

山东土堆 - 沙旺金矿床同位素组成特征 及矿床成因讨论

李红梅^{1, 3)}, 魏俊浩¹⁾, 王 启²⁾, 于海涛²⁾, 刘国春²⁾, 黄祥芝³⁾

1)中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074;

2)内蒙古赤峰市地质矿产勘查开发院, 内蒙古赤峰 024000;

3)湖北省地质调查院, 湖北武汉 430034

摘要: 土堆 - 沙旺金矿床位于胶莱盆地东北缘, 为胶东东部牟平 - 即墨成矿带的重要组成部分。石英流体包裹体 Rb - Sr 等时线年龄为 119 ± 10 Ma, 与胶东大规模成矿时间一致。矿石硫化物硫同位素组成 $\delta^{34}\text{S}$ 介于 $8.50\text{\textperthousand} \sim 12.72\text{\textperthousand}$ 之间, 成矿热液 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}} = 10.03\text{\textperthousand}$, 铅同位素组成中 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.12 \sim 17.86$, 且具有低 μ 高 ω 特征, 指示成矿物质来源于下地壳或地幔。氢氧同位素 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $+1.96\text{\textperthousand} \sim +7.71\text{\textperthousand}$, δD 为 $-68.64\text{\textperthousand} \sim -86.47\text{\textperthousand}$, 显示成矿流体主体为岩浆水, 并有部分后期大气水的参与。矿石铅同位素与同期脉岩组成接近, 且具有线性特点, 指示二者可能与早白垩世华北克拉通东部构造体制转化所引起的壳幔岩浆混合作用有关。

关键词: 同位素地球化学; 年代学; 土堆 - 沙旺; 胶东

中图分类号: P597.2; P597.3; P611 文献标志码: A 文章编号: 1006-3021(2010)06-791-12

Isotopic Composition Features and Ore-forming Mechanism of the Tudui-Shawang Gold Deposit in Shandong Province

LI Hong-mei^{1, 3)}, WEI Jun-hao¹⁾, WANG Qi²⁾, YU Hai-tao²⁾, LIU Guo-chun²⁾, HUANG Xiang-zhi³⁾

1) Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074;

2) Inner Mongolia Institute of Geology and Mineral Exploration and Development, Chifeng, Inner Mongolia 024000;

3) Hubei Institute of Geological Survey, Wuhan, Hubei 430034

Abstract: The Tudui-Shawang gold deposit lies in the northeastern margin of the Jiaolai basin and is located at the center of the Rushan-Mouping gold belt in Jiaodong Peninsula. The Rb-Sr isochron age of the fluid inclusions in quartz is about 119 ± 10 Ma, which is consistent with the main stage of the extensive gold mineralization in the Jiaodong gold province. The sulfur isotopic composition of ores ranges from $8.5\text{\textperthousand}$ to $12.72\text{\textperthousand}$, implying an ore fluid with $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ equal to $10.03\text{\textperthousand}$. Ore sulfides have $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ of $17.12 \sim 17.86$ and exhibit low μ but high ω values, indicating the derivation of ore-forming materials from the lower crust or the mantle. δD and recalculated $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ values vary from -68.64 to $-86.47\text{\textperthousand}$ and from $+1.96\text{\textperthousand}$ to $+7.71\text{\textperthousand}$ respectively, implying that the ore fluid was dominated by magmatic water with the participation of some later meteoric water. Pb isotopes of ore sulfides are coincident with those of contemporaneous dikes and their linear array suggests that both of them might have been related to the change of tectonic regime of the eastern North China craton during the Early Cretaceous.

Key words: isotopic geochemistry; geochronology; Tudui-Shawang; Jiaodong

胶东矿集区自西向东依次分布有招远 - 莱州、蓬莱 - 栖霞、牟平 - 乳山三大金矿带, 金矿床主要有三种类型: 蚀变岩型(焦家式), 石英脉型(玲珑式)及盆地边缘角砾岩型(蓬家夼式)(张连昌等, 2000; 杨金中等, 2001; 翟明国等, 2004a; 范宏瑞等, 2005; Mao et al. 2008)。前人对蚀变岩型和石英脉型金矿床

本文由教育部创新团队发展计划项目(编号: IRT0755)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目联合资助。

收稿日期: 2010-03-15; 改回日期: 2010-05-04。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 李红梅, 女, 1970 年生。博士。主要从事矿床地球化学研究工作。E-mail: hblhm102@163.com。

的研究工作较详细, 对盆地边缘角砾岩型金矿床虽有涉及, 但相对较为薄弱, 除蓬家夼和发云矿外(张连昌等, 2000, 2001; Zhang et al., 2003; 杨金中等, 2000a, 2001; Mao et al. 2008), 该类型其它金矿床目前还未见相关矿床地球化学研究报道。土堆 - 沙旺金矿床是胶莱盆地北东缘盆地边缘角砾岩型金矿床的重要代表, 前人对其进行了基础地质及矿床地质的研究工作(徐国民等, 1998; 沈远超等, 2001; 刘玉强等, 2004; 杨金中等, 2000b; 高玉娟等, 2006), 认为其属盆地边缘滑脱断层控矿(沈远超等, 2001; 杨金中等, 2000b)。由于缺少矿床地球化学的研究, 目前对该矿床形成机理尚不清楚。本文在详细的氢氧硫铅同位素组成研究基础上, 结合同位素年代学数据, 从成矿流体 - 物质来源以及成矿背景的角度探

讨了该矿床的成因。

1 地质背景

土堆 - 沙旺金矿床位于胶莱盆地东北缘(图 1), 处于华北克拉通胶辽台隆胶北隆起南部, 为胶东东部牟平 - 即墨金矿带的重要组成部分, 为一中型金矿床。区内地层出露简单, 以古元古代荆山群为主, 少量中生代莱阳群及新生代第四系。荆山群地层以大理岩、变粒岩和斜长角闪岩为主, 莱阳群主要为一套砾岩、砂砾岩地层。区内断裂构造以 NE 走向为主, 构造格架自西向东由桃村断裂、郭城断裂、朱吴 - 崖子断裂构成, 其中前二者控制了胶莱盆地东北部的边缘, 三者均具左行压扭性特征, 为高角度平移断裂。区内含矿构造为由其派生形成的次级

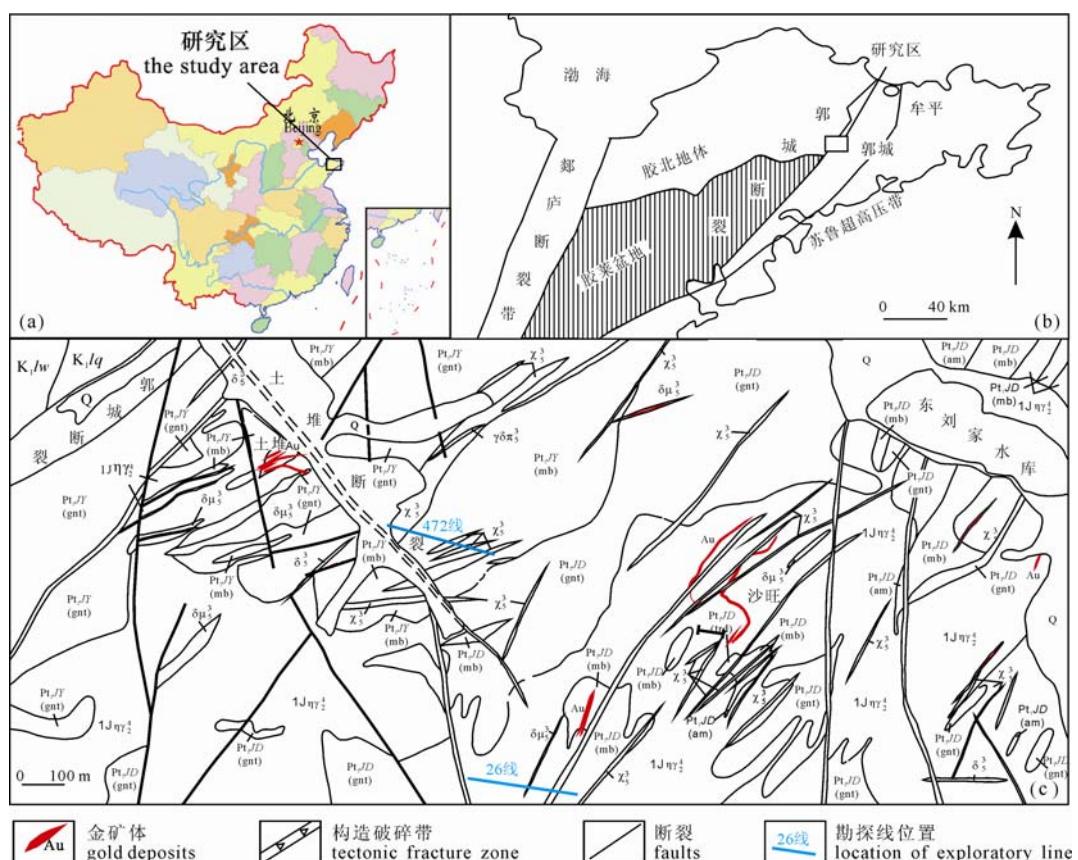


图 1 胶东郭城地区构造位置图(a)、地质简图(b)和土堆 - 沙旺金矿床矿区地质图(c)(据谭俊(2009)修改)

Fig. 1 Tectonic location map (a), simplified geological map (b) of Guocheng area and geological map of Tudui-Shawang gold deposit (c) (modified after Tan, 2009)

Q—第四系; KQ—中生代青山群; KL—中生代莱阳群; K₁lq—曲格庄组含砾粗砂岩; K₁lw—龙旺庄组砂砾岩、砂岩; Pt₁J—古元古代荆山群; Pt₁JD(mb)—陡崖组大理岩; Pt₁JD(gnt)—陡崖组变粒岩; Pt₁JD(trd)—陡崖组透辉岩; Pt₁JD(am)—陡崖组角闪岩; Pt₁JY(mb)—野头组大理岩; Pt₁JY(gnt)—野头组变粒岩; 1Jηγ₂⁴—鹤山 - 牡牛山花岗岩体; 1Yηγ₂⁴—云山花岗岩体; γδπ₅³—闪长斑岩脉; δ₅³—闪长岩脉; δμ₅³—闪长玢岩脉; ξ₅³—煌斑岩脉

Q—Quaternary sediments; KQ—Mesozoic Qingshan Group; KL—Mesozoic Laiyang Group; K₁lq—pebbled coarse sandstone of Qugezhuang Formation; K₁lw—coarse-grained sandstone and sandstone of Longwang Formation; Pt₁J—Paleoproterozoic Jingshan Group; Pt₁JD(mb)—marble of Douya Formation; Pt₁JD(gnt)—granulite of Douya Formation; Pt₁JD(trd)—diopside of Douya Formation; Pt₁JD(am)—amphibolite of Douya Formation; Pt₁JY(mb)—marble of Yetou Formation; Pt₁JY(gnt)—leptynite of Yetou Formation; 1Jηγ₂⁴—Queshan-Muniushan granite; 1Yηγ₂⁴—Yunshan granite; γδπ₅³—diorite-porphry dike; δ₅³—anchorite; δμ₅³—diorite porphyry; ξ₅³—lamprophyre

断裂(裂隙)构造, 以 NNE 和 NEE 向为主。区内岩浆岩广泛发育, 以晚元古代鹤山 - 牧牛山二长花岗岩为主, 呈“舌状”由 NE 向 SW 方向侵入于荆山群地层中。另外, 区内燕山晚期脉岩活动强烈, 侵位于荆山群地层及牧牛山岩体中, 侵位密度大, 大多呈 NE 走向, 主体倾向 NW, 主要有二长斑岩、闪长玢岩、煌斑岩等。部分脉岩形成早于金矿化或与其同期, 其余均切割穿插金矿脉。

2 矿床地质特征

矿区内地质构造简单, 土堆矿段以荆山群为主, 而沙旺主体为牧牛山二长花岗岩。矿体定位在 NNE 和 NEE 向两组断裂(裂隙)构造中, 位于郭城断裂下盘。已有工程控制及地表信息大致判断矿区内地质构造应存在四条矿化带, 从西向东依次为: 土堆西成矿带、土堆东成矿带、沙旺成矿带及沙旺东成矿带。矿带走向为 NNE 25°左右。矿带内矿体定位严格受断裂构造控制, 以 NNE 和 NEE 向为主, NNE 向控矿构造更发育, 矿区内规模较大的 46、28 号脉即定位于此组构造中。矿体形态以脉状为主, 局部地段呈透镜状、扁豆状和不规则状, 具分枝复合、尖灭再现、膨大狭窄的特点, 产状较缓, 平均 15°~25°, 其中沙旺 28 号脉略陡, 局部 35°左右。矿化特征上属于缓倾斜薄而富的矿体, 矿化沿构造基本连续, 但矿体间有明显的间断存在。容矿构造发育连续, 带窄, 水平延伸和纵向延深的范围较大, 含矿断裂面具舒缓波状特点, 属于典型的剪切型断裂构造。目前探采较具规模的矿体主要有土堆 46 号和 56 号脉, 以及沙旺 28 号脉(图 2)。

46 号矿体呈脉状产于野头组大理岩中, 走向 NNE25°左右, 整体倾向 NW, 倾角 20°~30°。走向控

制长度 250 m, 倾向延深 120 m, 厚度 0.66~2.31 m, 平均 1.44 m, 矿体品位为 3.47×10^{-6} ~ 84.00×10^{-6} , 平均 24.43×10^{-6} 。56 号矿体呈脉状产于野头组大理岩中, 走向 NEE70°左右, 分两段, 北东段控制走向长度约 100~150 m, 厚度 1.42~3.30 m, 品位 3.87×10^{-6} ~ 11.62×10^{-6} , 南西段走向控制长度 150 m 左右, 倾向控制深度仅为 60 m 左右, 厚度 0.67~4.10 m, 向西被一条近南北向后期断裂错断, 品位为 2.98×10^{-6} ~ 16.65×10^{-6} 。沙旺 28 号脉呈脉状, 主体赋矿围岩为牧牛山二长花岗岩, 矿体总体走向 NE25°左右, 走向长度将近 1000 m, 倾向控制深度约 60 m, 厚度 0.69~3.70 m, 金品位为 2.82×10^{-6} ~ 18.68×10^{-6} , 平均 6.24×10^{-6} 。

矿石类型主要以断裂(裂隙)控矿块状硫化物为主, 兼有细脉状、网脉状、团块状及浸染状矿石, 多分布于主矿体两侧。矿石矿物组成简单, 以黄铁矿和磁黄铁矿为主, 少量黄铜矿、白铁矿、自然金等。三条主矿体中 46 和 28 号脉以黄铁矿为主, 56 号脉以磁黄铁矿为主。脉石矿物有石英、绿泥石、绿帘石、阳起石、钾长石、绢云母、方解石等。矿石结构主要为自形 - 半自形粒状结构、它形粒状结构及熔蚀结构、交代残余结构、碎裂状结构、骸晶结构等。矿石构造以脉状、网脉状、浸染状构造为主, 其次为团块状、斑块状、斑点状、星点状、星散状、块状等构造。

围岩蚀变总体不发育, 从主矿体向两侧围岩蚀变作用范围有限。出现的蚀变类型主要有黄铁矿化、磁黄铁矿化、硅化、钾化、绢云母化、碳酸盐化、绿泥化、透辉石化、石榴石化等。矿体围岩不同, 蚀变类型也略有差别。

成矿期次划分为以下三个阶段: (1)粗粒硫化物

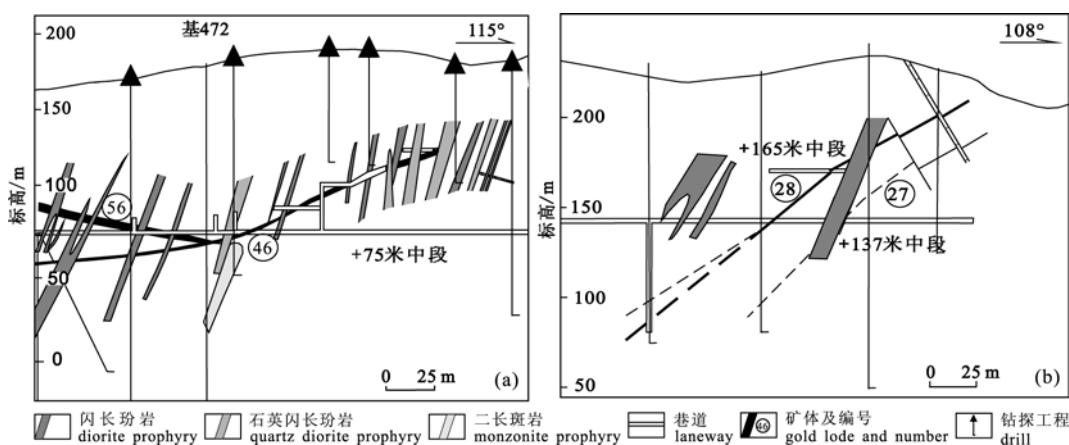


图 2 土堆矿区 472 线(a)及沙旺矿区 26 线地质剖面图(b)(据谭俊(2009)修改)

Fig. 2 Geological section along No.472 line of Tudui ore district (a) and along No.26 line of Shawang ore district (b) (modified after Tan, 2009)

阶段, 主要形成早期粗粒黄铁矿和磁黄铁矿, 后多被压碎及熔蚀交代, 矿物组合简单, 基本不含金; (2)细粒石英硫化物阶段, 主要金属矿物组合为细粒黄铁矿、磁黄铁矿和黄铜矿, 以及磁铁矿和自然金。硫化物形成时硅化较强, 为金主要成矿阶段; (3)低温蚀变矿物阶段, 形成了绿泥石、绿帘石、绢云母、方解石等矿物, 基本不含金(谭俊, 2009)。

3 样品采集与分析方法

本次研究共采集了 8 件矿石样品进行硫和铅同位素测试。样品 TK1 和 TK4 采自土堆矿段 56 号矿脉, K2 和 K3 采自土堆矿段 46 号矿脉, SK1、SK3、SK4 和 SK5 采自沙旺矿段 28 号矿脉。矿石样品粉碎至 200 目以下并在双目镜下精选出纯度大于 99% 的黄铁矿或磁黄铁矿单矿物。硫铅和铷锶同位素测试在国土资源部中南矿产资源监督检测中心同位素地球化学研究室完成。共采集了 6 件石英样品进行氢氧和铷锶同位素测试。石英样品破碎后在双目镜下挑选出纯度大于 99% 的石英单矿物, 粒径 0.2~0.5 mm。氢氧同位素在中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室测试完成。

硫同位素样品分析流程是先将样品按比例加入 Cu₂O, 然后置于马弗炉内, 在 1050~1060℃ 真空条件下反应制备 SO₂, 最后在德国产 MAT-251 质谱仪上进行测试, 测试误差小于±0.2‰, δ³⁴S 的相对标准为 V-CDT。

铅同位素测试先称取 10~100 mg 矿物样品于聚四氟乙烯烧杯中, 加入 HF+HNO₃ 混合酸分解样品, 蒸干, 加入 6 mol/l 的 HCl 除去溶样时带进的其它酸根离子, 最后转化成 HBr: HCl 为 1: 2 混合酸介质,

离心, 然后通过阴离子交换柱, 用 HBr 淋洗杂质, 再用 HCl 将树脂转型, 最后用 HCl 解吸 Pb。Pb 同位素比值测定在 MAT-261 可调多接收质谱计上完成。监控 Pb 同位素比值测定的 NBS981 国际标准物质测定值 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 为 0.9142±0.0005, NBS981 证书值: ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 为 0.9146±0.0003。μ 值(238U/204Pb)和 ω 值(232Th/204Pb)据 S-K 模式(Stacey et al., 1975)计算。

氢氧同位素测定工作在 Finnigan-MAT252 型质谱仪上完成。石英氧同位素组成(δ¹⁸O_{石英})用 BrF₅法制备 O₂, 包裹体水的氢同位素组成 δD_{H2O} 由加热爆裂法获取包裹体内水, 经净化去除 CO₂ 和其它杂质气体后, 与金属铀反应转化为 H₂。

铷锶同位素测试准确称取 0.03~0.05g 石英样品和适量 (⁸⁵Rb+⁸⁴Sr)混合稀释剂于聚四氟乙烯溶样器中, 加入适量的 HF 及 HClO₄ 混合酸分解样品。采用阳离子交换技术分离 Rb 与 Sr 和其它杂质元素。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 同位素比值同位素分析用 MAT-261 可调多接收质谱计测定。Rb、Sr 含量采用同位素稀释质谱法测定, 用 NBS987 和 GBW04411 标准物质对仪器和分析流程进行监控。NBS987 的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 同位素组成测定值为 0.71034±0.00026(2σ); GBW04411 长石标准物质与样品平行测定多次的平均值分别为 Rb: 249.47×10⁻⁶, Sr: 158.92×10⁻⁶, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr: 0.75999±0.00020(2σ)。

4 测试结果

4.1 硫铅同位素

矿石硫同位素分析结果列于表 1, 其组成显示土堆-沙旺金矿床矿石硫化物具有富集 ³⁴S 的特点,

表 1 土堆-沙旺金矿床矿石硫铅同位素组成

Table 1 Sulfur and lead isotopic composition of ores from the Tudui-Shawang gold deposit

矿段或地质体	样品编号	测试矿物	δ ³⁴ S/‰	铅同位素比值			μ 值	ω 值
				²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb		
土堆	TK1	磁黄铁矿	9.74	17.242	15.454	37.878	9.34	41.88
	TK4	磁黄铁矿	10.58	17.862	15.451	37.704	9.23	35.63
	K2	黄铁矿	8.5	17.124	15.413	37.616	9.27	39.99
	K3	黄铁矿	9.1	17.155	15.447	37.755	9.34	41.51
沙旺	SK1	黄铁矿	9.12	17.079	15.359	37.552	9.17	41.18
	SK3	黄铁矿	10.76	17.248	15.433	37.877	9.29	41.51
	SK4	黄铁矿	9.95	17.197	15.417	37.785	9.27	40.19
	SK5	黄铁矿	12.72	17.232	15.431	37.858	9.29	43.44
牧牛山岩体	SWB4	二长花岗岩		17.55	15.441	38.818	9.26	44.44
	SWB16	二长花岗岩		17.579	15.488	38.413	9.35	42.49

且 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围较窄。土堆矿段黄铁矿和磁黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 变化区间为 8.50‰~10.28‰, 极差 1.78‰, 均值 9.29‰; 沙旺矿段黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 9.12‰~12.72‰, 极差 3.60‰, 均值 10.64‰。在直方图上具有明显的塔式分布特点(图 3), 邻区蓬家夼金矿床矿石硫(9.70‰~12.98‰)(Mao et al., 2008; 张连昌等, 2001; 孙丰月等, 1995; 张竹如等, 1999)也表现出相似的分布特点, 说明它们具有近乎一致的来源。

铅同位素测试结果显示(表 1), 土堆矿段矿石硫化物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 17.124~17.862(极差 0.738)、15.413~15.454(极差 0.041)、37.616~37.878(极差 0.262), 沙旺矿段矿石硫化物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 17.079~17.248(极差 0.169)、15.359~15.433(极差 0.074)、37.552~37.877(极差 0.325)。不同矿段硫化物铅同位素组成基本一致。因为郭城脉岩的成岩时代($114\pm2\text{Ma}$ 和 $116\pm1\text{Ma}$)(Tan et al., 2008)比较年轻, 其全岩铅同位素与经过校正的铅同位素相差不大, 故可近似采用脉岩全岩铅同位素与矿石铅同位素进行对比研究。分析发现, 矿石铅与矿区内地带生脉岩铅同位素组成接近($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.128\sim17.557$ (谭俊,

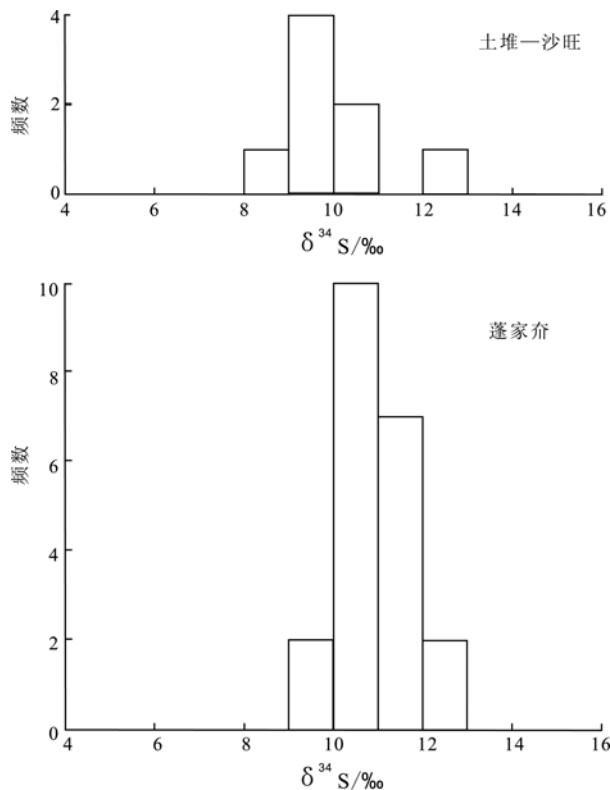


图 3 土堆-沙旺金矿床和蓬家夼金矿床矿石硫同位素分布直方图

Fig. 3 Histogram of sulfur isotopic composition of ores from the Tudui-Shawang and Pengjiakuang Au deposits

2009))。在铅构造模式图上, 样品点位于下地壳增长线和造山带增长线之间(图 4a)和地幔增长线上(图 4b), 显示了其深源特点。同时, 矿石硫化物与同期脉岩基本重叠, 且均显示较为明显的线性特征, 说明二者铅源应为不同端元的混合。

4.2 氢氧同位素

从表 2 可以看出, 矿区及邻近采区石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 5.96‰~14.79‰, 平均值 +9.89‰。根据石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 利用平衡分馏方程 $1000\ln\alpha_{\text{石英}-\text{水}} = 3.38 \times 10^6/T^2 - 3.40$ (Clayton et al. 1972) 可求得成矿流体的氧同位素值 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 。成矿温度用石英中包裹体的均一温度代替。经计算后, 可看出研究区 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 +1.96~7.71‰, 平均值为 +3.88‰。 δD 为石英中流体包裹体成分值, 分析结果为 -68.64‰~—86.47‰, 平均值为 -77.74‰。

在流体氢氧同位素投影图中(图 5), 样品点相对集中, 总体分布于岩浆水和大气降水线之间, 靠近岩浆水范围, 显示成矿流体以岩浆水为主, 并有部分大气水的参与。且投影点正好分布于蓬家夼金矿床之间, 指示两矿床成矿流体相似, 均为岩浆水混

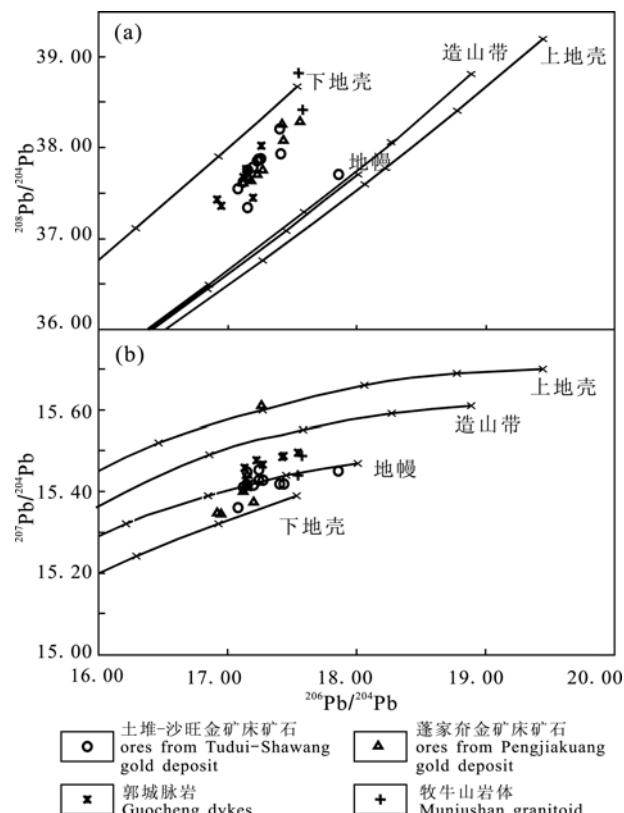


图 4 土堆-沙旺和蓬家夼金矿床铅构造模式图
(底图据 Zartman(1981))

Fig. 4 Tectonic models of $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ for the Tudui-Shawang and Pengjiakuang gold deposits (after Zartman, 1981)

表 2 土堆—沙旺金矿区及蓬家夼金矿床氢氧同位素组成
Table 2 Hydrogen and oxygen isotopic composition of the Tudui-Shawang and Pengjiakuang gold deposits

矿床	样号	取样位置	测试矿物	成矿温度	$\delta D/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$	资料来源
土堆 - 沙旺及邻区	SQ3	沙旺	石英	402	-72.838	5.98	1.96	
	DQ1		石英	322	-82.739	9.88	3.73	
	DQ2	东刘家	石英	320	-81.515	9.7	3.49	本文
	DQ4		石英	320	-86.472	10.7	4.49	
	LQ1	辽上	石英	315	-68.638	8.29	1.91	
	LQ2		石英	295	-74.245	14.79	7.71	
蓬家夼			石英	320	-90	6.9	0.6	
		井下坑道不 同中段	石英	280	-92	7.8	1	杨金中等, 2001
			石英	343	-98	6.2	0.6	
			石英	300	-97	8.7	0.9	
	Pjk1		绢云母	250	-58	4.3	1.15	
	Pjk8		绢云母	250	-59	5.1	1.95	Mao et al., 2008
	Pjk10		绢云母	250	-64	5.3	2.15	

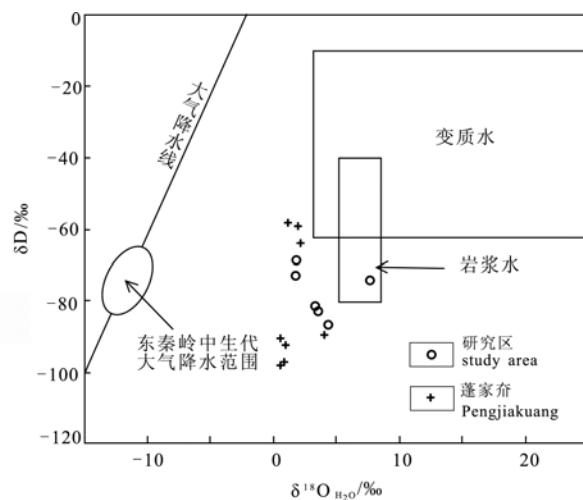


图 5 土堆—沙旺及蓬家夼金矿床成矿流体氢氧同位素投影图

(底图据: Taylor, 1974; 东秦岭中生代大气降水范围据:
张理刚, 1989)

Fig. 5 $\delta D-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ plot for ore fluids in the Tudui-Shawang and Pengjiakuang Au deposits (base map after Taylor, 1974, and the range of Mesozoic meteoric water in east Qinling after Zhang, 1989)

合大气水, 也与胶东其它地区金成矿流体来源具有类似性(范宏瑞等, 2005)。

4.3 Rb-Sr 同位素

石英中流体包裹体 Rb 含量为 $0.2957 \times 10^{-6} \sim 11.2700 \times 10^{-6}$, Sr 含量为 $0.7383 \times 10^{-6} \sim 7.2490 \times 10^{-6}$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 $0.233 \sim 9.205$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值范围为 $0.71246 \sim 0.72848$ (表 3), 总体显示了较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素组成特点。在石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线图(图 6)中, 剔除一个异常点 LQ2 外, 其余 5 个样品拟合成一条线性关系良好的等时线, 相应等时线

表 3 土堆-沙旺金矿床 Rb-Sr 分析结果

Table 3 Rb-Sr isotopic composition of the Tudui-Shawang gold deposit

样品编号	样品名称	$W(\text{Rb})/10^{-6}$	$W(\text{Sr})/10^{-6}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(2\sigma)$
SQ3	石英	1.32	1.073	3.549	0.718
DQ1	石英	2.349	0.7383	9.205	0.72729
DQ2	石英	2.22	1.249	5.132	0.72051
DQ4	石英	0.2957	3.661	0.233	0.71246
LQ1	石英	3.732	1.657	6.561	0.7241
LQ2	石英	11.27	7.249	4.492	0.72848

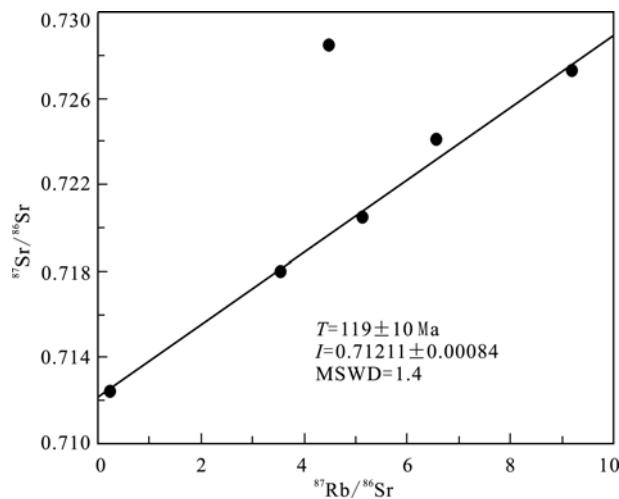


图 6 土堆—沙旺金矿床 Rb-Sr 等时线图解

Fig. 6 Rb-Sr isochron age of the Tudui-Shawang gold deposit

年龄为 $119 \pm 10 \text{ Ma}$ 。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为 0.71211 ± 0.00084 , 与玲珑、焦家和马家窑等金矿床($0.710 \sim$

0.7163)(李华芹等, 1993)接近, 反映胶东地区成矿物质来源的相似性。

5 讨论

5.1 成矿时代

土堆 - 沙旺金矿床成矿后闪长玢岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄为 116 ± 1 Ma(Tan et al., 2008), 限定了成矿年代的下限。邻区蓬家夼金矿床形成时间为 $121 \sim 117$ Ma(Zhang et al., 2003; Li et al., 2006), 为研究区成矿时代确定提供了重要参考。本次研究获得土堆 - 沙旺金矿床石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄为 119 ± 10 Ma, 表明该矿床成矿时间应为早白垩世, 与胶东金矿集中区已报道的金主要成矿年龄为 120 Ma 左右一致(范宏瑞等, 2005; 陈衍景等, 2004; Zhai et al., 2002), 表明胶东地区不同类型金矿床是在一个相当短或者集中的时间范围内爆发式形成的。胶莱盆地边缘角砾岩型金矿床与蚀变岩型和石英脉型金成矿可能是在相同的构造体系下形成, 并具有统一的动力学背景和深部演化过程。

5.2 成矿物质来源

硫铅同位素是示踪成矿物质来源的有效手段之一。土堆 - 沙旺金矿床的硫化物矿物简单, 主要为黄铁矿和磁黄铁矿, 因此成矿热液的总硫同位素可以近似等于黄铁矿的硫同位素组成(Ohmoto, 1972), 即成矿热液的总硫同位素 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 应为 10.03\% 左右(表 1)。根据邻区同类型蓬家夼金矿床成矿流体的物理化学条件(杨金中等, 2000a), 由 $\delta^{34}\text{S}_{\text{py}} - f\text{O}_2 - \text{pH}$ 相图(Ohmoto, 1972)可知(图 7), 蓬家夼金矿床的成矿流体总硫也可以近似用黄铁矿的硫同位素组成(张连昌等, 2002)代替, $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 约为 11.01\% 。二者成矿流体总硫同位素基本一致, 表明硫源的相似性。同时也与胶东西部地区金矿床 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}=10\text{\%}$ (王义文等, 2002)十分接近。根据土堆 - 沙旺金矿床矿物组合反应的成矿流体物理化学条件(Ohmoto, 1972)和蓬家夼金矿床成矿流体物理化学条件(杨金中等, 2000a)做出的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{py}} - f\text{O}_2 - \text{pH}$ 相图中(图 7), 二者大致位于 $f\text{O}_2$ 较低的 B 区。

胶东地区虽然成矿热液的总硫同位素组成基本一致, 但各种类型金矿床测试的矿石硫化物硫同位素组成略显差异性, 即从石英脉型、蚀变岩型到盆地边缘角砾岩型具有依次增高的特点(Mao et al., 2008; 王义文等, 2002)。典型热液成矿条件下形成的硫化物硫同位素组成相图(图 7)可以很好地解释这种现象: 石英脉型金矿床成矿热液的 $f\text{O}_2$ 最高, 位于相图的 Q 区, 黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 相对较低, 而盆地边缘

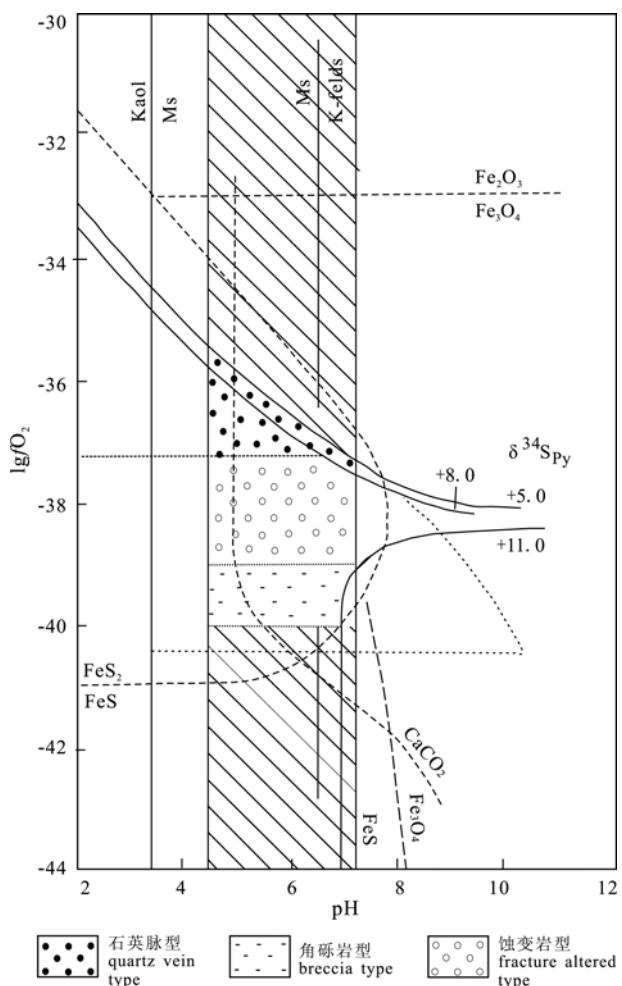


图 7 胶东地区金矿床 $\delta^{34}\text{S}_{\text{py}} - f\text{O}_2 - \text{pH}$ 关系图解

$T = 250^\circ\text{C}$, $I = 1.0$, $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}} = 10\text{\%}$

底图据 Ohmoto(1972)、王义文等(2002)改编。溶液的 $f\text{O}_2$ 、图 PH 范围详细注解及取值见杨金中等(2000a)、Ohmoto(1972)、王义文等(2002)、陈光远等(1989)

Fig. 7 Composite diagram showing the $\delta^{34}\text{S}_{\text{py}} - f\text{O}_2 - \text{pH}$ relationships of gold deposits in Jiaodong Peninsula

$T = 250^\circ\text{C}$, $I = 1.0$, $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}} = 10\text{\%}$

Base plot modified after Ohmoto, 1972 and Wang et al., 2002. $f\text{O}_2$ and pH range and values of ore-fluid system after Yang et al., 2000a; Ohmoto, 1972; Wang et al., 2002 and Cheng et al., 1989

角砾岩型金矿床的 $f\text{O}_2$ 最低, 位于 B 区, 黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 相对较高。蚀变岩型金矿床成矿热液的 $f\text{O}_2$ 介于前两者之间, 位于相图 F 区, 黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 也介于前两者之间。由此说明三种不同类型的金矿类型具有统一的成矿热液系统, 这与前人研究结果一致(Mao et al., 2008)。

土堆 - 沙旺金矿床成矿热液 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}=10.03\text{\%}$ 指示硫源相对复杂, 具有多源性, 明显高于幔源硫及石英脉型和蚀变岩型金矿床(Mao et al., 2008; 王义文等, 2002; 黄德业, 1994), 与荆山群地层(张竹如等, 1999)类似(图 8), 因此可以推测围岩荆山群为成矿热液提供了部分硫源。研究区内广泛发育的中生

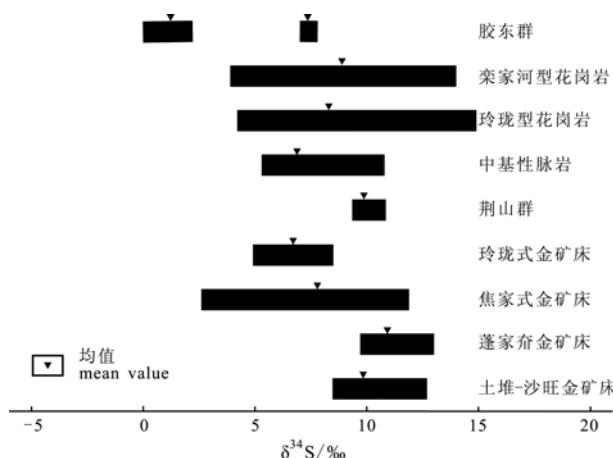


图 8 胶东地区金矿床及变质岩、岩浆岩硫同位素组成图

Fig. 8 Sulfur isotopic compositions of gold deposits, metamorphic rocks and magmatic rocks

代岩浆岩为各类高密度侵位脉岩，并与金矿脉具有密切的时空分布关系。胶东地区中基性脉岩 $\delta^{34}\text{S}$ 为 5.3‰~10.8‰(黄德业, 1994), 山东地质三队在牟乳地区测试的黄铁更长岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 9.2‰~13.68‰(夏林, 2003), 均值 11.4, 略低于或略高于土堆-沙旺金矿床成矿热液 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$, 因此, 与矿体密切伴生的脉岩存在为成矿热液提供硫源的可能性, 这种可能性得到了土堆-沙旺金矿床脉岩斑晶矿物中原生硫化物与矿石硫化物一致的 Au/Cu (2.50) 及 Ag/Au (0.20) 比值的有力支持(谭俊, 2009)。已有研究表明, 脉岩岩浆源区为富镁幔源岩浆与壳源岩浆混合作用的产物(Tan et al., 2008), 因此, 成矿热液中硫源可能与脉岩来自同一或类似源区, 在上升成矿过程中又萃取了围岩荆山群中的硫及成矿物质。

铅构造模式图(图 4)显示矿石铅应来自于深源, 并且与邻区蓬家夼金矿床(张连昌等, 2002; 孙丰月等, 1995)具有一致性, 说明两者成矿物质来源、成矿物理化学条件、成矿流体与围岩的相互作用基本类似。根据 S-K 两阶段模式(Stacey et al., 1975)计算, 土堆-沙旺矿石铅同位素的 μ 值为 9.17~9.34, 均值 9.27, 低于平均地壳 $\mu=9.74$; ω 值为 35.63~43.44, 均

值 40.79, 高于平均地壳铅 $\omega=36.84$, 说明二者矿石铅具有低 μ 高 ω 特征, 指示矿石铅可能来源于下部地壳或上地幔(Stacey et al., 1975)。

此外, 土堆-沙旺金矿床矿石铅分布具有较为明显的线性, 可能的机制有: (1)能拟合成一条等时线(Harkins et al., 2008; Stendal, 1998), (2)不同来源铅的混合(Billstrom, 1990; Frimmel et al., 2004)。在这里线性不能被解释成等时线, 根据 S-K 模式计算出来的模式年龄范围为 1037~384 Ma, 明显大于成矿年龄, 因此这种线性趋势指示了矿石铅是由不同的端元混合而成。研究区内矿石与脉岩的成矿成岩时间一致, 两者铅组成分布基本重合, 且脉岩样品点线性特征明显(图 4), 说明二者具有一致的混合源区。围岩二长花岗岩的铅同位素组成略高于矿石铅, 但是无法进行年龄校正, 所以不能与矿石铅对比。因为牧牛山岩体为新元古代侵位, 不可能直接为中生代成矿作用提供岩浆热液, 仅存在成矿热液流经岩体时萃取其中成矿元素的可能性。荆山群没有铅同位素数据供分析, 但是不能排除其提供铅源及成矿物质的可能性。据现有研究, 脉岩与矿石铅具有基本一致的铅同位素组成, 且两者的铅同位素分布均具线性特征, 表明矿石与脉岩具有相同或类似的铅源。已有研究表明脉岩为壳幔作用的产物, 因此矿石铅最有可能来源于与脉岩相同或类似的壳幔岩浆混合源区。

与焦家和玲珑金矿床相比, 土堆-沙旺和蓬家夼金矿床具有与其近乎一致的铅同位素组成(表 4), 说明胶东矿集区的金矿具有相同或相似的铅源, 金成矿可能是在相当短的时间内, 在同一成矿背景下和同一构造岩浆流体成矿系统下集中完成的(范宏瑞等, 2005; Mao et al., 2008)。

5.3 成矿流体

氢氧同位素组成图解显示(图 5), 投影点除一个位于岩浆水的范围外, 土堆-沙旺金矿床其它分析点均落在了岩浆水和大气降水线之间, 并靠近岩浆

表 4 土堆-沙旺金矿床与蓬家夼、焦家和玲珑金矿床矿石铅同位素组成对比表

Table 4 Comparison of lead isotopic compositions of ores from the Tudui-Shawang, Pengjiakuang, Jiaojia, and Linglong gold deposits

金矿床	样品数	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	均值	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	均值	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	均值	资料来源
土堆-沙旺	8	17.079~17.862	17.267	15.359~15.454	15.426	37.552~37.878	37.753	本文
蓬家夼	8	17.195~17.523	17.353	15.422~15.594	15.515	37.731~38.271	38.015	张连昌等, 2002; 孙丰月等, 1995
焦家	8	17.192~17.370	17.232	15.340~15.462	15.433	37.757~37.890	37.815	王义文, 1988
玲珑	21	16.740~17.540	17.264	14.850~15.488	15.337	36.690~38.750	37.906	

水范围。土堆 - 沙旺及蓬家夼金矿床成矿流体相似, 均显示出了岩浆水混合大气水的特点。已有研究表明, 胶东矿集区内不同类型和不同位置的金矿床具有较一致的成矿流体介质条件, 初始成矿流体以岩浆水为主, 中晚期混有天水, 组成了岩浆水 - 天水的复合或混合成矿序列(范宏瑞等, 2005)。初始成矿流体岩浆水有可能是基性幔源脉岩岩浆在地壳浅部经脱水作用所形成的岩浆水(Fan et al., 2003; Zhou et al., 2003)。因此, 土堆 - 沙旺金矿床成矿流体与胶东矿集区其它金矿床的成矿流体亦基本一致, 以岩浆水为主, 后期并混合了大气降水, 这里所说的岩浆水可能是由幔源岩浆脱水而形成。

5.4 成矿机制

华北克拉通中生代 120 Ma 左右构造体制发生了重大转折, 由挤压构造体制转化为伸展构造体制, 由 EW 向转变为 NNE 向的盆岭构造格局(翟明国等, 2004b)。华北东部陆壳特别是下地壳物质发生了剧烈重组和重熔, 岩石圈地幔和下地壳发生大规模置换(翟明国等, 2003, 2004b), 造成了强烈的岩浆活动(许文良等, 2004; 张田等, 2007; Wu et al., 2005), 发生了大规模的地幔上涌和岩石圈减薄(郑建平等, 1999; Gao et al., 2004), 壳幔相互作用形成了一个统一的成矿流体系统(Mao et al., 2008; 翟明国等, 2003), 与此同时爆发了金的大规模集中成矿。

土堆——沙旺金矿床位于胶东金矿集中区中东部, 郯庐断裂带重要分支 - 郭城断裂带内。早白垩世郭城断裂带发生了大规模左行走滑引张运动(谭俊, 2009), 在矿区内地质作用形成了 NNE 和 NEE 向两组断裂(裂隙)构造。来自地幔和下地壳混合岩浆携带成矿物质和热能上升到一定高度后, 成矿热液携带成矿物质进入 NNE 和 NEE 向断裂(裂隙), 因温度压力的降低及其它因素影响, 具有较低氧逸度($fO_2=5.9 \sim 8.9 \times 10^{-40} \text{ Pa}$)和弱酸性($\text{pH 值}=5.67 \sim 6.30$)(杨金中等, 2000a)的成矿热液, 在 250~300 , 700~500 bar(孙丰月等, 1995; 杨金中, 2000c)的温压条件下卸载成矿。在成矿热液上升过程中, 萃取围岩荆山群中的硫和成矿物质, 并于成矿后期有大气降水的混入。土堆 - 沙旺金矿床具有与焦家式和玲珑式金矿床相似的硫和铅同位素组成, 说明了胶东矿集区具有类似的成矿物质来源。白垩纪华北中生代构造体制转折期间, 来自深部壳幔作用源区的成矿物质在胶东不同构造部位形成了石英脉型、蚀变岩型和盆地边缘角砾岩型金矿床。土堆 - 沙旺金矿床成矿物质可能来源于与伴生脉岩一致或类似的壳幔岩浆混合源区和围岩。

6 结论

1. 土堆 - 沙旺金矿床成矿热液的总硫同位素 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 为 10.03‰ 左右, 与胶西北地区金成矿流体 10‰ 左右的总硫同位素接近, 表明胶东地区中生代金成矿物质来源的类似性。研究区成矿热液的硫源应为混合硫, 继承了伴生脉岩深部岩浆源区同位素及元素比值特点, 并萃取了围岩荆山群的硫;

2. 矿石硫化物铅同位素具有低 μ 高 ω 组成特点, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.12 \sim 17.86$ 。铅构造模式和 S-K 两阶段模式分析显示矿石铅来源于下地壳或地幔, 指示成矿物质可能与伴生脉岩均来自深部壳幔岩浆混合源区, 至少脉岩提供了铅及成矿物质;

3. 氢氧同位素指示成矿流体主体为岩浆水, 并有后期大气降水的参与。初始岩浆热液流体成分可能为地幔流体的衍生物;

4. 石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄为 $119 \pm 10 \text{ Ma}$, 与胶东矿集区大规模金爆发式成矿作用时间一致, 表明研究区所代表的盆地边缘角砾岩型金矿床与胶东石英脉型及蚀变岩型在成矿动力学背景上类似, 可能与白垩纪华北克拉通东部中生代构造体制转折有关。

致谢: 论文研究得到了教育部创新团队发展计划(批准号: IRT0755)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目资助。谭俊博士对文章提出了宝贵的修改意见, 李艳军博士在文章的修改过程中也提供了很大的帮助, 在此表示衷心感谢!

参考文献:

- 陈衍景, PIRAJNO F, 赖勇, 李超. 2004. 胶东矿集区大规模成矿时间和构造环境[J]. 岩石学报, 20(4): 907-922.
- 陈光远, 邵伟, 孙岱生. 1989. 胶东金矿成因矿物学与找矿[M]. 重庆: 重庆出版社: 1-452.
- 范宏瑞, 胡芳芳, 杨进辉, 沈昆, 翟明国. 2005. 胶东中生代构造体制转折过程中流体演化和金的大规模成矿[J]. 岩石学报, 21(5): 1317-1328.
- 高玉娟, 张亚明, 闫平科. 2006. 山东海阳土堆金矿床成矿控制条件及成矿类型研究[J]. 辽宁工学院学报, 26(4): 239-242.
- 黄德业. 1994. 胶东金矿成矿系列硫同位素研究[J]. 矿床地质, 13(1): 75-87.
- 李华芹, 刘家齐, 魏林. 1993. 热液矿床流体包裹体年代学研究及其地质应用[M]. 北京: 地质出版社: 1-126.
- 刘玉强, 史辉, 李军, 黄太岭, 金英梅, 王芳. 2004. 胶莱盆地周缘金矿床地质 - 地球物理 - 地球化学特征及找矿意义[J]. 地球学报, 25(6): 593-600.
- 沈远超, 刘铁兵, 李厚民, 李光明, 刘福涛. 2001. 山东海阳郭城金矿床地质地球化学特征及成因[J]. 地质与勘探, 37(1):

38-44.

- 孙丰月, 石准立, 冯本智. 1995. 胶东金矿地质及幔源 C-H-O 流体分异成岩成矿[M]. 长春: 吉林人民出版社: 1-170.
- 谭俊. 2009. 胶东郭城断裂带脉岩岩浆演化过程: 对岩石圈演化及金成矿的制约[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉): 1-130.
- 王义文, 朱奉三, 宫润潭. 2002. 构造同位素地球化学——胶东金矿集中区硫同位素再研究[J]. 黄金, 23(4): 1-16.
- 王义文. 1988. 胶东西北部地区金矿床铅同位素特征及其地质意义[J]. 长春地质学院学报, 18(3): 277-286.
- 夏林. 2003. 胶东中生代金成矿期区域流体的构造物理化学研究 [D]. 北京: 中国地质科学院: 1-142.
- 徐国民, 韩惊涛. 1998. 山东海阳土堆金矿床地质特征[J]. 山东地质, 14(4): 37-41.
- 许文良, 王清海, 王冬艳, 裴福萍, 高山. 2004. 华北克拉通东部中生代岩石圈减薄的过程与机制: 中生代火成岩和深源捕虏体证据[J]. 地学前缘, 11(3): 309-317.
- 杨金中, 沈远超, 刘铁兵, 张连昌, 邹为雷, 李光明, 曾庆栋. 2001. 胶东蓬家夼金矿床地质与地球化学特征[J]. 地质科学, 36(1): 51-63.
- 杨金中, 沈远超, 刘铁兵, 曾庆栋, 邹为雷. 2000a. 山东蓬家夼金矿床成矿流体地球化学特征[J]. 矿床地质, 19(3): 235-244.
- 杨金中, 赵玉灵, 沈远超, 李厚民. 2000b. 胶莱盆地东北缘与低角度拆离断层有关的金矿成矿作用——以山东海阳郭城金矿为例[J]. 黄金科学技术, 8(4): 13-20.
- 杨金中. 2000c. 胶东蓬家夼式金矿床矿床成因模型与找矿模型研究[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所: 1-142.
- 翟明国, 范宏瑞, 杨进辉, 苗来成. 2004a. 非造山带型金矿——胶东型金矿的陆内成矿作用[J]. 地学前缘, 11(1): 85-98.
- 翟明国, 孟庆任, 刘建明, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟, 邵济安, 朱日祥. 2004b. 华北东部中生代构造体制转折高峰期的主要地质效应和形成动力学探讨[J]. 地学前缘, 11(1): 85-97.
- 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 孟庆任, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟. 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限 [J]. 中国科学(D辑), 33 (10): 913-920.
- 张连昌, 沈远超, 刘铁兵, 杨金中, 曾庆栋, 李光明. 2000. 胶东蓬家夼金矿成矿构造地质地球化学特征[J]. 大地构造与成矿, 24 (4): 377-384.
- 张连昌, 沈远超, 刘铁兵, 杨金中, 邹为雷, 李厚民. 2002. 山东蓬家夼金矿硫铅碳氧同位素地球化学[J]. 矿物学报, 22(3): 255-260.
- 张连昌, 沈远超, 曾庆栋, 邹为雷. 2001. 山东中生代胶莱盆地北缘金矿床硫铅同位素地球化学[J]. 矿物岩石地球化学通报, 20(4): 380-384.
- 张竹如, 陈世桢. 1999. 胶东金成矿域胶莱盆地中超大型金矿床找矿远景[J]. 地球化学, 28(3): 203-212.
- 张理刚. 1989. 湖南东坡千里山花岗岩和钨多金属矿床稳定同位素地球化学[J]. 桂林冶金地质学院学报, 9(3): 259-267.
- 张田, 张岳桥. 2007. 胶东半岛中生代侵入岩浆活动序列及其构造制约[J]. 高校地质学报, 13(2): 323-336.

郑建平, 路凤香, O'Reilly S Y, Griffin W L, 张明. 1999. 华北地台东部古生代与新生代岩石圈地幔特征及其演化[J]. 地质学报, 73(1): 47-56.

References:

- BILLSTROM K. 1990. Lead isotope study of two sulphide deposits and adjacent igneous rocks in south-central Sweden[J]. Mineralium Deposita, 25: 152-159.
- CLAYTON R N, O'NEIL J L, MAYEDA T K. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. Journal Geophysical Research, B77: 3057-3067.
- CHEN Yan-jing, PIRAJNO F, LAI Yong, Li Chao. 2004. Metallogenetic time and tectonic setting of the Jiaodong gole province, eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 20(4): 907-922(in Chinese with English abstract).
- CHEN Guang-yuan, SHAO Wei, SUN Dai-sheng. 1989. Prospecting Mineralogy and Genesis of Gold Deposits in Jiaodong[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House: 1-452(in Chinese).
- FAN Hong-rui, HU Fang-fang, YANG Jin-hui, SHEN Kun, ZHAI Ming-guo. 2005. Fluid evolution and large-scale gold metallogenesis during Mesozoic tectonic transition in the Eastern Shandong province[J]. Acta Petrologica Sinica, 21(5): 1317-1328(in Chinese with English abstract).
- FAN Hong-rui, ZHAI Ming-guo, XIE Yi-han, YANG Jin-hui. 2003. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China[J]. Mineralium Deposita, 38: 739-750.
- FRIMMEL H E, JONASSON I R, MUBITA P. 2004. An Eburnean base metal source for sediment-hosted zinc-lead deposits in Neoproterozoic units of Namibia: Lead isotopic and geochemical evidence[J]. Mineralium Deposita, 39: 328-343.
- GAO Yu-juan, ZHANG Ya-ming, YAN Ping-ke. 2006. Study of ore-controlling conditions and ore-forming type of Tudui gold deposit in Haiyang Shandong[J]. Journal of Liaoning Institute of Technology, 26(4): 239-242(in Chinese with English abstract).
- GAO Shan, RUDNICK R L, YUAN Hong-ling, LIU Xiao-ming, LIU Yong-sheng, XU Wen-liang, LING Wen-li, AYERS J, WANG Xuan-che, WANG Qing-hai. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton[J]. Nature, 432: 892-897
- HARKINS S A, APPOLD M S, NELSON B K, BREWER A M, GROVES I M. 2008. Lead isotope constraints on the origin of nonsulfide zinc and sulfide zinc-lead deposits in the flinders ranges, South Australia[J]. Economic Geology, 103: 353-364.
- HUANG De-ye. 1994. Sulfur isotope studies of the metallogenetic series of gold deposits in Jiaodong(East Shandong)area[J]. Mineral Deposits, 13(1): 75-87(in Chinese with English abstract).
- LI Jian-wei, VASCONCELOS P M, ZHOU Mei-fu, ZHAO Xin-fu, MA Chang-qian. 2006. Geochronology of the Pengjiakuang

- and Rushan gold deposits, eastern Jiaodong gold province, northeastern China: Implications for regional mineralization and geodynamic setting[J]. *Economic Geology*, 101: 1023-1038.
- LI Hua-qing, LIU Jia-qi, WEI Lin. 1993. Hydrothermal deposits chronological study of fluid inclusions and its geological application[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-126(in Chinese).
- LIU Yu-qiang, SHI Hui, LI Jun, HUANG Tai-ling, JIN Ying-mei, WANG Fang. 2004. Geological, geophysical and geochemical characteristics of gold deposits around Jiaolai basin, Shandong province and their prospecting significance[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(6): 593-600(in Chinese with English abstract).
- MAO Jing-wen, WANG Yi-tian, LI Hou-min, Pirajno Franco, ZHANG Chang-qing, WANG Rui-ting. 2008. The relationship of mantle-derived fluids to gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula: Evidence from D-O-C-S isotope systematics[J]. *Ore Geology Reviews*, 33: 361-381.
- OHMOTO H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotope in hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 67: 551-579.
- SHEN Yuan-chao, LIU Tie-bing, LU Hou-min, LI Guang-ming, LIU Fu-tao. 2001. Geological and geochemical features and genesis of Guocheng gold deposit in Haiyang county, Shandong province[J]. *Geology and Prospecting*, 37(1): 38-44(in Chinese with English abstract).
- SUN Feng-yue, SHI Zhun-li, FENG Beng-zhi. 1995. Geology of Deposit and Mantle-Derived C-H-O Fluid Differential Petrogenesis and Metallogenesis[M]. Changchun: Jilin People Press: 1-170(in Chinese).
- STACEY J S, KRAMERS J D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage mode[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 26: 207-221.
- STENDAL H. 1998. Contrasting Pb isotopes of Archaean and Palaeoproterozoic sulphide mineralisation, Disko Bugt, central West Greenland[J]. *Mineralium Deposita*, 33: 255-265.
- TAN Jun. 2009. Magmatic evolution process of dikes in Guocheng fault zone, Jiaodong Peninsula: Implications for North China craton lithosphere thinning and gold ore formation[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 1-130(in Chinese with English abstract).
- TAN Jun, WEI Jun-hao, GUO Ling-li, ZHANG Ke-qing, YAO Chun-liang, LU Jian-pei, LI Hong-mei. 2008. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and phenocryst EPMA of dikes, Guocheng, Jiaodong Peninsula: Implications for North China Craton lithosphere evolution[J]. *Science in China Series D-Earth Science*, 51(10): 1483-1500.
- TAYLOR H P. 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alternation and ore deposition[J]. *Economic geology*, 69: 843-883.
- WANG Yi-wen, ZHU Feng-san, GONG Run-tan. 2002. Tectonic isotope geochemistry—Further study on sulphur isotope of Jiaodong Gold Concentration Area[J]. *Gold*, 23(4): 1-16(in Chinese with English abstract).
- WANG Yi-wen. 1988. Lead isotopic composition of gold deposits, North-Western Jiaodong Shandong, and its geological significance[J]. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 18(3): 277-286(in Chinese with English abstract).
- WU Fu-yuan, LIN Jing-qian, WILDE S A, ZHANG Xiao-ou, YANG Jin-hui. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 233: 103-119.
- XIA Lin. 2003. Tectonic Physicochemistry Study on Regional Fluid in East Shandong Area during Mesozoic Gold Mineralization [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1-142 (in Chinese with English abstract).
- XU Guo-min, HAN Jing-tao. 1998. Geological characteristics of Tudui gold deposit in Haiyang county, Shandong province[J]. *Shandong Geology*, 14(4): 37-41(in Chinese with English abstract).
- XU Wen-liang, WANG Qing-hai, WANG Dong-yan, PEI Fu-ping, GAO Shan. 2004. Processes and mechanism of Mesozoic lithospheric thinning in eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic igneous rocks and deep-seated xenoliths[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 309-317(in Chinese with English abstract).
- YANG Jin-zhong, SHEN Yuan-chao, LIU Tie-bing, ZHANG Lian-chang, ZOU Wei-lei, LI Guang-ming, ZENG Qing-dong. 2001. Geological and geochemical characteristics of Pengjiakuang gold deposit, east Shandong[J]. *Chinese Journal of Geology*, 36(1): 51-63(in Chinese with English abstract).
- YANG Jin-zhong, ZHAO Yu-ling, SHEN Yuan-chao, LI Hou-min. 2000b. Golden mineralization associated with lower-angle detachment faults in the northeast of Jiaodong-Laiyang basin[J]. *Gold Science and Technology*, 8(4): 13-20(in Chinese with English abstract).
- YANG Jin-zhong, SHEN Yuan-chao, LIU Tie-bing, ZENG Qing-dong, ZOU Wei-lei. 2000a. Geochemical characteristics of ore-forming fluids in the Pengjiakuang gold deposit, Shandong province[J]. *Mineral Deposits*, 19(3): 235-244(in Chinese with English abstract).
- YANG Jing-zhong. 2000c. Genetical and prospecting model of the Pengjiakuang type gold deposit, jiaodong region, Shandong province[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences: 1-142(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Ming-guo, FAN Hong-rui, YANG Jin-hui, MIAO Lai-cheng. 2004a. Large-scale cluster of gold deposits in east Shandong: anorogenic metallogenesis[J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 11(1): 85-97(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Ming-guo, YANG Jin-hui, FAN Hong-rui, MAO Lai-cheng, LI Yong-gang. 2002. A large-scale cluster of gold deposits and metallogenesis in the Eastern North China craton[J]. Interna-

- tional Geology Review, 44: 458-476.
- ZHAI Ming-guo, MENG Qing-ren, LIU Jian-ming, HOU Quan-lin, HU Sheng-biao, LI Zhong, ZHANG Hong-fu, LIU Wei, SHAO Ji-an, ZHU Ri-xiang. 2004b. Main geological characteristics and geotectonic discussion for Mesozoic tectonic inversion in eastern North China[J]. Earth Science Frontiers, 11(1): 85-98(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Ming-guo, ZHU Ri-xiang, LIU Jian-ming, MENG Qing-ren, HOU Quan-lin, HU Sheng-biao, LI Zhong, ZHANG Hong-fu. 2003. Time-range of Mesozoic tectonic regime inversion in eastern north China block[J]. Science in China(Series D), 33(10): 913-920(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Lian-chang, SHEN Yuan-chao, LIU Tie-bing, ZENG Qing-dong, LI Guang-ming. 2000. Geological and geochemical characteristics of ore-controlling structures in the Pengjiakuang gold deposit in eastern Shandong, China[J]. Geotectonica et Metallogenica, 24(4): 377-384(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Lian-chang, SHEN Yuan-chao, LIU Tie-bing, ZENG Qing-dong, LI Guang-ming, LI Hou-min. 2003. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Rb-Sr isochron dating of the gold deposits on northern margin of the Jiaolai Basin, Shandong, China[J]. Science in China (Series D), 32(9): 727-734.
- ZHANG Lian-chang, SHEN Yuan-chao, LIU Tie-bing, YANG Jin-zhong, ZOU Wei-lei, LI Hou-min. 2002. Sulfur, lead, carbon and oxygen isotope geochemistry of Penjiakuang gold in Shandong province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 22(3): 255-260(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Lian-chang, SHEN Yuan-chao, ZENG Qing-dong, ZOU Wei-lei. 2001. Sulfur and lead isotopic geochemistry of gold deposits at the Northern margin of Jiaolai Basin, East Shandong[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 20(4): 380-384(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhu-ru, CHEN Shi-zhen. 1999. Superlarge gold deposit exploration perspective in Jiaolai Basin of Jiaodong gold metallocgenic domain[J]. Geochimica, 28(3): 203-212(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Li-gang. 1989. Stable isotope geochemistry of Qianlishan granites and tungsten-polymetallic deposits in Dongpo area, Hunan[J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 9(3): 259-267(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Tian, ZHANG Yue-qiao. 2007. Geochronological sequence of Mesozoic intrusive magmatism in Jiaodong peninsula and its tectonic constraints[J]. Geological Journal of China Universities, 13(2): 323-336(in Chinese with English abstract).
- ZARTMAN R E, DOE B R. 1981. Plumbotectonics—the model[J]. Tectonophysics, 75: 135-162.
- ZHRNG Jian-ping, LU Feng-xiang, O'REILLY S Y, GRIFFIN W L, ZHANG Ming. 1999. Comparison between Palaeozoic and Cenozoic Lithospheric Mantle in the Eastern Part of the North China Block—With a Discussion of Mantle Evolution[J]. Acta Geologica Sinica, 73(1): 47-56(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Xin-hua, YANG Jin-hui, ZHANG Lian-chang. 2003. Metallogenesis of superlarge gold deposits in Jiaodong region and deep processes of subcontinental lithosphere beneath North China Craton in Mesozoic[J]. Science in China(D), 47(supp): 14-25.

英国伯明翰大学设立李四光奖学金

2010年10月12日，英国伯明翰大学在上海举行招待会庆祝伯明翰大学与中国的世纪合作。招待会上，英国伯明翰大学宣布设立李四光奖学金，纪念李四光先生对科学和社会做出的杰出贡献。李四光先生于1914—1918年就读于伯明翰大学，被授予学士、硕士和博士学位。

中国地质科学院地质力学研究所所长，曾在伯明翰大学任研究员的龙长兴博士应邀出席了招待会。伯明翰大学校长 David Eastwood 教授还将一份李四光先生的博士论文原件赠给了李四光先生的外孙女邹宗平女士。

该奖学金将从2011年开始实施。第一阶段为18名赴伯明翰大学攻读博士学位的中国留学生提供3年的全额奖学金。

本刊编辑部 采编