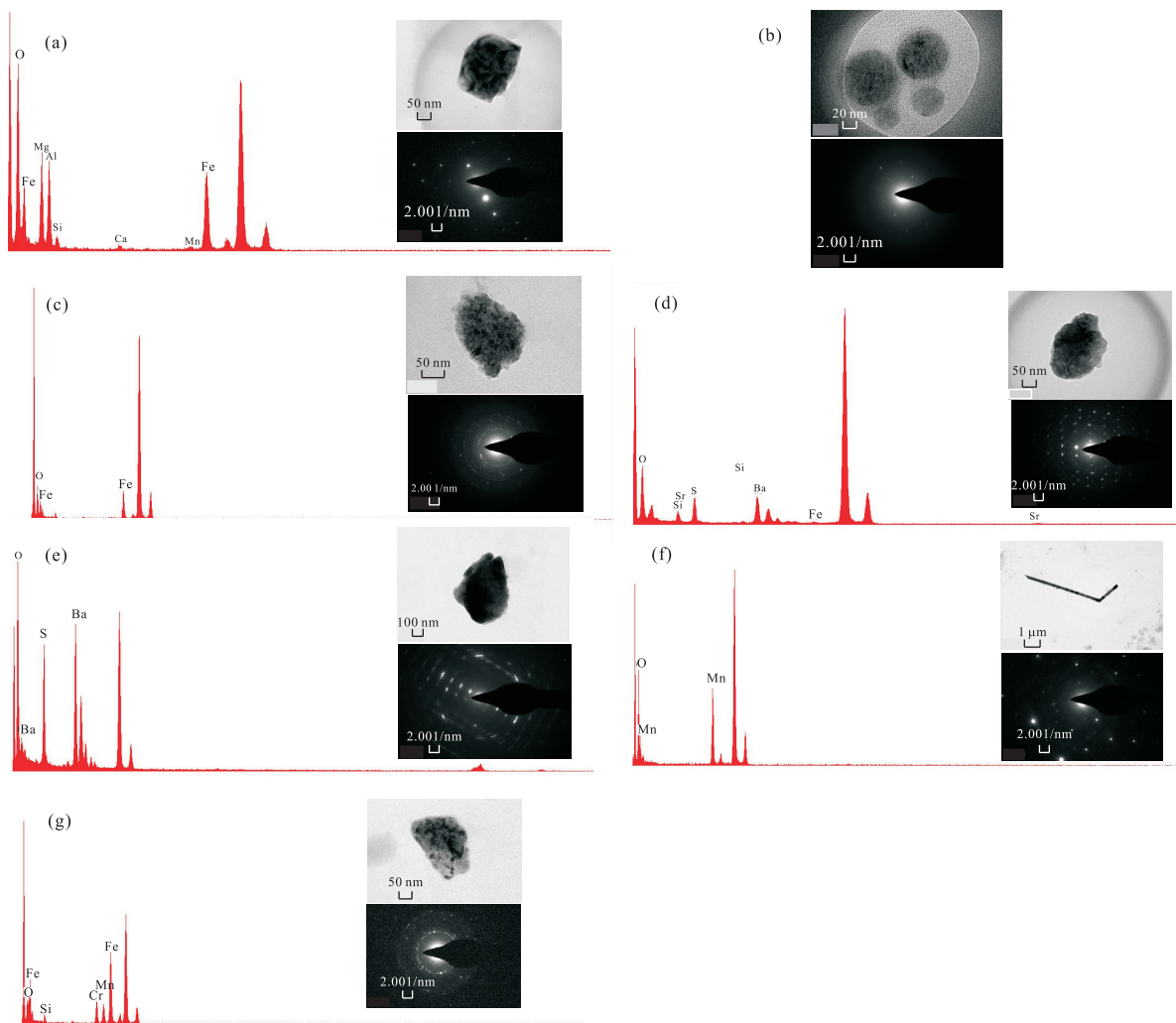


图 3 卡休他他背景区地下水纳米微粒的(a)EDS 分析结果、(b)TEM 高分辨率透射照片、(c)选区衍射图片

Fig.3 Nanoparticles contained in groundwater in background area: (a) EDS analysis results, (b) TEM high-resolution transmission photographs, (c) selection diffraction pictures

a. 含 Al-Fe-Mg 纳米微粒; b. 含 Fe 纳米微粒; c. 氧化铁纳米微粒; d, e. BaSO_4 纳米微粒; f. MnO_2 纳米微粒; g. Fe-Cr-Mn 纳米微粒

形, 衬度不均匀, 微粒大小约 $200 \times 550 \text{ nm}$, EDS 能谱分析显示该微粒只含 O(74.2%)、Fe(25.8%) 元素. 该微粒的选区衍射花样照片显示其结晶程度较好. 根据元素百分含量特征判断该微粒主要成分为氧化铁.

3.2.3 BaSO_4 微粒 图 3d 微粒来自样品 C3-2-0002, 该微粒近不规则球形, 衬度不均匀, 微粒大小约 $400 \times 600 \text{ nm}$, EDS 能谱分析显示该微粒主要元素为 O(72.0%)、Ba(14.5%)、S(7.8%), 少量的 Si(4.1%)、Sr(1.1%)、Fe(0.5%) 元素. 该微粒的选区衍射花样照片显示其为结晶程度较好. 根据元素百分含量特征推测该微粒的主要成分为 BaSO_4 .

图 3e 微粒来自样品 C5-3-0001, 该微粒呈不规

则状, 衬度较高, 微粒大小约 $500 \times 700 \text{ nm}$, EDS 分析显示该微粒只含 O(50.9%)、Ba(42.0%)、S(7.1%) 元素. 该微粒的选区衍射花样照片显示其为结晶良好的单晶, 且晶形较完整. 根据元素百分含量特征判断该微粒的主要成分为 BaSO_4 .

3.2.4 MnO_2 微粒 图 3f 微粒来自样品 C4-5-0001, 该微粒呈长柱形, 衬度较高, EDS 分析结果显示该微粒只含 O(70.2%)、Mn(29.8%). 选区衍射花样照片显示该微粒结晶程度较好, 根据元素百分含量特征判断该微粒主要成分为二氧化锰.

3.2.5 Fe-Cr-Mn 微粒 图 3g 微粒来自样品 C5-2-0001, 该微粒呈不规则方形, 衬度不均匀, 微粒大小数微米, EDS 分析结果显示该微粒含

Fe(56.1%)、Cr(15.7%)、Mn(13.0%)、O(12.8%)，少量的Si(2.5%)元素。选区衍射花样照片显示该微粒为多晶，推测该微粒主要成分为含Fe、Cr、Mn的氧化物，较大的含铁氧化物微粒与较细小的其他微粒共同组成此微粒。

4 讨论

4.1 矿区地下水与背景区井水中的微粒特征对比

如表1和表2所示，TEM分析结果显示，矿区附近地下水中存在含金属微粒，与背景区井水样品中含金属微粒在含量与种类上有所差异。二者微粒的共同点是：微粒普遍为纳米或接近纳米级，微粒的形态多不规则，有六边形、菱形、圆形、絮状及多边形，发现的含金属微粒几乎全是微粒集合体。

矿区地下水中发现的微粒含深部成矿金属元素Fe、Cu、Zn和非成矿金属元素Ti、Cr、Mn、Ag，深部成矿金属元素微粒的主要存在形式为氧化物。Fe、Mn、Cr往往赋存于同一个微粒中，如微粒10中的Fe-Mn-Cr-Ti微粒；从微粒7中可以看出，地下水样品中Fe在微粒中的含量一般要远高于Mn、Cr和Ti；Mn、Cr和Ti的含量与Fe的含量在一定程度上呈正相关关系，但微粒11例外。含Cu微粒共4个，从元素组合特征来看，Cu多与S、Fe、Zn等元素赋存于同一微粒中，如微粒36；从表1、表2中可以看出，Cu元素在微粒中百分含量差别较大，反映深部矿体铜矿化可能不均匀。含Zn微粒，特别是微粒7，含锌达33%，从元素组合特征来看，除了微粒32外，几乎所有微粒中的Zn元素都倾向与Fe元素赋存在同一个微粒中，表明深部岩体可能存在铁-锌矿化，含Zn微粒能够反映深部矿体特征。结合矿区微粒中非金属元素特征来看，如微粒1、2、13主要成分均为钙盐类，它可能来自于长石，微粒5、14主要成分为硅酸镁，它可能来自于富镁云母，微粒3、14主要成分为含钾硅酸盐，可能来自于钾长石，表明这些微粒主要来源于富钙、镁的硅酸盐、长石等矿物；再根据矿区地质图及基础地质报告，卡休他他矿区围岩主要为砂卡岩和千枚岩，反映矿区地下水中的纳米微粒对矿体围岩也有一定的继承性。

背景区深部井水微粒中含金属微粒主要为含Fe、Cr、Mn、Al微粒，Fe-Mn-Cr关系基本与矿区地下水相一致。在井水样品中未见Cu、Ti元素。微粒15为所有样品中唯一含Mn缺Fe的微粒，且井水中含Fe的微粒含量较高的有微粒14(25.8%)和微粒

16(56.1%)，这说明浅部井水中的Mn元素局部富集程度高于深部井水中的Mn元素；总的来看，背景区井水中微粒含金属性低于矿区。从微粒的含矿性上反映出，背景区井水中的含金属纳米微粒金属元素含量较低，矿化不明显。

4.2 矿区地下水微粒与矿体的关系

本次研究发现在矿区附近地下水含Fe、Zn、Cu等金属元素微粒，而背景区井水中并不含或很少含有这类微粒。矿区地下水微粒特征反映其深部的矿体主要为富铁、铜、锌矿矿体，而含其他金属矿物的较少，在矿区地下水微粒中发现的含Ag等贵金属的微粒也未见于背景区井水中。根据前人研究的成果(许东青等，2006b)，研究区矿体除了主要矿石矿物磁铁矿外，还包括黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿等矿物，也就是说含Fe、Cu、Zn、Cr等金属元素的微粒主要来自深部矿体；这些来自深部的微粒能在地下水中进行迁移，由于水中富氧，成矿元素在形成微粒或微粒迁移过程中被氧化，导致微粒中金属元素多为氧化物或硫酸盐。通过对比矿区地下水微粒与背景区井水微粒的差异，可以基本确定含Zn、Cu微粒和大数目的含Fe元素微粒是来自深部矿体，例如微粒7、8、10的主要成分含铁，它的氧化物部分可能来自于磁铁矿或菱铁矿，即来源于深部矿体中；微粒4、7的主要成分含锌，可能来自于闪锌矿；微粒6含铜元素，可能来自于深部铜矿物，如黄铜矿等。这部分微粒与深部矿体有成因联系，能够体现深部矿化特征。

结合表1和表2中元素含量特征以及对单微粒特征的分析，笔者发现矿区地下水含金属微粒与矿体具有一定的成矿相关性，地下深部的矿体特征可以通过含金属微粒的特征来体现，对主要的、与深部岩体有成因联系的含成矿金属微粒进行如下分析：

4.2.1 含铁微粒 在矿区采集的地下水样品中，大部分微粒均含一定量的铁元素，共有13个样品微粒含铁量较高，含铁量大于60%的微粒分别为微粒20(86.3%)、微粒24(79.4%)、微粒33(68.4%)，微粒多以氧化物形式存在，根据微粒元素百分含量推测含铁微粒可能来源于深部矿体中的铁矿物，如磁铁矿、黄铁矿等。含铁微粒对比背景区来看并没有明显的异常高值，说明区域上地层控制的铁元素背景值较高。矿区的含金属微粒中Fe元素多与Zn、Cr元素具有良好的正相关性，背景区含金属微粒中Fe元素多与Mg、S、Mn等元素相关，反映出矿区含金属微粒中的铁含量更能体现矿体的特征，而背景区

的含铁微粒更多地反映围岩的特征。

4.2.2 含锌微粒 在矿区采集的地下水样品中,共有 7 个样品微粒含锌,含锌量较高的分别为微粒 7(33.2%)、微粒 17(10.5%)、微粒 32(80.3%),根据其元素组合的百分含量特征推测其可能来源为闪锌矿,在矿区的含锌微粒中,Zn 元素多与 S 元素相关,有的微粒可能与 Fe、Mn 元素相关,如微粒 4、微粒 17;有的可能与 Fe、Cu 元素相关,如微粒 25、微粒 36;微粒 38 则构成了 Zn-Pb-Fe-Sb 元素组合,具有典型的深部特征。在背景区采集的井水样品中只发现了 3 个含锌微粒,且锌元素的百分含量较低,说明背景区岩体不含或少含锌矿化,也反映出矿区地下水微粒中的含锌微粒基本来源于矿区深部矿体,能体现深部矿体锌矿化相关的特征。

4.2.3 含铜微粒 在矿区采集的地下水样品中,共有 4 个微粒含铜量较高,分别是微粒 6(15.3%)、21(22.7%)、25(3.5%)、36(3.6%),根据其元素组合的百分含量特征推测其可能来源为辉铜矿、赤铜矿、氯化物的集合体。矿区的含金属微粒中 Cu 元素与 S、Cl 元素具有一定的相关性,特别地,微粒 25 的元素含量特征显示其除了与 S、Cl 元素外,还与 Fe 元素相关,微粒 36 的元素含量特征其可能与 S、Zn、Fe 等元素相关。含铜微粒同样未在背景区中出现,说明背景区岩体不含或少含铜矿化,也反映出矿区地下水微粒中的含铜微粒来源于矿区深部矿体,能体现深部矿体铜矿化相关的特征。

4.3 地下水纳米微粒勘探隐伏矿体的前景

对比矿区地下水样品和背景区井水样品,其中的微粒在类型上有较大的差别,含 Fe、Cu、Zr、Ag 等与卡休他他矿化相一致的元素的微粒仅在矿区地下水中有发现。背景区井水中主要的金属微粒为含 Fe、Mn、Cr、Ti、Ba、Zn 微粒,井水中含矿微粒的缺乏可能暗示了其于矿区地下深部岩性的差异。可以肯定的是,研究区地下水搬运了来自隐伏矿体的含矿微粒,与背景井水相比有着明显的微粒特征异常。

利用地下水中纳米微粒特征勘探隐伏矿体,不同于传统基于元素含量分析的水文地球化学找矿,它从微粒特征(包括形貌、结构、聚合体、微观特征、含量)的角度来勘探地下深部的隐伏矿体。通过获取地下水微粒在深部空间迁移过程中异常变化信息,结合微粒特征与含矿性,从而追踪深部矿化的改变,根据地下水微粒的分布来判断深部隐伏矿体的分布范围,最终圈定深部矿体空间分布位置,理论上能在宏观上缩小靶区。未来可以与其他多种勘查技术手

段结合,如地球物理勘探、地质学方法等,提高地下水找矿的成功率。

通过本文的研究,不仅在矿体附近发现了含金金属微粒,同时揭示了地下水能携带含矿金属微粒进行迁移,来自深部地下水中的含金属纳米微粒能够反映深部地质信息,含金属纳米微粒也能对矿化异常区做出响应,对深部矿体勘探具有指示意义。

4.4 矿区含金属微粒对地下饮用水污染的检测

如前文所述,对比背景区的井水样品,在矿区附近的地下水样品中发现的含金属微粒,其金属含量更高,种类也更复杂,这些含金属微粒可能会随地下水的迁移而汇入其他水域,如果进入饮用水源区,那么可能会对矿区附近饮用水产生污染,从而对在这一区域中生活的动、植物造成伤害,可能影响农作物产量,养殖业发展,甚至可能威胁人体健康。

不同的金属微粒可能产生的对生物的影响也有所差异,例如锌能诱导组蛋白修饰的改变,这可能是锌具有毒性的重要原因;铜离子与组蛋白结合后会引起严重的构象改变并影响组蛋白翻译后修饰,导致表观遗传改变;铁可以通过影响 HDACs 活性来影响组蛋白的修饰(刘敏和金永堂, 2011)。朱小山等(2008)进行的 3 种金属氧化物纳米微粒水生毒性试验表明,在水悬浮液中,氧化锌对单细胞绿藻的毒性大于二氧化钛,二氧化钛的毒性大于三氧化二铝,同时,不同的生物对金属氧化物纳米微粒的敏感性也不同。

本次研究表明,卡修他他矿区附近的地下水含金属元素微粒显示,该区地下水很可能受到了污染,除了铁元素外,其他重金属元素均高于背景区井水,对于该矿区地下水的污染应当引起警惕。地下水含金属纳米微粒的研究还可以用于检测地下饮用水的污染情况,通过测量分析地下饮用水样品中的有毒元素纳米微粒特征,包括微粒的形态、结构、聚集状态、含量等,可以检测出地下水中对人体有害的成分,如果将其与背景区微粒进行对比研究,理论上能够判断出其来自地质体本身还是人为污染源。

5 结论

(1)在勘探区附近地下水中发现大量与成矿有关的含金属微粒,如含 Fe、Cu、Zn 微粒,背景区井水中 Zn、Cu 在微粒中的原子百分比均小于 0.5%,而地下水中含 Zn、Cu 微粒原子百分含量分别可达 49.9%、5.1%。所得数据表明,这些含金属微粒能够

通过地下水迁移。

(2)与背景区井水微粒对比研究可以证明,矿区地下水中的含矿微粒来自于深部隐伏矿体,能携带深部隐伏矿体的信息,因此可以通过地下水微粒的特征探测隐伏矿体。

(3)通过观察分析矿区地下水中含矿微粒的分布及含矿性,地下饮用水可能受此污染而影响其品质,应加大对附近的地下水系开展水质监测工作,确保地下饮用水来源的安全性。

致谢:感谢匿名审稿专家提出的宝贵修改建议和意见!

References

Chen, K. P., Jiao, J. J., Huang, J. M., et al., 2007. Multivariate Statistical Evaluation of Trace Elements in Groundwater in a Coastal Area in Shenzhen, China. *Environmental Pollution*, 147(3): 771—780. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.09.002>

Du, Y., Ma, T., Deng, Y. M., et al., 2017. Hydro-Biogeochimistry of Hyporheic Zone: Principles, Methods and Ecological Significance. *Earth Science*, 42(5): 661—673 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.054>

Edmunds, W. M., Smedley, P. L., 2000. Residence Time Indicators in Groundwater: The East Midlands Triassic Sandstone Aquifer. *Applied Geochemistry*, 15(6): 737—752. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(99\)00079-7](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(99)00079-7)

Gao, H. L., He, J. G., Zhang, S., et al., 2013. Study on Crustal Stability of Alashan Area. *World Nuclear Geoscience*, 30(4): 237—244 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-0636.2013.04.009>

Gong, J. H., Zhang, J. X., Yu, S. Y., et al., 2012. 2.5 Ga TTG Rocks in the Western Alxa Block and Their Implications. *Chin. Sci. Bull.*, 57(28—29): 2715—2730 (in Chinese). <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5315-8>

Hochella, M. F., Moore, J. N., Golla, U., et al., 1999. A TEM Study of Samples from Acid Mine Drainage Systems: Metal-Mineral Association with Implications for Transport. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(19): 3395—3406. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00260-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00260-4)

Hu, X. S., Liu, J. C., Wang, Z. Y., et al., 1993. Geochemical Vegetation Survey in Jindongzi Gold Mine. *Geology and Exploration*, (1): 41—46 (in Chinese with English abstract).

Lai, X. R., 2007. Geological Significance of Kaxiutata Iron Deposit in Right-Banner of Alxa in Inner Mongolia (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences,

Beijing, 1—78 (in Chinese with English abstract).

Li, X., Wang, F., Luo, D. F., et al., 2015. The Effects of Applying Integrated Geophysical Method to the Prospecting for the Jiangcheng Concealed Lead and Zinc Deposit in Yunnan Province. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 39(6): 1119—1123 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.11720/wtyht.2015.6.06>

Li, Y. K., Cao, J. J., Philip, K., et al., 2016. The Discovery of the Metallic Particles of Groundwater from the Dongshengmiao Polymetallic Deposit, Inner Mongolia, and Their Prospecting Significance. *Journal of Geochemical Exploration*, 161: 49—61. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.10.013>

Liu, M., Jin, Y. T., 2011. Effects of Metal Pollutant on Histone Modifications. *Chin. J. Prev. Med.*, 45(5): 449—452 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.02539624.2011.05.015>

Liu, Y., Yan, J. Y., Wu, M. A., et al., 2012. Exploring Deep Concealed Ore Bodies Based on Gravity Anomaly Separation Methods: A Case Study of the Nihe Iron Deposit. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(12): 4181—4193 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.030>

Ramesh, R., Kumar, K. S., Eswaramoorthi, S., et al., 1995. Migration and Contamination of Major and Trace Elements in Groundwater of Madras City, India. *Environmental Geology*, 25(2): 126—136. <https://doi.org/10.1007/BF00767869>

Shi, X. J., Zhang, L., Wang, T., et al., 2014. Geochronology and Geochemistry of the Intermediate-Acid Intrusive Rocks from Zongnaishan Area in Northern Alxa, Inner Mongolia, and Their Tectonic Implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(6): 989—1007 (in Chinese with English abstract).

Shi, Y. Z., Li, K. C., 2014. The Application of Integrated Geophysical and Geochemical Exploration Methods to the Prospecting for Deep and Concealed Orebodies. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 38(5): 910—915 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.11720/wtyht.2014.5.08>

Wang, D. S., Gong, J. H., Zhang, J. X., et al., 2016. Tectonic Deformation Characteristics of the Mesoproterozoic Nuoergong Group in the Alxa Block. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(2): 306—320 (in Chinese with English abstract).

Wang, X. Q., Xie, X. J., 2000. Theories and Methods of Exploration Geochemistry of Gold Strategy and Tactics. Shandong Science & Technology Press, Jinan, 114—118

(in Chinese).

- Xu, D. Q., Bai, D. M., Li, R. G., 2006a. Application of Large-Scale High-Precision Magnetic Survey in Iron (Gold, Cobalt) Ore Mining in the Kaxiutata Deposit. *Geology and Prospecting*, 42(3): 76–80 (in Chinese with English abstract).
- Xu, D. Q., Jiang, S. H., Zhang, J. H., et al., 2006b. Geological and Geochemical Features of Kaxiutata Iron (Gold, Cobalt) Deposit in Alxa Right Banner, Inner Mongolia. *Mineral Deposits*, 25(3): 231–242 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2006.03.002>
- Yuan, G. Q., Li, F., Zheng, H. S., et al., 2010. Deep Geophysical Prospecting Methods in Metallic Ore Exploration and Application Effect. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 32(5): 495–499 (in Chinese).
- Zhang, J., Wang, X. S., Jia, F. C., et al., 2015. New Insight into the Flow Direction of Groundwater in Western Alxa, Inner Mongolia. *Geoscience*, 29(1): 213–219 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S., Li, F. L., Gong, J. J., et al., 2012. Application of Hydrocarbons in Concealed Tungsten Ore Prediction in Weijia, Nanling Area. *Earth Science*, 37(6): 1149–1159 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2012.122>
- Zhou, F., Zhu, J., Zhang, P., et al., 2017. Effect of Groundwater Components on Hydroxyl Radical Production by Fe(II) Oxygenation. *Earth Science*, 42(6): 1039–1044 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.082>
- Zhu, X. S., Zhu, L., Tian, S. Y., et al., 2008. Aquatic Ecotoxicities of Nanoscale TiO₂, ZnO and Al₂O₃ Water Suspensions. *Acta Ecologica Sinica*, 28(8): 3507–3516 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 杜尧, 马腾, 邓娅敏, 等, 2017. 潜流带水文—生物地球化学: 原理、方法及其生态意义. *地球科学*, 42(5): 661–673.
- 高洪雷, 何建国, 张松, 等, 2013. 阿拉善地区地壳稳定性研究. *世界核地质科学*, 30(4): 237–244.
- 宫江华, 张建新, 于胜尧, 等, 2012. 西阿拉善地块 ~ 2.5 Ga TTG 岩石及地质意义. *科学通报*, 57(28–29): 2715–2730.
- 胡西顺, 刘金成, 汪振洋, 等, 1993. 植物地球化学测量及其在金洞子金矿区的应用效果. *地质与勘探*, (1): 41–46.
- 赖新荣, 2007. 内蒙古阿拉善右旗铁矿及其地质环境研究(硕士学位论文). 北京: 中国地质科学院, 1–78.
- 李星, 王峰, 罗大锋, 等, 2015. 综合物探方法在云南江城隐伏铅锌矿勘查中的应用. *物探与化探*, 39(6): 1119–1123.
- 刘敏, 金永堂, 2011. 金属污染物对组蛋白修饰的影响. *中华预防医学杂志*, 45(5): 449–452.
- 刘彦, 严加永, 吴明安, 等, 2012. 基于重力异常分离方法寻找深部隐伏铁矿——以安徽泥河铁矿为例. *地球物理学报*, 55(12): 4181–4193.
- 史兴俊, 张磊, 王涛, 等, 2014. 内蒙古阿拉善盟北部宗乃山中酸性侵入岩年代学、地球化学及构造意义. *岩石矿物学杂志*, 33(6): 989–1007.
- 时永志, 李凯成, 2014. 综合物化探方法在地质找矿“攻深找盲”中的应用. *物探与化探*, 38(5): 910–915.
- 王东升, 宫江华, 张建新, 等, 2016. 阿拉善地块中元古代诺尔公群的构造变形特征. *岩石矿物学杂志*, 35(2): 306–320.
- 王学求, 谢学锦, 2000. 金的勘查地球化学理论与方法·战略与战术. 济南: 山东科学技术出版社, 114–118.
- 许东青, 白大明, 李荣光, 2006a. 大比例尺高精度磁测在卡休他他铁(金、钴)矿生产中的应用. *地质与勘探*, 42(3): 76–80.
- 许东青, 江思宏, 张建华, 等, 2006b. 内蒙古阿右旗卡休他他铁(金、钴)矿床地质地球化学特征. *矿床地质*, 25(3): 231–242.
- 袁桂琴, 李飞, 郑红闪, 等, 2010. 深部金属矿勘查中常用物探方法与应用效果. *物探化探计算技术*, 32(5): 495–499.
- 张竞, 王旭升, 贾凤超, 等, 2015. 对内蒙古阿拉善西部地下水流向问题的新认识. *现代地质*, 29(1): 213–219.
- 张爽, 李方林, 龚晶晶, 等, 2012. 烃气测量在南岭魏家隐伏钨矿区找矿预测中的应用. *地球科学*, 37(6): 1149–1159.
- 周帆, 朱健, 张鹏, 等, 2017. 地下水化学组成对 Fe²⁺ 氧化产生羟自由基的影响. *地球科学*, 42(6): 1039–1044.
- 朱小山, 朱琳, 田胜艳, 等, 2008. 三种金属氧化物纳米颗粒的水生态毒性. *生态学报*, 28(8): 3507–3516.