新疆萨瓦亚尔顿金矿床同位素地球化学特征*

Isotopic Geochemical Features of Sawaya'erdun Gold Deposit, Xinjiang

龙训荣[1] 郑明华[1] 刘家军[2]

（1 成都理工大学地球科学学院，四川 成都 610059；2 中国科学院地球化学研究所，贵州 贵阳 550002）

Long Xunrong[1], Zheng Minghua[1] and Liu Jiajun[2]

（1 Geoscience Academy of Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan ,China；

2 Institute of Geochemstry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China）

摘 要 萨瓦亚尔顿金矿床为国内首例穆龙套型金矿床。本文对其进行了较系统的同位素地球化学研究,铅和硫同位素组成特征（$^{206}Pb/^{204}Pb$=17.965～18.348，$^{207}Pb/^{204}Pb$=15.539～15.749，$^{208}Pb/^{204}Pb$=38.062～39.029，$\delta^{34}S_{CDT}$ 为－3.0‰~～+2.61‰，均值为+0.05‰）反映成矿物质主要来自于深部较老地层和岩石；硅同位素组成（热液石英的 $\delta^{30}Si_{NBS}$ 为－0.5‰~+0.5‰）表明，矿区内沉积岩和岩浆岩均有可能为成矿流体提供必要的硅质；氢、氧同位素组成（$\delta^{18}O_{SMOW}$ 为－11.57‰～+5.73‰，δD_{SMOW} 为－72.2‰～－37.6‰）特征显示，成矿流体（介质）乃通过大气降水补给的地下水。

关键词 同位素地球化学 金矿床 萨瓦亚尔顿

1 地质概况

萨瓦亚尔顿金矿床位于新疆维吾尔自治区南西乌恰县境内，是南天山海西褶皱带金-多金属成矿带中的一个大型金矿床。因其与乌兹别克斯坦的穆龙套金矿床—脉相承，且特征相似，因此，称之为穆龙套型金矿床。此乃国内首例（郑明华等，1998）。

矿区内分布的地层，主体为中-上石炭统（C_{2+3}），一套具复理石建造特征的碎屑岩系；次为下石炭统（C_1）厚层灰岩。矿体呈透镜状、似层状，主要产于中-上石炭统中段（C_{2+3}^{2}）粉砂岩与黑色页岩互层中，受地层层位、岩性和断裂破碎带控制明显（张寿庭等，1998）。

矿石的矿物成分有黄铁矿、毒砂、自然金、银金矿、磁黄铁矿、脆硫锑铅矿、辉锑矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、银黝铜矿、方钴矿、锡石、石英、菱铁矿和方解石等 20 余种。自然金和银金矿等多呈他形粒状或脉状分布于毒砂、黄铁矿、石英等矿物颗粒间隙或微裂隙中。根据矿脉穿插关系、矿物共生组合、矿石组构及矿物流体包裹体研究资料，将矿化过程划分为 5 个阶段，即无矿石英阶段（早阶段）；毒砂黄铁矿-石英阶段（主阶段Ⅰ）；多硫化物-石英阶段（主阶段Ⅱ）；锑-石英阶段和少硫化物-石英-菱铁矿阶段（晚阶段）（龙训荣等，1998）。成矿主阶段也是金的主要析出阶段。

围岩蚀变有硅化、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化等。其中以硅化和黄铁矿化与金矿化的关系最为密切。

2 硫同位素组成特征

对矿床中 30 件硫化物矿物的硫同位素组成分析结果（表 1）表明，矿床中金属矿物的 $\delta^{34}S$ 值变化范

* 国家“九五”重点科技攻关项目（编号：96-915-04-03-01）和国家自然科学基金项目（批号：40073019）资助
第一作者简介：龙训荣，男，1968 年生，副教授，主要从事矿床地质教学与研究。

表 1 萨瓦亚尔顿金矿床硫同位素组成

序号	样 号	样品名称	$\delta^{34}S_{CDT}$/‰	序号	样 号	样品名称	$\delta^{34}S_{CDT}$/‰
1	SⅣ97-1	磁黄铁矿	-0.1	16	SⅠ-11	黄铁矿	-0.1
2	SⅣ97-2	磁黄铁矿	-0.3	17	SⅡ-20-2	黄铁矿	0.2
3	SⅣ97-23	磁黄铁矿	0.2	18	SⅡ-20-1	黄铁矿	0.3
4	S045	脆硫锑铅矿	-3.0	19	SⅡ-41	黄铁矿	0.2
5	SⅡ-19-1	脆硫锑铅矿	-0.8	20	SⅡ-42	黄铁矿	0.2
6	SⅡ-19-2	脆硫锑铅矿	-1.0	21	SⅡ97-3	黄铁矿	0.4
7	SⅡ-19-3	脆硫锑铅矿	-1.0	22	SⅣ97-1	黄铁矿	0.6
8	SⅣ97-27	脆硫锑铅矿	-0.5	23	SⅣ97-2	黄铁矿	0.7
9	S042-1	毒 砂	1.0	24	SⅣ97-11	黄铁矿	0.4
10	SⅡ-41	毒 砂	0.8	25	SⅣ97-8	黄铁矿	0.4
11	S042-1	毒 砂	0.4	26	SⅣ97-23	黄铁矿	0.3
12	S042-1	黄铁矿	0.2	27	SⅣ97-3	黄铁矿	0.5
13	S070-1	黄铁矿	-0.3	28	SⅣ97-30	黄铁矿	2.6
14	S070-2	黄铁矿	-0.2	29	SⅣ97-6	黄铁矿	0.7
15	S070-3	黄铁矿	-0.2	30	SⅣ97-22	辉锑矿	-1.4

注：测试单位：中国地质科学院宜昌地质矿产研究所同位素室，1998。

围较窄（-3.0‰~+2.6‰），极差仅为 5.6‰，平均值+0.1‰，且塔式分布明显。其中毒砂、黄铁矿、磁黄铁矿和脆硫锑铅矿的 $\delta^{34}S$ 平均值分别为+0.7‰、+0.4‰、-0.1‰和-1.3‰，具有 $\delta^{34}S_{毒砂} > \delta^{34}S_{黄铁矿} > \delta^{34}S_{磁黄铁矿} > \delta^{34}S_{脆硫锑铅矿}$ 特点，反映随着成矿作用的进行，从早到晚，形成矿物的 $\delta^{34}S$ 值有降低的趋势，反映矿床成矿环境可能是一种半封闭环境，或硫来自下伏地层中的各类中、基性火山岩或有深源火山硫的补充。鉴于西南天山地区石炭纪下伏各时代地层中均有多层厚大的火山岩层和岩浆岩存在，因而当地下水溶液流经时，萃取了其中的金属和硫等组分，从而成为硫的主要提供者。

3 铅同位素组成特征

鉴于矿石中方铅矿含量少且分散，选取方铅矿单矿物有相当难度，故我们改对金矿石中主要硫化物（毒砂、黄铁矿、磁黄铁矿、辉锑矿和脆硫锑铅矿）、菱铁矿、石英等及容矿围岩的铅同位素组成进行分析，以期取得相关信息。

矿石铅同位素组成（表 2）相当稳定，其中 $^{206}Pb/^{204}Pb$=17.965~18.348，极差 0.383，变化率 2.13%；$^{207}Pb/^{204}Pb$=15.539~15.749，极差 0.210，变化率 1.35%；$^{208}Pb/^{204}Pb$=38.062~39.029，极差 0.967，变化率 2.54%。属于卡农给出的正常铅范畴。但据计算结果，矿石单阶段铅模式年龄（181.95~464.37 Ma）变化较大，反映出矿石铅具多阶段演化的特点。据含铅矿物（脆硫锑铅矿）的同位素组成计算单阶段铅模式年龄为 411.56～464.37 Ma，平均 432.85 Ma，比容矿地层年龄 304.7 Ma（刘家军等，1999）要老约 130 Ma，说明矿石中铅主要来自下伏老地层，这一特点与矿石硫同位素组成特征反映硫源可能主要来自下伏老地层等是一致的。

4 硅同位素组成特征

从矿床中岩石和热液石英的 $\delta^{30}Si$ 值（表 3）可以看出，热液石英的 $\delta^{30}Si$ 值，除 1 件样品为较大正值（+0.5‰）外，其余均在-0.5‰至-0.1‰之间，小于矿区硅质岩和辉绿岩的 $\delta^{30}Si$ 值（+0.1‰~+1.9‰），而与容矿地层中的粉砂岩、细砂岩和碳质千枚岩（板岩）的 $\delta^{30}Si$ 值（-0.2‰~-0.5‰）相近。目前研究表明，$\delta^{30}Si$ 值的变化主要受硅同位素动力分馏作用控制，首先沉淀的硅 $\delta^{30}Si$ 值最低，最后沉淀的硅 $\delta^{30}Si$ 值为一大的正值（丁悌平等，1994）。Clayton（1986）的研究还表明，热水从岩石中淋滤 SiO_2 时，一般不会发生硅同位素的分馏，但当热水中沉淀出 SiO_2 时，则会在沉淀和残留在热水中的 SiO_2 之间发生程度不等的分馏。但当热水温度较高，SiO_2 快速并较完全沉淀时，此种分馏就不明显；反之，当温度较低，SiO_2 缓慢并小比例沉淀时，则 SiO_2 将出现低的 $\delta^{30}Si$ 值。由于萨瓦亚尔顿金矿床的形成温度主要在 140～220℃之间（龙训荣等，1998），故该地区的沉积岩和火山岩均有可能为成矿流体提供必需的硅质。

5　氢氧同位素组成特征

表 2　萨瓦尔顿金矿床铅同位素组成

序号	样　号	名　称	$\frac{^{206}Pb}{^{204}Pb}$	$\frac{^{201}Pb}{^{204}Pb}$	$\frac{^{208}Pb}{^{204}Pb}$	模式年龄/Ma	备　注
1	SⅡ-19-1	脆硫锑铅矿	18.081	15.606	38.312	411.56	测试单位：中国地质科学院宜昌地质矿产研究所同位素室，1998 计算参数： a_0=9.307， b_0=10.294， c_0=29.746； λ_8 =1.55125×$10^{-10}a^{-1}$， λ_5 =9.8485×$10^{-10}a^{-1}$， λ_2 =4.9475×$10^{-10}a^{-1}$； t（地球年龄） =44.3×10^8a （据 Doe，1974）
2	SⅡ-19-2	脆硫锑铅矿	18.136	15.685	38.579	464.37	
3	SⅣ-97-27	脆硫锑铅矿	18.016	15.576	38.173	422.62	
4	SⅣ97-1	磁黄铁矿	18.062	15.592	38.260	408.62	
5	SⅣ97-2	磁黄铁矿	18.096	15.633	38.399	432.50	
6	SⅣ97-23	磁黄铁矿	18.027	15.573	38.208	411.20	
7	Sd6-2	毒　砂	18.116	15.621	38.464	404.30	
8	S042-2	毒　砂	18.054	15.559	38.210	375.14	
9	SⅡ-20-2	毒　砂	17.965	15.553	38.164	432.00	
10	SⅡ-41	毒　砂	18.062	15.584	38.281	399.16	
11	S016-2	黄铁矿	18.165	15.639	38.597	390.68	
12	S042-2	黄铁矿	18.108	15.638	38.452	429.85	
13	SⅠ-11	黄铁矿	18.259	15.749	38.712	451.83	
14	SⅣ97-1	黄铁矿	18.088	15.623	38.364	426.52	
15	SⅥ97-30	黄铁矿	18.348	15.615	39.029	230.83	
16	SⅥ97-23	黄铁矿	18.101	15.627	38.414	421.98	
17	SⅥ97-22	辉锑矿	18.005	15.539	38.100	386.55	
18	S039	菱铁矿	18.002	15.603	38.229	464.18	
19	S026	石　英	18.299	15.947	38.062	181.95	
20	S020	板　岩	18.382	15.637	38.752	233.27	

对 13 件与矿化有密切联系的石英和菱铁矿样品的氢氧同位素（矿物包裹体）组成分析结果(表 4)表明，成矿流体的$\delta^{18}O$和δD值均具有一定的变化范围，其中$\delta^{18}O_{SMOW}$为-11.59‰～+5.73‰，δD为-72.2‰～-37.6‰。将表 4 中的氢、氧同位素数据投影在各种类型水的氢、氧同位素组成图解（Shephard，1977）（袁见齐等，1985）中，发现石英和菱铁矿样品的投点均落在典型岩浆水和变质水之外，且“$\delta^{18}O$漂移”现象明显，表明成矿流体主要为大气降水补给的地下水。且反映了大气降水与岩石氧同位素发生了不同程度交换。

6　结果讨论

综上所述，形成新疆萨瓦亚尔顿金矿床的成矿流体为大气降水补给的地下水。当大气降水下渗入地下深处，受到地热梯度和构造—岩浆活动影响而受热。铅、硫及硅等同位素组成特征表明，在渗流和加热过程中，地下热水溶滤了深部地层和岩石及部分容矿岩系中的成矿物质，导致含矿热流体的形成。当含矿热流体由深部沿压力降低方向运移，进入扩容减压带——中—上石炭统浊积岩系地层的构造破碎带后，流体

的各项物理化学参数发生明显改变（龙训荣，1998），从而引起流体卸载而成矿。

表 **3** 萨瓦尔顿金矿床硅同位素组成

序号	样 品	样品名称	$\delta^{30}Si_{NBS-28}$/‰	序号	样 品	样品名称	$\delta^{30}Si_{NBS-28}$/‰
1	97A74	硅质岩（灰绿）	1.9	8	97SW-1	石 英	-0.1
2	98S-20	硅质岩（黑色）	0.4	9	97SW-2	石 英	-0.4
3	97S-23	辉绿岩	0.1	10	97SW-14	石 英	0.5
4	97A-31	细砂岩	-0.5	11	97SW-32	石 英	-0.1
5	97A-59	粉砂岩	-0.2	12	97SW-21	石 英	-0.5
6	97A-61	岩质板岩	-0.3	13	97SW-16	石 英	-0.1
7	97S-33	硅化金矿石	-0.7				

表 **4** 萨瓦尔顿金矿床氢氧同位素组成

序号	样品	样品名称	$\delta^{18}O_{SMOW}$ /‰	δD_{SMOW} /‰	序号	样品	样品名称	$\delta^{18}O$/‰	δD_{SMOW} /‰
1	97SW-1	石英中包裹体	-1.6	-49.5	10	97SW-35	石英中包裹体	-3.3	-68.2
2	97SW-2	石英中包裹体	-3.0	-42.5	11	S016	石英中包裹体	+5.7	-72.2
3	97SW-12	石英中包裹体	-1.2	-65.1	12	S026	石英中包裹体	+2.2	-58.7
4	97SW-14	石英中包裹体	+2.3	-37.6	13	97SW-21	菱铁矿中包裹体	+2.9	-54.1
5	97SW-16	石英中包裹体	-0.0	-49.7	14	S46	菱铁矿中包裹体	-11.6	-61.6
6	97SW-21	石英中包裹体	-2.0	-54.1	15		标准海水	0	0
7	97SW-31	石英中包裹体		-64.0	16		岩浆水	+6~+9	-40~-80
8	97SW-31	石英中包裹体	-1.5	-69.4	17		变质水	+5~+25	-20~-65
9	97SW-32	石英中包裹体	-1.8	-47.0	18		地下水		$8\delta^{18}O+10$

注：1～14 号样品测试单位：中国地质科学院宜昌地质矿床研究所同位素室，1999；15～18 样品据佐佐木昭资料（袁见齐等，1985）

参 考 文 献

刘家军, 郑明华, 龙训荣, 等. 1999. 新疆萨瓦亚尔顿金矿床赋矿地层时代的重新厘定及其意义[J]. 科学通报, 44(6): 653～656.

龙训荣，郑明华，张寿庭, 等, 1998. 萨瓦亚尔顿穆龙套型金矿床流体包裹体研究[J]. 矿床地质, 17(增刊): 973～976.

袁见齐，朱上庆，瞿裕生. 1985. 矿床学[M]. 北京: 地质出版社. 76～77.

张寿庭，郑明华，龙训荣, 等. 1998. 萨瓦亚尔顿穆龙套型金矿床构造控矿特征[J]. 矿床地质，17(增刊): 961～964.

郑明华，刘家军，龙训荣，等. 1998. 我国首例穆龙套型金矿床的发现[J]. 矿床地质，17(增刊): 381～384.