

山东沂南金矿床成矿物质来源探讨

董树义^{1,2}, 顾雪祥¹, 李科³, 刘丽¹, 章永梅¹, 程文斌¹

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059; 3. 四川省冶金地质勘查院, 成都 610051)

摘要:矿床宏观特征、矿体产出状态、围岩蚀变、矿石组构及矿物组合特征等,均清楚表明沂南金矿床是一个典型的夕卡型矿床。本文通过对矿床铅、硫、碳、氧、氢等同位素特征的研究,探讨了成矿物质来源。矿石铅同位素组成显示异常铅特征,在连续增长模式下,放射性铅同位素源区年龄为 2390 Ma,与区域花岗-绿岩带固结时间相当。 μ 值介于 9.56~12.17 之间,显示金属成矿元素主要源自地壳,少量来自地幔。Th/U 值集中在 3.30~3.62 之间,接近于上地壳 Th/U 值,表明晚太古代晚期~早元古代壳-幔相互作用形成的花岗-绿岩带(泰山群)是沂南金矿床的主要矿源层。硫、碳同位素特征表明矿石中的硫和碳主要源自深源岩浆。氢、氧同位素组成显示成矿流体主要为岩浆热液,在成矿晚期有不同程度的大气降水混入。

关键词:同位素特征;成矿物质来源;花岗-绿岩带;成矿流体;沂南金矿床

中图分类号:P611;P618.51 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9250(2010)03-0295-09

成矿物质来源一直是矿床成因研究的核心问题之一,也是成矿预测的基础^[1]。

山东沂南金矿床,在其 50 余年的采矿实践中,积累了丰厚的第一手资料,但缺乏对矿床成因及基于成因的成矿预测和成矿规律研究工作,近年来其接替资源面临严重危机。本文在对沂南金矿床区域成矿背景和矿床地质特征分析的基础上,研究了铅、硫、碳、氧、氢同位素特征,探讨了矿床的成矿物质来源。

1 区域成矿背景

山东省位于华北板块的东南缘,其构造分区以郯庐断裂带中段的沂沭断裂带为界,断裂带两侧分别为鲁东和鲁西地区^[2]。沂南金矿床所属的鲁西地区属华北地台的一部分,具双层结构,由前寒武纪结晶基底和其上的沉积盖层组成。基底主要为太古宙混合花岗岩、片麻岩等变质岩,盖层则由古生代、中生代和新生代碳酸盐岩和碎屑岩组成^[3]。

鲁西地区经历了多期构造运动,发育各种面状、线状构造及韧性剪切带,形成了多组不同方向、不同

规模的断裂构造体系,并以 NW、NE 向两组最为发育,是该区的基本断裂构造^[2](图 1)。

鲁西地区岩浆活动频繁,以早前寒武纪侵入岩为主体,出露面积约占鲁西岩浆岩总面积的 95%,并与残存的泰山岩群、沂水岩群共同构成结晶基底^[2, 6-7]。中生代侵入岩以燕山期为主,大多处于断陷的边缘及构造的交会部位,呈岩株、岩床及岩脉组成的杂岩体,与金、铁、铜矿化关系极为密切(图 1)。

2 矿床特征

沂南金矿床位于鲁西隆起东缘,东邻沂沭断裂带最西侧主干断裂——郯郟—葛沟断裂,由相距 6km 的铜井、金场两个矿区组成(图 1)。

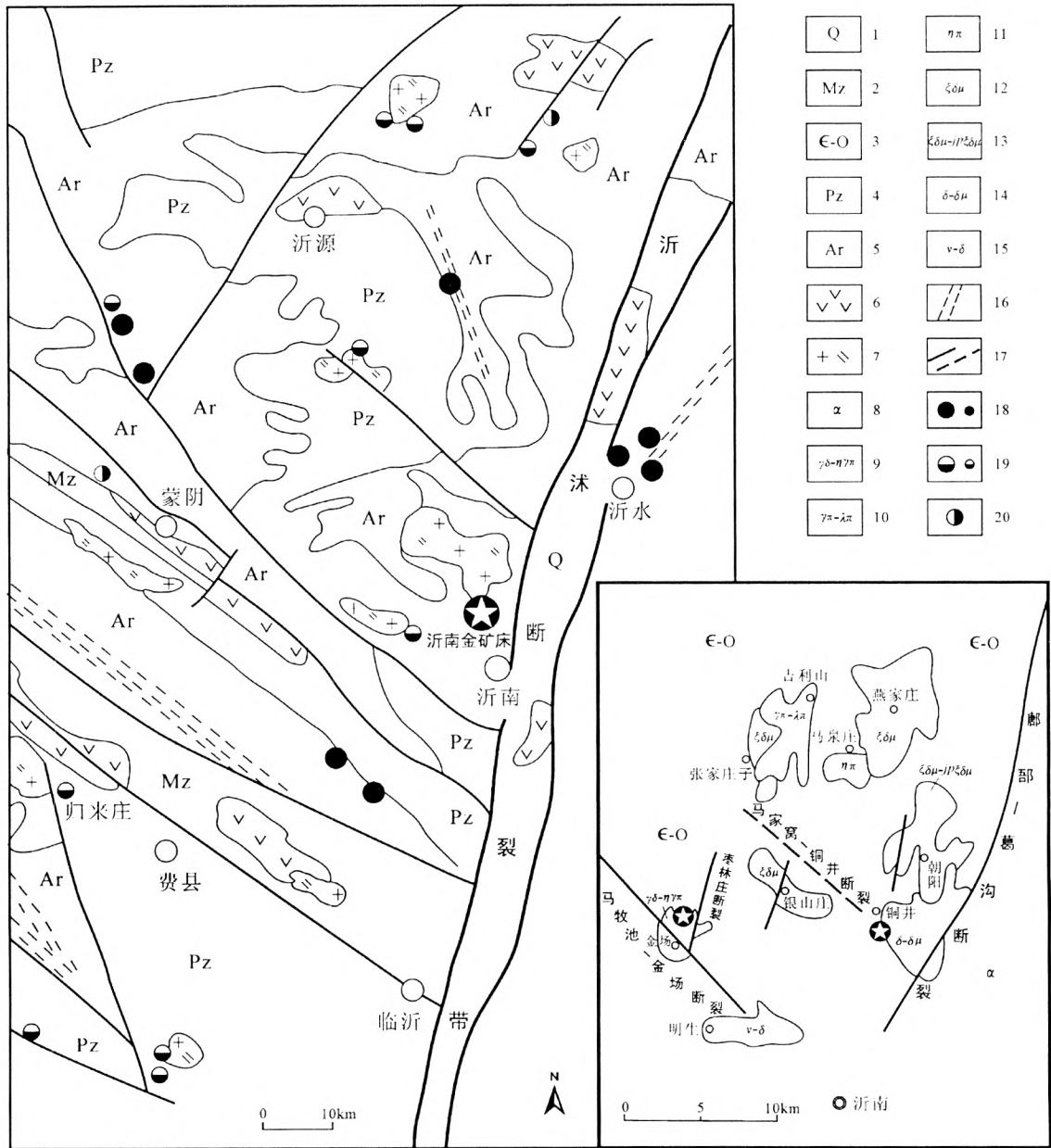
2.1 地层

矿区内地层有新太古界泰山岩群雁翎关组(Ar_{3y})、新元古界土门群佟家庄组(Zt)、寒武系下一中统长清群($\epsilon_{1-2}\hat{C}$)和寒武系中上统一奥陶系下统九龙群(ϵ_2O_1J),其中新太古界雁翎关组为结晶基底,新元古界和寒武系地层构成盖层,盖层与结晶基底之间呈角度不整合接触。

收稿日期:2010-03-18;改回日期:2010-06-15

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2009CB421003-01)、国家自然科学基金(40772060, 40930423)、高等学校学科创新引智计划(B07011)、长江学者和创新团队发展计划、中国地质调查局危机矿山接替资源找矿项目(200637035)资助

第一作者简介:董树义(1973—),男,博士,讲师,从事矿床学研究及矿产资源调查与评价。E-mail:dongshuyi@126.com



1-第四系;2-中生代碎屑沉积岩;3-寒武-奥陶系地层;4-古生代沉积碳酸盐岩;5-前寒武纪结晶基底;6-中生代火山盆地;7-中生代侵入岩;
 8-安山岩;9-花岗闪长岩~二长花岗斑岩;10-花岗斑岩~石英斑岩;11-二长斑岩;12-石英斑岩;13-正长闪长玢岩~聚斑正长闪长玢岩;
 14-闪长岩~闪长玢岩;15-辉长岩~闪长岩;16-韧性剪切带;17-实测及推测断裂;18-变质热液金矿床及金矿点;
 19-侵入岩型热液金矿床及金矿点;20-火山热液金矿点

图1 鲁西及沂南金矿床周边地质矿产简图(据文献[4]、[5]修改)

Fig. 1 Simplified geology and gold mineral deposits map surrounding the Yi'nan Au deposit in Western Shandong area (modified from ref. [4] and [5])

太古宇基底岩石主要为花岗片麻岩、斜长角闪岩、角闪变粒岩等,由一套钙镁铁质火山沉积岩系经中高级区域变质作用形成。新元古界土门群佟家庄组为一套浅海相沉积,底部为灰白色中细粒砂岩、含砾砂岩,中上部为灰黄、灰紫色页岩夹薄层泥灰岩。

寒武系长清群自下而上由李官组($\epsilon_1 l$)、朱砂洞组($\epsilon_1 z$)和馒头组($\epsilon_{1-2} m$)组成,主要为一套细碎屑岩、钙质泥岩、页岩与薄层泥灰岩、鲕状灰岩、砂屑灰岩、白云质灰岩的互层;寒武-奥陶系九龙群自下而上包括张夏组($\epsilon_2 z$)、崮山组($\epsilon_3 g$)、炒米店组

($\epsilon_3\epsilon$)和三山子组(ϵ_3O_1s),岩性以薄层灰岩、竹叶状灰岩、鲕粒灰岩、生物碎屑灰岩和泥质白云岩为主,局部夹页岩。

上述地层,除长清群朱砂洞组、馒头组和九龙群张夏组、崮山组部分出露地表外,其他地层均埋藏于深部。不整合面之上的各组地层,以燕山期中酸性杂岩体为中心向四周缓倾斜。远离岩体,地层产状趋于水平,显示出穹隆构造特点。

2.2 构造

区内构造以断裂为主,以多期、多阶段活动为特征,其次为穹隆及其相关构造。

铜井矿区的断裂构造主要有NW、NNE和EW向三组,其中以NNE向断层最为发育,构成区内基本构造轮廓(图1)。NW向断层主要出露于矿区北部和西部,走向 $300^\circ\sim 345^\circ$,倾向多为SW,倾角 $65^\circ\sim 90^\circ$,区域上称为马家窝—铜井断裂。NNE向组断层具出露广泛、规模大、活动时间长以及力学性质复杂等特征,走向 $10^\circ\sim 40^\circ$,倾向多为NW,倾角 $62^\circ\sim 90^\circ$,区域上称为郟郟—葛沟断裂。EW向组断层主要发育在东部堆金山矿段,规模中等,走向 $80^\circ\sim 95^\circ$,倾向N,倾角 $70^\circ\sim 80^\circ$ 。EW向断层多错动了NW和NNE向断层,显示其活动时间较晚。

金场矿区的断裂构造有NW、NNE(NE)、EW和SN向四组(图1),以NW、NNE(NE)向断裂最为发育。NW向断裂构成一组向NW撒开,往SE收敛的弧形断裂带(马牧池—金场断裂带)。断裂带断续出露长约7 km,平均宽约80 m,由四条大致平行的断层组成,其中F1、F2断层规模较小,仅在矿区北部出露;F3、F4断层斜贯矿区,走向 $310^\circ\sim 330^\circ$,倾向SW,倾角 $75^\circ\sim 85^\circ$ 。NNE(NE)向断层在区域上称为枣林庄—金场断裂带,走向 20° ,倾向SE,倾角约 80° 。EW向断裂主要表现为张性破碎带,长约140~260 m,宽2~7 m,走向 275° ,倾向 185° ,倾角约 70° 。SN向断裂主要出露于矿区西部,多被闪长玢岩脉侵位愈合。

2.3 岩浆岩

矿区燕山期中酸性岩浆活动频繁,形成多期次侵入的杂岩体,其主要侵位于NW向与NNE向断裂的交会处(图1)。铜井矿区与成矿有关的铜井杂岩体呈岩株状侵位于NW向马家窝—铜井断裂与NNE向郟郟—葛沟断裂交叉部位,其边缘有似层状

或舌状岩床侵入围岩中,地表形态不规则,出露面积约为 4.4 km^2 。在地表,主要出露石英闪长玢岩。地下较深处杂岩体西部以石英闪长岩为主,东部主要为石英闪长玢岩。

金场矿区与成矿有关的金场杂岩体位于NW向马牧池—金场断裂与NNE向枣林庄—金场断裂的交会处(图1),由复式岩颈和岩枝组成,西部为金场复式岩颈,东部为冶官墓岩枝,杂岩体周围分布有环状、放射状岩脉群。金场复式岩颈地表呈浑圆形,面积约 0.2 km^2 ,中心为斑状中细粒二长花岗岩,周边镶有花岗斑岩环(全岩K—Ar年龄为 $121\text{ Ma}^{(1)}$),再向外则过渡为岩脉和岩墙。

2.4 矿体特征

矿体主要赋存于铜井和金场杂岩体的接触带及其外侧围岩中的构造薄弱带(不整合面、层间破碎带、滑脱带)以及顺层侵入的岩床(岩舌)内部及其上下两侧,在岩体外200~300 m范围内环绕岩体呈环带状产出。共有8个含矿层位、14层矿体,其中寒武系地层中产有6个含矿层、12层矿体。矿体形态复杂,多呈似层状、扁豆状、透镜状、囊状或不规则状;一般走向延长140~200 m,倾向延深100~150 m;厚度变化大,平均变化于0.5~11.6 m。矿体的平均品位: Au $1\times 10^{-6}\sim 5\times 10^{-6}$, Cu 0.5%~0.8%, TFe 27%~33%。

矿石中主要金属矿物有自然金、黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿、斑铜矿、镜铁矿,非金属矿物主要为石榴石、透辉石、绿帘石、绿泥石、石英、方解石等。矿石结构以粒状的自形晶、半自形晶、他形晶结构为主,次为交代残余结构、包含结构、骸晶结构、假象结构、压碎结构等。矿石构造主要有块状、浸染状、脉状—网脉状、条带状和角砾状构造等。矿石类型有磁铁矿型、含金铜磁铁矿型、含金铜夕卡岩型、含金铜大理岩型和含金铜角岩型5类。矿石中除主要有用组分Au、Cu、Fe外,还含有少量Co、S等组分可综合回收利用。

与成矿作用有关的围岩蚀变十分发育,主要有热接触变质(角岩化、大理岩化)、接触双交代(夕卡岩化)和热液蚀变(硅化、绿泥石化、碳酸盐化、钾长石化、钠长石化、绢云母化、石膏化等)3类,广泛分布于杂岩体与围岩接触带及其附近层间破碎带和不整合面上下,蚀变范围距接触带可达200~300 m

^① 万天丰,郑子恒,郑宽喜,等. 铜井、金场矿田成矿规律与成矿预测研究报告. 1992.

以上。

上述特征清楚表明,沂南金矿床应属夕卡岩型矿床。

3 样品分析方法与结果

用于测试分析的样品绝大多数采自于铜井矿区、金场矿区不同采矿中段掌子面及钻孔岩心,少量采自于地表新鲜岩石。测试单位为核工业北京地质研究院分析测试研究中心和中国地质科学院矿产资源研究所稳定同位素实验室。

矿石铅同位素的测试矿物为黄铁矿和黄铜矿,经研磨过筛→溶样、蒸干→溶解、铅分离、蒸干等过

程后,用热表面电离质谱法进行铅同位素测定,仪器型号为 ISOPROBE-T。分析结果及计算所得的相关参数见表 1^[8-10]。

矿石硫同位素组成通过测定 SO₂ 获得。将硫化物单矿物和氧化亚铜按一定的比例(黄铁矿为 1:10,黄铜矿为 1:8)研磨,并在高温处理好的瓷舟中混合均匀,装入石英管,在真空 2.0×10^{-2} Pa 状态下加热(反应温度为 980℃),进行氧化反应,生成 SO₂,用冷冻法收集,并用 MAT251 气体同位素质谱仪分析硫同位素组成,测量结果以 CDT 为标准。分析结果见表 2。

表 1 沂南金矿床矿石铅同位素组成及相关参数

Table 1 Ore lead isotopic compositions and correlation parameter in the Yi'nan Au deposit

样品号	矿物	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	μ	Th/U	Δβ	Δγ
TJ30-12	黄铜矿	19.568	15.746	39.303	9.65	3.54	27.37	54.18
Kg30-8	黄铜矿	20.131	15.841	39.744	9.80	3.47	33.56	66.01
KS10-4	黄铜矿	21.217	16.016	40.027	10.52	3.21	44.98	73.60
KS50V12	黄铜矿	19.510	15.749	39.457	9.66	3.62	27.56	58.31
MW280-B1	黄铜矿	19.391	15.776	38.749	9.72	3.42	29.32	39.32
ZK67-1-22	黄铜矿	19.043	15.703	38.398	9.61	3.43	24.56	29.91
TJ30-12	黄铁矿	20.904	15.953	40.036	10.25	3.30	40.87	73.84
KS50-12	黄铁矿	19.252	15.687	39.127	9.56	3.61	23.52	49.46
ZK66-1-42	黄铁矿	21.683	16.110	40.170	10.93	3.14	51.12	77.43
ZK24-20-107	黄铁矿	23.083	16.298	41.455	12.17	3.15	63.38	111.90

表 2 沂南金矿床中黄铁矿、黄铜矿的硫同位素组成

Table 2 Sulfur isotopic composition of pyrite and chalcopyrite in the Yi'nan Au deposit

样品号	采样位置	测定对象	δ ³⁴ S (‰, CDT)
TJ30-12	铜井汞泉矿段-30 m 中段	黄铁矿	2.52
KS50-12	铜井山子洞矿段-50 m 中段	黄铁矿	3.57
ZK66-1-42	金场 ZK66-1 钻孔 532.1 m 处	黄铁矿	3.53
ZK24-20-107	金龙 ZK24-20 钻孔 665.9 m 处	黄铁矿	2.95
DJSB3-2	堆金山矿石	黄铁矿	1.53
TJ30-12	铜井汞泉矿段+30 m 中段	黄铜矿	2.72
Kg30-8	铜井汞泉矿段+30 m 中段	黄铜矿	4.27
KS10-4	铜井山子洞矿段-10 m 中段	黄铜矿	2.55
KS50-12	铜井山子洞矿段-50 m 中段	黄铜矿	4.12
MW280-B1	金场马旺矿段-280 m 中段	黄铜矿	3.03
ZK67-1-22	金场 ZK67-1 钻孔 473.1 m 处	黄铜矿	3.84
DJSB3-2	堆金山矿石	黄铜矿	2.00

碳、氧同位素组成通过测定 CO₂ 得到。在真空中,样品与 100% 的磷酸在 25℃ 恒温条件下反应 4 h 以上,用冷冻法分离生成的水,收集纯净的 CO₂ 气体,并在 MAT251 质谱仪上进行测定,碳、氧同位素测定结果分别以 PDB 和 SMOW 为标准。分

析结果见表 3。

矿物的氧同位素分析采用 BrF₅ 法^[11],矿物流体包裹体水氢同位素分析采用爆裂法取水、锌法制氢,爆裂温度为 550℃,采用的质谱仪为 MAT253,分析结果均以 SMOW 为标准。分析结果见表 4。

4 讨论

4.1 金属矿物质来源

铅同位素是示踪矿床金属成矿物质来源的有效手段。由表1看出,沂南金矿床矿石铅同位素组成变化大。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造环境演化图上,样点均位于上地壳演化曲线之外。在 207

$\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 坐标图上,样点构成一条相关系数达0.997的直线,说明矿石铅为混有放射性成因铅的异常铅^[12-13],符合Stacey-Kramers^[14]两阶段铅演化模式,设异常铅线与普通铅线上交点所代表的矿化年龄值为120 Ma^Q,计算出其在连续增长模式下^[15]的放射性铅同位素源区年龄为2390 Ma^[16]。

表3 沂南金矿床全岩及单矿物的碳-氧同位素组成

Table 3 Carbon and oxygen isotopic compositions of whole rock and individual mineral

测试矿物 (岩石)	样品编号	采样位置	$\delta^{13}\text{C}$ PDB (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ OPDB (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ SMOW (‰)
方解石	TJ16-5	铜井矿区山子涧矿段+16m中段	0.29	-19.51	9.00
	JYG330-B13	金场矿区冶官基矿段-330中段	-1.69	-19.79	9.61
	KS10-10	铜井矿区山子涧矿段-10m中段	0.71	-18.88	10.55
	S10-8	铜井矿区山子涧矿段-10m中段	-1.69	-16.79	12.70
	TJ16-11	铜井矿区山子涧矿段+16m中段	-3.85	-16.75	12.74
大理岩	S10-5	铜井矿区山子涧矿段-10m中段	-1.17	-18.54	10.90
	TJ16-15	铜井矿区山子涧矿段+16m中段	-5.31	-18.15	11.30
	JYG330-B14	金场矿区冶官基矿段-330中段	-3.02	-14.56	15.00
蚀变灰岩	TJ16-14	铜井矿区山子涧矿段+16m中段	-2.36	-12.92	16.69
灰岩	B2070	金场矿区地表	0.06	-8.72	21.02
	B1057	铜井矿区地表	0.26	-8.70	21.04

表4 沂南金矿床岩石、矿物和流体包裹体的氢氧同位素组成

Table 4 Hydrogen and oxygen isotopic compositions of rocks, minerals and fluid inclusion water

样品号	测试矿物 (岩石)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$	$\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ (‰, SMOW)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ (‰, SMOW)	形成温度 (℃)	形成阶段
S10-12	石英闪长玢岩	15.7				
S10-10	石英闪长玢岩	17.4				
KG16-9	石榴石	5.4	-73	6.8	430	干砂卡岩阶段
KS10-12	磁铁矿	4.6	-107	8.3	340	湿砂卡岩阶段
MW280-B1	磁铁矿	4.6	-112	8.0	330	湿砂卡岩阶段
KG16-9	镜铁矿	2.2	-82	7.9	300	氧化物阶段
KS10-2	镜铁矿	6.0	-84	11.6	290	氧化物阶段
KS10-10	方解石	10.55	-72	-2.9	140	石英-硫化物阶段
S10-8	方解石	12.70	-67	-2.4	120	石英-硫化物阶段

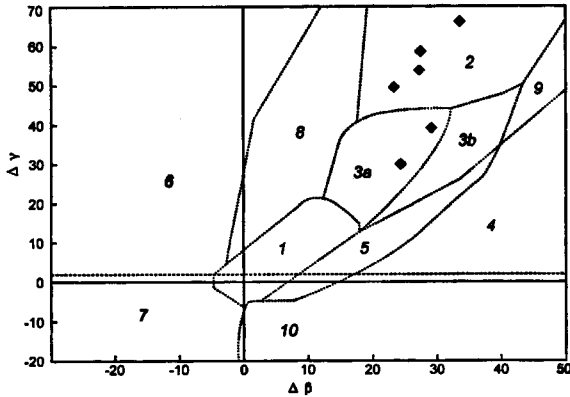
表1中, μ 值小于9.58($\mu=9.58$ 为地壳铅平均演化曲线)的样品较少(1个),其余则介于9.65~12.17之间,显示铅多源于地壳,少量为幔源铅^[8, 10, 14, 17]。Th/U值多集中在3.30~3.62之间,接近于上地壳Th/U值^[18]。将 $\Delta\gamma$ 和 $\Delta\beta$ 值投在矿石铅同位素的 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因分类图解(图2)上^[19],多数样点集中在上地壳源区(2)中,少量分布在与岩浆作用有关的壳-幔混合区(3a),同样表明铅主要为地壳来源。

形成于2800~2700 Ma的鲁西绿岩带(泰山群)在晚太古代晚期(约2500 Ma)发生大规模的壳

幔交换作用,经历了岩浆侵入、先成陆壳重熔、变质等过程^[6, 20-23],由此推断,很可能到早元古代早期,花岗-绿岩带最终形成并固结,成为刚性块体。上述计算得出放射性铅同位素源区年龄与鲁西花岗-绿岩带固结时间相当,表明放射性成因的铅来自花岗-绿岩带型结晶基底,暗示沂南金矿床金属矿物质来源于泰山群雁翎关组地层,与鲁西诸多内生金属矿床具有相同(或相似)的矿源层^[30-38]。

4.2 硫的来源

沂南金矿床主要硫化矿物为黄铜矿和黄铁矿,主要成矿阶段(石英硫化物阶段)无硫酸盐矿物。由



1-地幔来源铅;2-上地壳来源铅;3-上地壳与地幔混合的俯冲带铅 (3a-岩浆作用;3b-沉积作用);4-化学作用沉积铅;5-海底热水作用铅;6-中深变质作用铅;7-变质作用下地壳铅;8-造山带铅;9-古老页岩上地壳铅;10-退变质铅

图2 沂南金矿床矿石铅同位素 $\Delta\gamma-\Delta\beta$ 成因分类图

Fig. 2 $\Delta\gamma-\Delta\beta$ diagram of genetic classification by ore lead isotopes in the Yi'nan Au deposit

表2可以看出硫同位素组成变化范围窄, $\delta^{34}\text{S}$ 峰值分布在2‰~4‰之间, 呈明显的塔式分布^[13], 表明硫同位素分馏基本达到平衡且来源较单一, 硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值的平均值可大致代表热液的总硫同位素组成^[39], 即约为3‰, 反映了矿石中的硫总体具有岩浆硫的特征。通过两端元简单混合模式计算出围岩地层中的海水硫酸盐硫的贡献 < 20% (5%~18%)^[40], 表明硫主要来源于深源岩浆。

4.3 碳的来源

表3列出了沂南金矿床石英-硫化物阶段热液成因方解石、近矿围岩大理岩、井下蚀变灰岩和地表未蚀变灰岩的碳、氧同位素组成, 氧同位素的分析标准为PDB。据Friedman et al. (1977)^[41]的公式 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = 1.03086\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} + 30.86$ 可换算获得 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值。由表3可看出, 热液成因方解石、热接触变质作用形成的大理岩和蚀变灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值既不同于岩浆碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-5‰~-8‰), 也不同于海相碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值(约0‰), 表明它们很可能是岩浆碳与碳酸盐碳按不同比例混合的产物。

在 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 关系图^[42, 43]上(图3)可以看出, 采于地表的2个未蚀变灰岩样品, 其投点完全落在正常海相碳酸盐岩值的范围内; 于开采中段采集的1件蚀变灰岩样品落于花岗岩与海相碳酸盐之间; 3个热接触变质作用形成的大理岩样品中有2个完全落在了花岗岩范围内, 1个远离其源岩区(海相碳酸盐岩)而靠近花岗岩区; 形成于石英-硫化物

阶段与载金矿物黄铜矿、黄铁矿共生的5个热液成因方解石样品中有3个落在花岗岩源区范围之内, 其余2个样品落在花岗岩与海相碳酸盐岩之间, 但明显靠近花岗岩区。上述特征清楚地显示, 随蚀变矿化作用的增强, 岩浆水与围岩(碳酸盐岩)间的同位素交换作用增强, 岩浆碳的比例逐渐增高, 表明成矿流体中的碳主要来自岩浆, 可能有少量来自海相碳酸盐岩的溶解作用, 可与国内长江中下游铜陵马山金硫矿床^[44]和铜陵小铜官山铜金矿床^[45]等典型夕卡岩型金矿床类比。

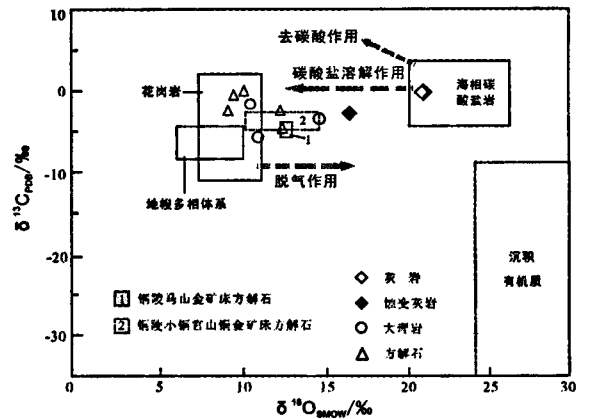


图3 沂南金矿床及相关典型夕卡岩金矿床全岩及单矿物 $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$ 图(据文献^[42]和^[43])

Fig. 3 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ versus $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ diagram of whole rock and individual mineral on Yi'nan and other typical skarn deposits (from ref. ^[42] and ^[43])

4.4 成矿流体来源

表4列出了沂南金矿床中不同成矿阶段热液矿物的氧同位素组成和包裹体水的氢同位素组成, 成矿流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值根据矿物-水的氧同位素分馏方程^[46]和流体包裹体均一温度计算获得。

由表4看出, 沂南金矿床代表干矽卡岩阶段的1件石榴石样品中包裹体水的氢氧同位素组成 ($\delta\text{D} = -73\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 6.8\text{‰}$) 位于正常岩浆水 ($\delta\text{D} = -80\text{‰} \sim -40\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 5.5\text{‰} \sim 9.0\text{‰}$);^[47] 范围内。代表湿矽卡岩阶段的2件磁铁矿样品中包裹体水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值 (8.0‰~8.3‰) 也具岩浆水特征, 而 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值偏低, 为-112‰~-107‰, 明显偏离与其他矿物平衡的水的 δD 值, 但与张理刚^[48]定义的初始混合岩浆水的氢氧同位素组成相似 ($\delta\text{D} = -110\text{‰} \sim -65\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 6.0\text{‰} \sim 9.0\text{‰}$), 表明此阶段很可能有少量天水的混入。成矿晚期石英-硫化物阶段及碳酸盐阶段石英和方解石的 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值 (-

87‰~ -67‰)仍具岩浆水特征,但 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值(-2.9‰~-0.4‰)较低,显示出具“ $\delta^{18}\text{O}$ 漂移”的大气降水成矿热液特征,表明此阶段的成矿热液为岩浆水与大气降水的混合热液。总体来说,成矿流体早期以岩浆水为主,晚期有大气降水的混入,这与国内外典型砂卡岩型铜金矿床的成矿流体特征相似^[49]。

5 结 论

在对矿床地质特征分析的基础上,结合上述铅、硫、碳、氧、氢等同位素的分析,得出如下结论:

1)沂南金矿床金属成矿元素来源于花岗—绿岩带型结晶基底——泰山群雁翎关组地层。

2)硫主要来源于深源岩浆,寒武纪围岩地层中的海水硫酸盐硫的贡献不足20%。

3)碳主要来自岩浆,少量来自海相碳酸盐岩的溶解作用。

4)各成矿阶段的成矿流体主要为岩浆热液,晚期阶段有不同程度的大气降水混入。

野外工作期间承蒙山东沂南金矿杜树浩矿长,刘清德书记,陈贵亮副矿长,胡贵增总地质师,焦鹏、王炳勤、朱仁乐、赵丙成等工程师大力帮助。一同参加野外工作的还有向中林讲师、陶涛硕士、王艳慧硕士、刘莉莉硕士和朱经经硕士等,在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] 周作侠. 内生金属成矿物质来源及其受断块构造控制特征[J]. 科学通报, 1979, 20: 931-934.
- [2] 刘玉强, 李洪喜, 黄太岭, 等. 山东省金铁煤矿床成矿系列及成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [3] 金振奎, 刘泽容, 石占中. 鲁西地区断裂构造类型及其形成机制[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1999, 23(5): 1-5.
- [4] 赵鹏大, 陈永清. 基于地质异常单元金矿找矿有利地段圈定与评价[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1999, 24(5): 443-448.
- [5] 郑子恒, 王炳勤. 铜井地区岩浆岩及含金铜多金属矿[A]. 山东沂南金矿“科技论文选集”[C]. 1989, 1-9.
- [6] 王世进. 鲁西地区前寒武纪侵入岩[J]. 山东地质, 1990, 6(1): 59-81.
- [7] 王小凤, 李中坚, 陈柏林, 等. 郯庐断裂带[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- [8] 沈渭洲, 黄耀生. 稳定同位素地质[M]. 北京: 原子能出版社, 1987.
- [9] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33(5): 459-464.
- [10] Doe B R, Zartman R E. Plumbotectonics 1. the phanerozoic[A]. Barnes H L. Geochemistry of hydrothermal ore deposits 2nd. Ed[M]. Wiley Interscience, 1979, Chap 2: 22-70.
- [11] Clayton R N. The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1963, 27(1): 43-52.
- [12] 董树义. 山东沂南金矿床成因与成矿规律和成矿预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.
- [13] 李科, 顾雪祥, 董树义. 山东沂南金铜铁矿床同位素地球化学研究[J]. 矿床地质, 2009, 28(1): 93-103.
- [14] Stacey J S, Kramers J D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1975, 26(2): 207-221.
- [15] Faure G, Mensing T M. Isotopes: principles and applications (Third Edition)[M]. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [16] S. Y. Dong, X. X. Gu, K. Li, *et al.* Discussion on the source of ore-forming materials of the Yinan gold deposit, Shandong. Earth Science Frontiers [J], 2009, 16: 217.
- [17] Doe B R, Stacey J S. The application of lead isotopes to the problems of ore genesis and ore prospect evolution: A review [J]. Economic Geology, 1974, 69(6): 757-776.
- [18] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics-The model[J]. Tectonophysics, 1981, 75 (1-2): 135-162.
- [19] 朱炳泉, 李献华, 戴植谟, 等. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [20] 侯贵廷, 李江海, 金爱文, 等. 鲁西地块早前寒武纪构造—岩浆活动区划及演化的新认识[J]. 高校地质学报, 2004, 10(2): 239-249.
- [21] 王世进. 鲁西地区前寒武纪侵入岩期次划分及基本特征[J]. 中国区域地质, 1991, 4: 298-307, 297.

- [22] 庄育勋,王新社,徐洪林,等. 泰山地区早前寒武纪主要地质事件与陆壳演化[J]. 岩石学报,1997,13(3):313-330.
- [23] 王世进,万喻生,张成基,等. 鲁西地区早前寒武纪地质研究新进展[J]. 山东国土资源,2008,24(1):10-20.
- [24] 王世进. 鲁西地区早前寒武纪地质构造[J]. 中国区域地质,1993,(3):216-222.
- [25] 徐惠芬. 鲁西绿岩带的 PTt 轨迹[J]. 矿物岩石地球化学通报,1991,(1):21-23.
- [26] 张增奇. 鲁西早前寒武纪花岗岩——绿岩地体稀土元素地球化学[J]. 山东地质,1991,7(2):76-88.
- [27] 庄育勋,徐洪林,王新社,等. 泰山地区新太古代——古元古代地壳演化研究的新进展[J]. 中国区域地质,1995,(4):360-366,352.
- [28] 杨淳,宋彪,潘森,等. 鲁西蒙山山脉中段早前寒武纪花岗岩质岩石岩石学和单锆石年龄[J]. 地球学报,1997,18(3):324-329.
- [29] 侯贵廷,王传成,王延欣,等. 鲁西蒙山新太古代末闪长岩体的区域构造意义——SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学证据[J]. 高校地质学报,2008,14(1):22-28.
- [30] 陈常富,郭志远,胡京宇,等. 山东沂南金厂金铜矿床构造、岩浆演化与成矿模式[J]. 地质找矿论丛,1995,10(1):9-14.
- [31] 万天丰. 山东省构造演化与应力场研究[J]. 山东地质,1992,8(2):70-101.
- [32] 亓润章. 鲁西前寒武纪地层划分及含铁建造地质特征[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊,1984,5(3):57-84.
- [33] 张拴宏,周显强. 鲁西绿岩带金矿床绢云母氩同位素年龄及其地质意义[J]. 有色金属矿产与勘查,1999a,8(3):164-166.
- [34] 张拴宏,周显强,田晓娟. 鲁西地区绿岩带金矿床铅同位素研究[J]. 矿物岩石,1999b,19(2):72-76.
- [35] 陈永清,赵鹏大,刘红光. 鲁西金矿成矿组分的聚集与演化[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2001,26(1):41-48.
- [36] 司双印,孙茂田. 鲁西地区太古宙绿岩带硫铁矿床地质特征及成矿机制[J]. 化工矿产地质,2001,23(2):87-92.
- [37] 王虹,霍光辉,王宝君. 山东鲁西地区绿岩带型金矿床特征及成因浅析[J]. 地质力学学报,2005,11(4):350-356.
- [38] 徐述平,杨立强,高帮飞. 鲁西地区金矿类型与找矿方向[J]. 黄金科学技术,2007,15(5):18-23.
- [39] Ohmoto H, Rye R O. Isotopes of sulfur and carbon [A]. In: Barnes H L, ed. Geochemistry of hydrothermal ore deposits [C]. New York: John Wiley & Sons, 1979, 509-567.
- [40] Hoefs J. Stable isotope geochemistry (the fourth edition) [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1997, 119-120.
- [41] Friedman I, O'Neil J R. Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest[A]. In: Fleischer M, ed. U. S. Geological professional paper [C]. Washington: U. S. Govst. Print. Off, 1977, 440.
- [42] 刘建明,刘家军. 滇黔黄金三角区微细浸染型金矿床的盆地流体成因模式[J]. 矿物学报,1997,17(4):448-456.
- [43] 刘家军,何明勤,李志明,等. 云南白秧坪银铜多金属矿集区碳氧同位素组成及其意义[J]. 矿床地质,2004,23(1):3-6.
- [44] 田世洪,侯增谦,杨竹森,等. 安徽铜陵马山金硫矿床稀土元素和稳定同位素地球化学研究[J]. 地质学报,2007,81(7):929-938.
- [45] 田世洪,丁梯平,侯增谦,等. 安徽铜陵小铜官山铜矿床稀土元素和稳定同位素地球化学研究[J]. 中国地质,2005,32(4):604-612.
- [46] 郑永飞,陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京:科学出版社,2000:143-245.
- [47] Taylor H P. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition [J]. Econ. Geol., 1974, 69 (6): 843-883.
- [48] 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1985:152-185.
- [49] 顾雪祥,刘丽,董树义,等. 山东沂南金铜铁矿床中的液态不混溶作用与成矿:流体包裹体与氢氧同位素证据[J]. 矿床地质,2010,29(1):43-57.

A Discussion on the Sources of Ore-forming Material of the Yi'nan Gold deposit, Shandong Province

DONG Shu-yi^{1,2}, GU Xue-xiang¹, LI Ke³, LIU Li¹,
ZHANG Yong-mei¹, CHENG Wen-bin¹

(1. College of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3. Sichuan Institute of Metallurgical Geology and Exploration, Chengdu 610051, China)

Abstract: The Yi'nan gold deposit can be defined a skarn deposit on the base of these characteristics of macrofeature, occurrence of ore body, wallrock alteration, ore fabric and mineral assemblage et al. Based on the main characteristics of the lead, sulfur, carbon, oxygen and hydrogen isotope of the Yi'nan gold deposit, the sources of the ore-forming material are discussed in this paper. Lead isotopic composition was characterized by anomalous lead. While in continuous growth model, the age of radioactive lead isotope source region is 2390 Ma, being consistent with the consolidation time of granite-greenstone belt, suggesting that ore-forming materials originated from this belt. μ values varied in the range of 9.56~12.17, indicating that the metallic ore-forming elements were derived from the crust mainly. Th/U value is concentrated on the range of 3.30~3.62, close to the value of the upper crust. The above-mentioned characteristics imply that the granite-greenstone belt of Yanlingguan Formation, Taishan group, as a result of crust-mantle interaction during the Late Archean to the Early Proterozoic, was the main source of the Yi'nan gold deposit. Sulfur and carbon isotopic studies indicated that S and C in the ore were mainly derived from the mantle magma. The ore-forming fluids were mainly magmatic hydrothermal fluids, though some meteoric water might be added during later mineralization stage.

Key words: characteristic of isotope; sources of ore-forming material; granite-greenstone belt; ore-forming fluid; Yi'nan gold deposit