

大水式金矿床稳定同位素、稀土元素地球化学研究*

闫升好 王安建 高 兰 赵彦庆 陈国忠

(中国地质科学院, 北京)

(甘肃地矿局第三地质队, 甘南州)

提 要: 大水式金矿床是近年来在西秦岭地区发现的一个国内外十分罕见的金矿类型, 具有极为独特的矿化特征。通过对矿区热液方解石、硅质岩矿石、硅化灰岩及原岩、岩浆岩等地质体碳-氧、硅-氧、碳-氢-氧同位素和稀土元素地球化学特征的系统研究揭示, 成矿物质中碳为氧化作用改造的深成岩浆碳, 硅具深部岩浆或岩浆热水来源的特点, 成矿流体具岩浆水与建造水混合之特点, 各种矿石稀土配分曲线和 δE_u 、 δC_e 值均与岩浆岩类似或接近而与地层灰岩差别较大, 从而说明大水式金矿床成矿物质来源与岩浆活动有关, 成岩成矿作用具相同渊源和地质构造背景。

关键词: 大水式金矿 REE 硅-碳-氧-氢同位素 甘肃西倾山地区

中图法分类号: P597+.2

大水式金矿床是近年来在甘肃省南部西倾山地区发现的一个国内外十分罕见的金矿类型, 不仅矿床规模大、品位高、埋藏浅、矿石成分简单、易采易选, 而且矿化特征极为独特。本文对该类金矿各种赋矿地质体、矿化体及其它热液产物进行了系统的硅、碳、氧、氢稳定同位素和稀土元素地球化学研究, 以探讨其成矿物质来源和矿床成因等问题。

1 矿床地质特征

大水金矿区位于西秦岭造山带南亚带、白龙江复背斜西段的西倾山隆起, 南以玛曲-略阳深大断裂与松潘甘孜造山带的若尔盖地块相邻。早古生代, 区域地壳在裂陷作用下形成东西向白龙江裂陷槽, 沉积了寒武系—志留系海相复理石碎屑建造; 加里东运动使裂陷槽封闭并转入稳定台地相环境, 形成泥盆系—下三叠统浅海碎屑岩和碳酸盐岩建造; 中三叠世晚期, 区域地壳再度裂陷形成大面积的中-上三叠统巨厚深海—半深海浊流复理石建造; 印支运动使该区全面褶皱造山并形成多体拼贴的大地构造格架; 燕山期—喜山期, 区内构造运动主要表现为大规模陆内推覆、走滑剪切和地体不均衡隆拗, 岩浆活动强烈。

矿区地层 (图 1) 主要有泥盆系—中三叠统泥砂质灰岩、泥晶灰岩、生屑灰岩等, 侏罗系为河湖相杂色砾岩、砂砾岩, 白垩系为一套红色磨拉石建造。金矿化主要产于三叠系。矿区出露格尔括合、忠曲和忠格扎拉 3 个小岩株和大量中酸性岩脉, 岩性主要为黑云母闪长玢岩, 花岗岩闪长斑岩, 石英闪长岩和二长斑岩。同位素年龄为 $174.3 \times 10^6 \sim 190.69 \times 10^6$ a, 属燕山

* 本研究受原地质矿产部定向科研资助 (编号: 直科定 96-20)

第一作者简介: 闫升好, 男, 1966 年生, 博士, 矿床学专业。邮政编码: 100037

1999-01-12 收稿, 1999-05-28 修改回

陆内造山阶段的产物。断裂构造主要有两组: ①NW—近EW向弧形断裂, 为一系列高角度逆冲断层(F₁—F₅), 规模大、产状陡, 具多期次活动特点, 它控制了区内岩浆和矿床的空间产出; ②与弧形断裂相垂直的近SN向和NE—NEE向断裂, 规模小, 具张-张扭性特征, 该组断裂控制了矿区中酸性岩脉和金矿体的产出与分布。

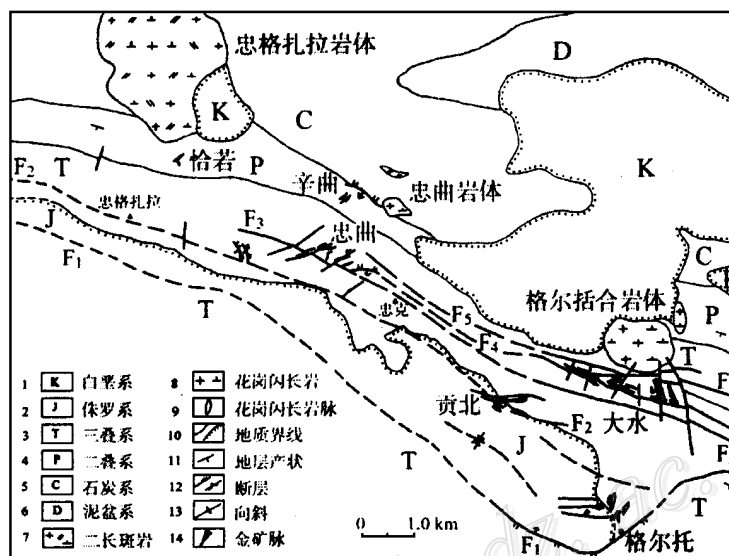


图1 大水金矿区地质图

Fig. 1. Diagrammatic geological map of the Dashui gold ore district.

1—Cretaceous; 2—Jurassic; 3—Triassic; 4—Permian; 5—Carboniferous; 6—Devonian;

7—Monzonitic porphyry; 8—Granite porphyry; 9—Granodiorite dike; 10—Geological boundary;

11—Attitude of strata; 12—Fault; 13—Syncline; 14—Gold vein.

矿体呈透镜状、细脉和大脉状、枝叉状、不规则囊状等, 主要产于三叠系白云质灰岩以及花岗闪长岩脉与灰岩接触带附近, 断裂控矿明显。矿石矿物主要有赤铁矿、自然金、褐铁矿、微晶石英、方解石, 次为白云石、绿泥石、绢云母及微量黄铁矿、辰砂、辉铋矿、白钨矿、菱锰矿等。围岩蚀变主要有硅化、赤铁矿化和碳酸盐化, 其中硅化和赤铁矿化与金矿化关系最为密切。矿石类型主要有赤铁矿化、硅化灰岩、硅质岩、赤铁矿化硅化花岗闪长岩及热液角砾岩等矿石。

2 稳定同位素地球化学特征

2.1 碳氧同位素体系

本次工作分析测试了15件灰岩、矿石和不同期次方解石碳氧同位素组成, 同时收集了部分前人测试数据, 并根据这些数据绘制了 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 相关图。从表1和图2可以看出:

(1) 大水金矿区热液方解石、硅质岩矿石、硅化灰岩和围岩地层碳氧同位素组成特征各不相同, 差别较为明显。灰岩或大理岩化灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为1.0‰和27.4‰, 与

表 1 大水金矿区岩矿石碳氧同位素组成

Table 1. Carbon and oxygen isotopic composition of rocks and ores from the Dashui gold ore district

序号	样品号	样品名称	采样位置	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$
1	GB-1751-40	白云质灰岩	贡北 ZK-1751	5.1	- 0.8	30.0
2	L-D	灰岩	大水 92 线	- 1.2	- 21.6	8.6
3	L-10	灰岩	忠曲二叠系	4.3	- 6.8	23.8
4	1022-53	灰岩	大水 ZK-1022	0.1	- 5.4	25.3
5	DS-33-4	早期方解石	大水 80 线	1.8	- 17.9	12.4
6	1023-97	晚期方解石	大水 ZK-1023	1.2	- 11.3	19.2
7	96-70-6	早期方解石	大水 70 线	3.2	- 13.6	16.3
8	1751-52	早期方解石	贡北 ZK-1751	2.2	- 13.8	16.7
9	DS82-2	早期方解石	大水 82 线	- 0.6	- 14.7	15.7
10	ZC-T-C	晚期方解石	忠曲 Au-2 矿体	- 1.1	- 12.7	17.8
11	DS80-6	早期方解石	大水 80 线	4.0	- 22.2	8.0
12	1023-31	早期方解石	大水 ZK-1023	4.3	- 16.8	13.6
13	L-4-1	早期方解石	忠曲三叠系	2.7	- 12.0	18.5
14	D-A-5	早期方解石	大水岩体东	3.8	- 28.3	1.7
15	Z-K-5	早期方解石	忠扎岩体东	1.9	- 11.4	19.1
16	95TW-6	早期方解石	大水 68 线矿体底板	2.0	- 13.5	17.0
17	95TW-7	早期方解石	大水 68 线矿体底板	- 2.3	- 11.5	19.0
18	95TW-8	早期方解石	大水 68 线矿体顶板	3.2	- 12.7	17.7
19	95TW-9	早期方解石	大水 68 线矿体顶板	2.2	- 12.9	17.6
20	GD-1	早期方解石	大水	0.9	- 14.5	15.8
21	GD-2	早期方解石	大水	3.2	- 22.1	8.1
22	GD-3	早期方解石	大水	- 1.1	- 15.6	14.8
23	GD-4	早期方解石	贡北	2.7	- 12.0	18.5
24	GD-5	晚期方解石	大水	- 1.7	- 10.9	19.6
25	GD-6	晚期方解石	大水	- 1.8	- 11.2	19.3
26	GD-7	早期方解石	大水	- 7.1	- 19.6	10.7
27	GD-8	早期方解石	大水	2.4	- 12.3	18.2
28	GD-9	早期方解石	贡北	4.1	- 23.9	6.2
29	GD-10	晚期方解石	大水	- 2.7	- 11.6	18.9
30	GD-11	晚期方解石	大水	- 2.8	- 11.1	19.4
31	GD-12	早期方解石	贡北	- 2.1	- 20.1	10.2
32	D1	灰岩	大水	1.3	- 11.2	19.3
33	D4	硅质岩矿石	大水	2.6	- 15.6	14.9
34	D-6-C	早期方解石	大水	4.8	- 16.8	13.6
35	D-8	硅质岩矿石	大水	4.7	- 15.3	15.1
36	D-9-B	早期方解石	大水	2.6	- 20.1	10.1
37	D-11	早期方解石	大水	0.2	- 14.9	15.5
38	DS-01	晚期方解石	大水 82 线	- 0.9	- 11.9	18.5
39	DS-07	早期方解石	大水 84 线	3.5	- 14.9	15.5
40	DS-10-1	早期方解石	大水 84 线	1.4	- 21.4	8.8
41	DS-10-2	硅质岩矿石	大水 84 线	0.3	- 13.7	16.7
42	DX6-3-6	早期方解石	大水 84 线	6.1	- 17.4	12.9
43	DX6-3-8	硅质岩矿石	大水 84 线	1.9	- 4.3	26.4
44	DX6-3-10	大理岩	大水 84 线	0.0	1.9	32.8
45	DX6-6-2	大理岩	大水 70 线	0.0	2.1	33.0
46	DX6-8-3	大理岩	大水 Au-20 矿体	0.0	1.1	32.0
47	DX6-8-18	大理岩	大水 Au-20 矿体	0.0	1.0	31.9
48	DX6-8-19	大理岩	大水 Au-20 矿体	0.0	1.5	32.4
49	DX6-8-20	大理岩	大水 Au-20 矿体	0.0	2.5	33.4
50	DX6-8-21	大理岩	大水 Au-20 矿体	0.1	0.7	31.6

注: 1~ 15 号样为本文, 16~ 37 号样据甘肃地质三队, 38~ 50 号样据王平安, 1997; 样品由地科院矿床所分析

显生宙海相碳酸盐岩碳氧同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}$ 为 $(0.6 \pm 1.5)\%$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $10\% \sim 30\%$) 一致。硅化灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围较窄, 平均值分别为 1.4% 和 23.4% 。硅质岩矿石 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围为 $0.3\% \sim 4.7\%$ 、 $14.9\% \sim 26.4\%$, 平均值分别为 2.4% 和 18.3% 。热液方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围最大, 从 $-7.1\% \sim 6.1\%$, 而且早晚两期方解石碳氧同位素组成差别较大, 早期方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 2.8% 和 11.8% , 晚期分别为 -0.1% 和 18.1% 。

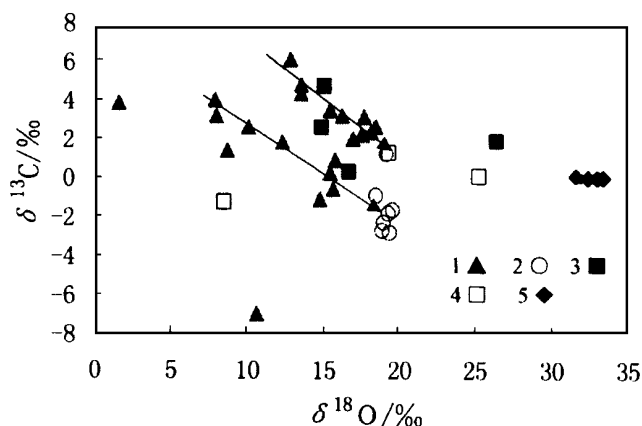


图2 大水金矿岩矿石碳氧同位素组成图解
1—早期方解石; 2—晚期方解石; 3—硅质岩;
4—灰岩; 5—大理岩

Fig. 2. $\delta^{13}\text{C}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ diagram of rocks and minerals from the Dashui gold deposits.

1—Early calcite; 2—Late calcite; 3—Silicalite;
4—Limestone; 5—Marble.

$\delta^{13}\text{C}$ 值变化较大 ($-7.1\% \sim +6.1\%$), 而且多数样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现为较高的正值, 这与海相碳酸盐岩 ($\delta^{13}\text{C} \approx 0\%$)、深成碳 ($\delta^{13}\text{C} \approx -7\%$) 和生物有机碳 ($\delta^{13}\text{C} \approx -25\%$) 等主要碳源的碳同位素组成差别较大, 也难以不同碳源的混合作用加以解释。研究表明, 热液中含碳原子团和沉淀出的含碳矿物之同位素组成不仅取决于热水流体中总碳浓度和 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 还依赖于流体的 pH、 f_{O_2} 、 t 和 I 等物理化学参数。其中 f_{O_2} 是控制热水流体中氧化态碳和还原态碳之间比例变化的最重要因素。如果 f_{O_2} 约为 101.325×10^{-36} Pa, 则流体中大部分碳为氧化态⁽³⁾。由此说明大水金矿碳源为经过氧化作用改造了的深成岩浆碳, 因为其它碳源在氧化条件下不可能演化出 $\delta^{13}\text{C}$ 既出现较小负值、又总体呈现较低正值的热液流体。

2.2 硅、氧同位素体系

大水金矿硅质岩即为矿石, 二氧化硅与金同步沉淀, 本次工作对矿区内各种硅质岩矿石的硅同位素组成进行了测试 (表2)。

分析结果表明, 大水金矿区岩浆岩-矿化脉岩、硅质岩及蚀变矿化灰岩具有相对较低的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值, 而且 21 件样品的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值均为负值。其中 5 件岩浆岩和矿化脉岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值变化于 $-0.2\% \sim -0.4\%$ 之间, 4 件硅化灰岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值为 $-0.1\% \sim -1.3\%$, 12 件硅质岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值变化于 $-0.1\% \sim -0.8\%$ 之间。研究表明^[1], 岩浆岩和热水沉积硅质岩 (泉华、海底黑烟卤、

(2) 从早到晚, 热液方解石表现出 $\delta^{13}\text{C}$ 值降低 ($2.8\% \sim -0.1\%$)、 $\delta^{18}\text{O}$ 值增高 ($11.8\% \sim 18.1\%$) 的变化趋势。

(3) 从围岩-硅化灰岩-硅质岩矿石, 随着蚀变矿化作用程度的增加 $\delta^{13}\text{C}$ 值依次增高: $0.9\% \sim 1.3\% \sim 1.4\%$, 而 $\delta^{18}\text{O}$ 值则渐次降低: $27.4\% \sim 23.4\% \sim 13.3\%$ 。说明成矿热液本身富 ^{13}C 而贫 ^{18}O 。已知海相碳酸盐岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值一般大于 20% , 岩浆成因流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为较低的正值 ($5.0\% \sim 10.5\%$), 而表生水 (大气降水或海水) 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值则多为较大的负值。因而上述氧同位素变化趋势指示一种岩浆流体与海相碳酸盐岩相互作用的机制。

(4) 大水式金矿热液方解石

磁铁石英岩等) 一般具有较低的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值, 且大多偏向负值; 石英岩或石英砂岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值相对较高; 生物沉积硅质岩 $\delta^{30}\text{Si}$ 值变化范围较大, $-3.7\text{‰} \sim +2.5\text{‰}$ 。因此, 大水金矿各种硅质岩矿石的硅同位素组成特征显示其具深部岩浆或岩浆热水来源的特点。

表 2 大水金矿区岩矿石硅氧同位素组成

Table 2. Silicon and oxygen isotopic composition of rocks and minerals from the Dashui gold deposits

序号	样品号	样品名称	采样位置	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{30}\text{Si}_{\text{NBS-28}}/\text{‰}$
1	BB-1	大水矿化脉岩	大水 100 线	10.6	-0.4
2	BB-2	大水硅质岩矿石	大水 82 线	8.3	-0.3
3	BB-3	忠曲硅质岩矿石	忠曲 Au-2 矿体	5.7	-0.6
4	BB-4	格尔托脉岩矿石	格尔托	6.3	-0.2
5	BB-5	忠扎岩体	忠格扎拉	11.3	-0.2
6	BB-6	大水岩体	大水岩体	10.5	-0.3
7	BB-7	大水岩体	大水岩体	9.2	-0.4
8	DS10-2	紫色硅质岩矿石	大水 84 线	11.3	-0.8
9	DX6-3-8	黄褐色硅化灰岩矿石	大水 84 线	17.0	-1.3
10	DX6-8-3	硅化大理岩	大水 Au-20 矿体	17.9	-0.8
11	DX6-8-4	硅化灰岩	大水 Au-20 矿体	18.0	-0.8
12	DX6-8-12	硅质岩矿石	大水 Au-20 矿体	10.2	-0.7
13	DX6-8-13	黄褐色硅化灰岩矿石	大水 Au-20 矿体	17.5	-0.1
14	DX6-8-17	紫色硅质岩矿石	大水 Au-20 矿体	15.2	-1.0
15	DX6-8-20	紫色硅质岩矿石	大水 Au-20 矿体	14.6	-1.0
16	GT6-6-1	紫色硅质岩矿石	格尔托	11.0	-0.5
17	ZQ6-1-7.2	紫色硅质岩矿石	忠曲 Au-7 矿体	12.7	-0.4
18	ZQ6-1-7.3	硅化灰岩矿石	忠曲 Au-7 矿体	13.8	-0.1
19	ZQ6-3-15	黄褐色硅化灰岩矿石	忠曲 Au-2 矿体	11.1	-0.7
20	ZQ6-3-16	褐色硅化灰岩矿石	忠曲 Au-2 矿体	10.4	-0.6
21	ZQ6-3-17	褐色硅化灰岩矿石	忠曲 Au-2 矿体	11.6	-0.6

注: 1~7 号样为本次研究所测; 8~21 号样据王平安, 1997; 全部样品由地科院矿床地质研究所分析

从 $\delta^{30}\text{Si}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 相关图 (图 3) 可以看出: 岩浆岩和脉岩矿石具相对高的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值和低 $\delta^{18}\text{O}$ 值 ($6.3\text{‰} \sim 10.6\text{‰}$), 蚀变灰岩则具相对低的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值和高 $\delta^{18}\text{O}$ 值 ($17.0\text{‰} \sim 18.0\text{‰}$)。12 件硅质岩矿石样品中有 2 件样品 (系热水交代似碧玉岩) 的 $\delta^{30}\text{Si}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏向蚀变灰岩, 其余 10 件样品 (为热水沉积硅质岩) 的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值相对集中, 而且明显趋向靠近岩浆岩的变化范围, 充分显示出硅质岩硅源与岩浆作用密切相关。

实验研究表明, 热液矿物硅同位素分馏主要与矿物的沉淀速度和温度有

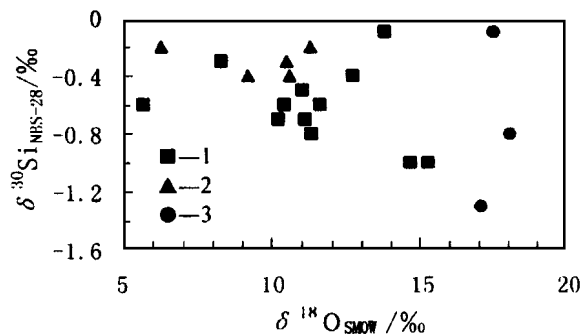


图 3 大水金矿区岩矿石硅氧同位素图解

1—硅质岩; 2—岩浆岩; 3—硅化灰岩

Fig. 3. $\delta^{30}\text{Si}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ diagram of rocks and minerals from the Dashui ore district.

1—Siliceous rock; 2—Magmatic rock;
3—Silicified limestone.

关^[2]。在快速和较完全沉淀条件下,热液矿物的硅同位素组成几乎不发生分馏, $\delta^{30}\text{Si}$ 值与溶液中 SiO_2 的同位素组成相近;而低温或缓慢沉淀条件下,热液矿物硅同位素会产生较大分馏,并具有较低的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值。大水式金矿早期以缓慢交代方式形成的硅化灰岩和似碧玉岩具较低的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值,而稍晚于开放空间快速沉淀形成的硅质岩 $\delta^{30}\text{Si}$ 值较高并且相对集中的变化特点,可能正是两种硅质岩成岩环境和成岩方式不同所造成的。

2.3 碳、氢、氧同位素

大水金矿硅质岩矿石主要由隐晶—微晶石英组成,其流体包裹体多小于 $1\ \mu\text{m}$ 。本次工作未能获得微晶石英流体包裹体同位素组成数据,以下仅根据4件热液方解石流体包裹体同位素成分对成矿流体的可能来源作一粗略探讨。

从表3碳、氢、氧同位素组成看, $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值变化区间较小, $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-4.0\text{‰} \sim -10.0\text{‰}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 $-0.3\text{‰} \sim -1.2\text{‰}$ 、 δD 为 $-61\text{‰} \sim -93\text{‰}$ 。 $\delta^{13}\text{C}$ 和 δD 值显示成矿流体

表3 大水金矿热液方解石包裹体碳氢氧同位素组成

Table 3. Carbon and oxygen isotopic composition of fluid inclusions in hydrothermal calcite from the Dashui gold deposits

样品编号	采样位置	样品名称	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$	$\delta\text{D}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$
ZK1023-91	大水Au-20号矿体	粗晶方解石	-10.0	-0.3	-61
DS80-6	大水⑦号矿体	粗晶方解石	-5.8	-0.3	-93
ZK822-84	大水⑧号矿体	粗晶方解石	-4.0	-0.4	-84
ZC-Au-2	忠曲Au-2号矿体	粗晶方解石	-4.8	-1.2	-84

注:样品由湖北宜昌地质研究所测试

具岩浆水特点, $\delta^{18}\text{O}$ 值则具原生建造水特点^[6],说明成矿流体是一种混合水,这与大水式金矿成矿环境为浅成开放氧化的地质特征相吻合,因为岩浆水在进入地表时不可避免地要遭受氧化作用以及大气水的混合从而使流体具表生水 $\delta^{18}\text{O}$ 值特点。

3 稀土元素地球化学特征

对矿区硅质岩、脉岩矿石、热液方解石以及赋矿地层、岩浆岩体(脉)等各种地质体进行了系统采样和稀土元素测试分析(表4),稀土元素特征参数统计值和稀土元素配分曲线见表5和图4。综合分析这些数据可以获得如下几点认识:

(1) 大水金矿区岩浆岩、灰岩、各种矿石及热液方解石等不同地质体稀土元素总量系统差别明显。岩体 ΣREE 最高,变化于 $148.32 \sim 352.79\ \mu\text{g/g}$,平均为 $186.56\ \mu\text{g/g}$ 。脉岩稀土元素总量在 $100.21 \sim 170.05\ \mu\text{g/g}$ 之间,平均为 $127.32\ \mu\text{g/g}$ 。灰岩 ΣREE 最低,为 $1.97\ \mu\text{g/g}$ 。而各种蚀变矿化岩石及热液方解石 ΣREE 介于灰岩和岩浆岩之间。

(2) 所有样品的 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 、 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 、 $(\text{Ce}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值均远大于1,为轻稀土富集型,配分曲线右倾(图4)。与富含轻稀土的碱性-偏碱性岩浆岩稀土组成相似^[5]。

表 4 大水金矿区岩(矿)石稀土元素组成

Table 4. REE compositions of different rocks (ores) from the Dashui gold ore district

样号	样品名称	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Sc
D6	忠格扎拉二长斑岩	55.52	81.38	10.37	28.67	5.69	1.02	4.56	0.7	2.62	0.54	1.34	0.18	1.15	0.12	13.49	4.93
D10	忠格扎拉岩体	97.44	140.10	16.52	49.01	9.34	1.66	6.51	0.89	4.22	0.86	2.27	0.3	1.84	0.27	21.06	5.42
D7	大水闪长玢岩	41.48	65.14	9.94	26.25	6.30	1.32	6.78	1.08	2.39	0.5	0.92	0.15	1.19	0.2	13.53	8.72
D9	大水岩体	35.82	58.33	7.73	22.03	5.05	1.13	4.90	0.76	2.02	0.45	1.03	0.14	0.78	0.1	9.68	7.20
D37	大水岩体边缘相	36.16	57.65	6.53	22.76	4.63	1.18	3.62	0.5	2.16	0.45	1.06	0.13	0.87	0.1	10.52	5.25
D8	忠曲闪长玢岩	39.38	60.93	8.19	25.71	5.72	1.27	5.16	0.71	2.4	0.45	0.65	0.15	1.12	0.2	13.75	8.98
D36	大水 82 线脉岩	41.56	71.02	7.80	27.76	5.62	1.02	3.58	0.46	1.77	0.33	0.78	0.1	0.55	0.1	7.6	2.34
D26	大水 80 线浅色脉岩	27.32	40.85	5.07	7.27	3.35	0.94	4.13	0.67	1.49	0.24	0.7	0.1	0.56	0.1	6.55	0.53
D27	大水 80 线深色脉岩	30.87	52.34	6.36	21.92	5.14	1.02	4.73	0.72	1.75	0.35	0.79	0.1	0.67	0.1	8.04	0.04
D28	大水 80 线灰色脉岩	35.88	62.68	7.31	25.46	5.62	1.03	4.95	0.63	1.99	0.37	0.91	0.13	0.78	0.1	9.27	9.1
D39	大水 82 线脉岩	27.01	42.69	4.78	15.04	2.63	0.54	1.79	0.3	0.74	0.16	0.39	0.1	0.37	0.1	3.57	0.78
D2	大水 100 线脉岩矿	57.94	85.43	10.51	28.67	5.36	0.61	4.22	0.53	1.67	0.36	1.04	0.13	0.82	0.1	7.64	1.65
D24	大水 100 线脉岩矿	12.99	25.16	2.36	7.62	2.52	0.52	3.57	0.49	1.67	0.3	0.87	0.1	0.6	0.1	6.68	1.7
D25	大水 82 线脉岩矿	12.49	19.44	3.36	7.40	1.81	0.56	1.79	0.32	0.42	0.18	0.1	0.1	0.27	0.1	2.88	1.07
D3	贡北 TC204 脉岩矿	36.60	61.22	8.17	25.41	5.71	1.20	4.71	0.73	2.25	0.5	0.91	0.14	0.92	0.1	11.22	8.82
D4	格尔托脉岩矿	38.20	60.50	8.25	24.96	5.41	1.23	5.46	0.87	2.18	0.5	0.76	0.15	1.14	0.18	11.82	6.45
D5	忠曲脉岩矿	35.79	52.98	5.55	21.31	3.95	0.99	2.32	0.3	2.22	0.34	1.03	0.15	0.97	0.1	11.69	8.04
D1	大水 100 线硅质岩	24.36	33.71	4.46	11.01	2.35	0.41	2.47	0.36	1.01	0.24	0.64	0.1	0.53	0.1	4.68	1.27
D11 ^①	大水 70 线硅质岩	1618	3156	371	1215	229	71	161	26	136	29	8	12	91	14	877	350
D12	忠曲硅质岩	25.66	26.31	4.21	17.97	4.77	1.43	6.15	0.91	3.47	0.7	1.7	0.22	0.99	0.2	24.19	1.17
D13	格尔托硅质岩	4.61	7.47	0.72	3.27	1.03	0.26	1.41	0.3	0.22	0.1	0.14	0.1	0.15	0.1	1.36	0.68
D14 ^④	贡北 184 线硅质岩	6674	11345	1506	4516	514	98	354	39	147	31	85	13	115	15	1031	362
D15	大水 82 线硅质岩	11.66	18.33	1.76	7.21	1.62	0.38	1.98	0.3	0.63	0.17	0.4	0.1	0.3	0.1	2.93	0.82
D16	大水 94 线硅质岩	22.75	49.09	4.59	16.31	4.03	0.59	3.68	0.59	2.34	0.48	1.31	0.2	1.21	0.15	12.50	4.92
D17	大水 94 线硅化灰岩	2.86	5.91	1.21	1.88	1	0.49	1.30	0.3	0.38	0.17	0.33	0.1	0.2	0.1	2.66	0.39
D19	贡北 184 矿化砾岩	4.02	7.45	0.91	3.19	1.46	0.35	1.80	0.3	0.64	0.14	0.33	0.1	0.27	0.1	3.72	0.64
D20	贡北 196 矿化灰岩	4.13	7.25	0.78	2.49	0.81	0.24	1.17	0.3	0.17	0.1	0.1	0.1	0.13	0.1	1.13	1.1
D23	忠曲矿化灰岩	7.41	10.44	1.04	3.57	1.13	0.35	1.72	0.3	0.75	0.16	0.45	0.1	0.39	0.1	5.04	1.77
D18 ^①	大水 102 线灰岩	389	808	97	346	56	27	81	14	62	12	33	5	31	4	402	10
D31	大水方解石	8.22	11.53	1.31	4.36	1.09	0.43	1	0.3	0.79	0.16	0.37	0.1	0.41	0.1	4.4	0.89
D35 ^①	大水 80 线方解石	425	953	152	753	205	90	234	35	190	37	76	11	68	11	1350	90
D32 ^②	大水 102 线方解石	250	188	37	162	40	25	72	9	58	13	33	5	27	4	760	0
D33 ^③	大水 82 线方解石	67	112	12	62	4	9	16	3	18	2	2	2	5	2	30	10
D34 ^④	忠曲 2 采场方解石	1922	2026	339	1317	355	181	404	60	393	62	123	21	127	24	2520	1390
D30 ^①	忠曲方解石	2507	1036	383	1539	305	87	377	52	279	57	134	18	99	15	3040	40

注: ①样品单位为 10⁻⁹, 其余样品为 10⁻⁶; 样品由国家地质实验测试中心分析表 5 大水金矿区岩矿石稀土元素 ($\mu\text{g/g}$) 特征参数统计表

Table 5. REE characteristic parameters of rocks (ores) from the Dashui gold ore district

样品名称	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE	$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$	δEu	δCe	$(\text{La}/\text{Yb})_N$	$(\text{Ce}/\text{Yb})_N$
岩浆岩 (6)	186.56	174.64	11.92	14.66	0.67	0.78	29.92	17.12
脉岩 (5)	127.32	119.58	7.74	15.46	0.67	0.85	39.02	24.62
脉岩矿 (6)	121.83	113.70	8.13	13.94	0.69	0.82	27.97	16.83
硅质岩矿石 (7)	54.46	49.09	5.37	9.14	0.69	0.84	22.69	13.77
硅化灰岩矿石 (5)	20.77	17.59	3.18	5.54	0.89	0.84	15.38	10.42
方解石 (6)	8.13	7.08	1.05	6.73	1.02	0.62	10.40	4.42
灰岩 (1)	1.97	1.73	0.24	7.12	1.23	0.49	8.83	6.67

注: 括号内为样品数

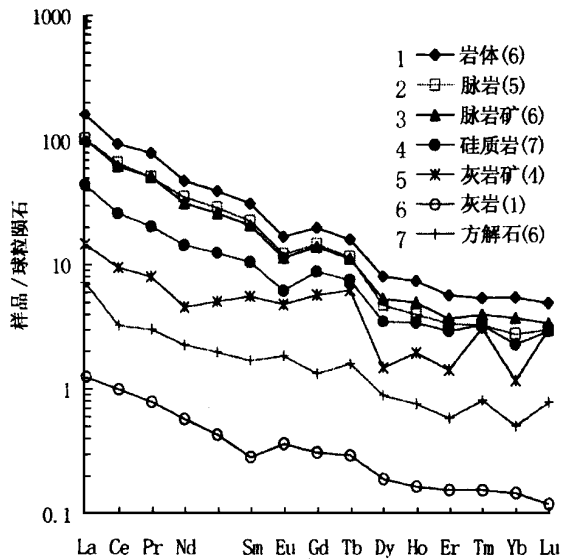


图4 大水式金矿岩矿石稀土元素配分曲线

Fig. 4. Chondrite-normalized REE patterns of rocks and minerals from the Dashui deposits.

间, 平均为 0.67; Ce 异常不明显, δCe 值分别为 0.78 和 0.85。灰岩则具较明显的 Eu 正异常和 Ce 负异常, δEu 和 δCe 值分别为 1.23、0.49。脉岩矿 δEu 和 δCe 值为 0.69、0.82, 硅质岩矿 δEu 和 δCe 值为 0.69、0.84, 硅化灰岩矿 δEu 和 δCe 值为 0.89 和 0.84。因此, 各种矿石稀土配分曲线和 δEu 、 δCe 值均与岩浆岩类似或接近, 而与灰岩存在较大差别, 说明成矿物质来源与岩浆活动有关。

4 结论

(1) 大水式金矿床为浅成-超浅成氧化环境下形成的热液矿床, 其热液方解石、硅质岩矿石、硅化灰岩及原岩、岩浆岩等地质体的碳、硅、氧、氢同位素特征显示: 成矿物质中碳为氧化作用改造的深成岩浆碳, 硅具深部岩浆或岩浆热水来源的特点, 成矿流体兼有岩浆水与建造水混合之特点。

(2) 各种矿石和热液方解石的稀土配分曲线和 δEu 、 δCe 值均与富轻稀土的碱性-偏碱性岩岩相似而与地层灰岩差别较大, 成矿流体富含稀土、特别是轻稀土元素, 成矿物质来源与岩浆活动有关, 岩浆侵入和矿液上升就位可能是燕山陆内造山阶段同一构造-岩浆-热液体系演化的系列产物。

参考文献

- 1 丁梯平. 硅同位素地球化学. 北京: 地质出版社, 1994.
- 2 李延河, 丁梯平. 硅同位素动力学分馏的实验研究及地质应用. 矿床地质, 1994, 13 (3): 282~288.

(3) 自灰岩→硅化灰岩矿→硅质岩矿, 随着蚀变矿化作用增强, ΣREE 、 ΣLREE 和 ΣHREE 均呈显著增高的变化特点: ΣREE 从 1.97→20.77→54.46 $\mu\text{g/g}$; ΣLREE 从 1.73→17.59→49.09 $\mu\text{g/g}$; ΣHREE 从 0.24→3.18→5.37 mg/g 。热液方解石 ΣREE 也明显高于灰岩。

这些都充分说明成矿作用过程中伴随有大量稀土元素的带入。

(4) 由围岩到矿石, $\Sigma\text{LREE} / \Sigma\text{HREE}$ 、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 及 $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ 等特征参数变化规律也非常明显, 即从灰岩至矿石逐渐升高, 从脉岩到矿石则逐渐降低。

(5) 从稀土配分曲线和 δEu 、 δCe 值看, 岩浆岩和脉岩具较明显的弱-中等 Eu 负异常, δEu 值在 0.58~0.85 之

- 3 魏菊英, 王关玉. 同位素地球化学. 北京: 地质出版社, 1988.
- 4 Holland P T, Beatty D W, Snow G G. Comparative elemental and oxygen isotope geochemistry of jasperoid in the Northern Great Basin: Evidence for distinctive fluid evolution in gold-producing hydrothermal system, *Econ. Geol.*, 1988, 83: 1401~1423.
- 5 Moller P, Morteani G, Schley F. Discussion of REE distribution patterns of carbonatites and alkalic rocks, *Lithos.*, 1980, 13: 171~179.
- 6 Taylor H P, The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition, *Econ. Geol.*, 1974, 69: 843~883.

REE GEOCHEMISTRY AND IMPLICATIONS OF STABLE ISOTOPES IN DASHUI TYPE GOLD DEPOSITS

Yan Shenghao, Wang Anjian, Gao Lan

(Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037)

Zhao Yanqing and Chen Guozhong

(No. 3 Geological Party, Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources, Gannan 747000)

Key words: Dashui type gold deposit, REE, Si-C-O-H isotopes, genesis of ore deposit, Xiqingshan area of Gansu Province

Abstract

Dashui type gold deposit, a new type of deposits recently discovered in west Qinling orogenic belt, has very unique ore-forming characteristics. A systematic study of C-H-O-Si isotopes and REE geochemistry of various geological bodies in the ore district was carried out by the authors. The carbon might have been derived from deep magmatic resources. Silicon isotopes are quite similar to those in magma or magmatic hydrothermal solutions. $\delta^{30}\text{Si}$ values are comparatively low in jasperoid and relatively high and concentrated in siliceous rocks. C-H-O system of fluid inclusions shows that the ore-forming fluid is a mixture of magmatic water and connate water. Calcite and various altered rocks have moderate ΣREE values, which are highest in magmatic rocks and lowest in limestone. $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ ratios of all samples are higher than 1. ΣREE , ΣLREE and ΣHREE tend to increase with the intensification of mineralization. Magmatic rocks show weak to moderate negative anomalies of Eu but have no anomalies of Ce, while limestone exhibits obviously positive anomalies of Eu and negative anomalies of Ce. The REE distribution patterns, δEu and δCe in varied ores are close to those in magmatic rocks but quite different from those in limestone. Thus, both stable isotopes and REE geochemistry indicate that the ore-forming materials mainly came from deep sources closely related to Yanshanian tectono-magmatism, and the shallow tectonic activities, magmatic intrusion or volcanism and hydrothermal eruptions were probably a series of evolutionary products of the regional crust during Yanshanian collisional orogeny.