doi:10.3799/dqkx.2014.031

郯庐断裂带晚白垩世金成矿作用:来自龙泉站 金矿床黄铁矿 Rb-Sr 年代学证据

石文杰,魏俊浩,谭 俊,李艳军,付乐兵,李 欢,赵少卿,田 宁

中国地质大学资源学院,湖北武汉 430074

摘要:龙泉站金矿床位于郯庐断裂带山东段内中段,为沂沭断裂金成矿带的重要组成部分,同时也是目前沂沭断裂带内发现的唯一一个碎裂蚀变岩型金矿,矿体主要产于沂水一汤头断裂内的破碎带以及下盘变质岩系中.应用 Rb-Sr 同位素定年方法 对该矿床 10 件黄铁矿样品进行了成矿时代测定,获得黄铁矿 Rb-Sr 同位素等时线年龄为 96±2 Ma(MSWD=1.2),该年龄与 断裂带内及附近目前发现的早白垩世晚期至晚白垩世早期岩浆活动时限(106~96 Ma)相吻合.同时结合近些年来山东省成 岩成矿的高精度年代学以及矿产勘查成果资料,表明华北克拉通东南缘亦存在晚白垩世金成矿作用.成矿构造背景与该时期 沂沭断裂带不断引张及减压环境有关.伸展机制可能导致断裂带内及附近软流圈不断抬升,等温线升高,其进而诱发的强烈 壳幔作用为金成矿提供了物质和流体来源.龙泉站晚白垩世金成矿事件的确定,也为郯庐断裂带内及其两侧矿床成因对比和 找矿实践提供了参考.

关键词: Rb-Sr 同位素测年;沂沭断裂带;成矿时代;华北克拉通;矿床;地质年代学;胶东;鲁西. 中图分类号: P597 文章编号: 1000-2383(2014)03-0325-16 收稿日期: 2013-07-12

Late Early Cretaceous Gold Mineralization in Tan-Lu Fault Zone: Evidence from Rb-Sr Isotopic Dating of Pyrite from Longquanzhan Gold Deposit

Shi Wenjie, Wei Junhao, Tan Jun, Li Yanjun, Fu Lebing, Li Huan, Zhao Shaoqing, Tian Ning

Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Longquanzhan gold deposit, an important part of gold mineralization belt of Yi-Shu fault zone, is the only altered tectonite-type gold deposit discovered in the area at present. The ore bodies mainly occur at the fracture zone and the footwall metamorphic rocks. Rb-Sr isotopic dating of 10 pyrites separated from the Longquanzhan gold deposit yields an isochron age of 96 ± 2 Ma (MSWD=1.2), which is in good agreement with the late Early Cretaceous to early Late Cretaceous magmatism (106-96 Ma) in adjacent area of Yi-Shu fault zone. Meanwhile, combining with the precise ages of gold deposits in Shandong Province and mineral exploration data, we suggest that late Early Cretaceous gold mineralization may occur in the southeastern margin of North China Craton, and its tectonic setting is related to an extensional setting which resulted in a large-scale asthenosphere upwelling, accompanying decompression and isotherm upwelling, material exchange and mixing between mantle and crust, and finally providing a great amount of ore-forming fluids and materials for gold mineralization. According to the precise age of Longquanzhan gold deposit reported, this discovery is of great significance both in gold deposit origin contrast of both sides and future mineral exploration.

Key words: Rb-Sr isotopic dating; Yi-Shu fault zone; ore-forming time; North China Craton; ore deposits; geochronology; Jiaodong; Luxi.

成矿年代学是矿床成因研究工作的重要基础, 且一直以来是矿床学研究的难点(Jiang *et al.*, 2000).研究表明黄铁矿中往往含有较高含量的 Rb、 Sr 以及稀土元素(陈光远等,1989),可能赋存于流

基金项目:中国地质大学(武汉)高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20120145110004);中央高校基本科研业务费专项资金(Nos. CUG120702, CUG120842);中国博士后科学基金(No. 2012M521493).

作者简介:石文杰(1985-),男,博士研究生,主要从事矿床地球化学研究工作. E-mail: swjhaoo@126. com

体包裹体(Lüders and Ziemann, 1999)、晶格缺陷 (陈光远等,1989)以及矿物包裹体中(Li et al., 2007), 这表明 Rb、Sr 同位素可以用来示踪成矿流 体演化过程,而黄铁矿本身 Rb、Sr 含量以及 Rb/Sr 比值的变化则为年代学测定提供了有利的条件.传 统的 Rb-Sr 测年工作在满足同源、同时、封闭系统等 前提条件下,通常利用矿石矿物或蚀变矿物来直接 或间接限定成矿时代,但由于受野外采样、测试仪器 等条件的制约,所获得的年龄往往误差较大或没有 实际的地质意义.近年来,随着测试技术的不断进 步,一些学者利用微量黄铁矿样品成功限定了成矿 时代,如玲珑金矿(Yang and Zhou, 2001; Li et al., 2007);微量黄铁矿(亚样品与单颗粒黄铁矿) Rb-Sr 处理流程拓宽了 Rb-Sr 等时线定年方法在矿 床定年中的应用,在很大程度上避免了传统 Rb-Sr 测年工作中测试仪器高本底、低灵敏度和样品量较 大、类型多的缺点,并显示出很大的优势.

山东省位于华北克拉通东南缘,是我国重要的

黄金产地之一(图1),区内金矿床星罗棋布,成因类 型复杂,主要以石英脉型(玲珑式)与蚀变岩型(焦家 式)金矿为主,次为隐爆角砾岩型(七宝山铜金矿、归 来庄金矿等)、矽卡岩型(沂南金矿)及盆地边缘砾岩 型(蓬家夼、发云夼)等.已有的年代学数据表明山东 省金矿成矿时代主要集中于 110~130 Ma(涂光炽 和赵振华, 1983; Zhai et al., 2001; 陈衍景等, 2004; Li et al., 2012). 沂沭断裂带作为华北克拉 通东部最主要的骨干断裂,分别控制了上述临沂与 胶东等2个最大的金矿矿集区.国内外对郯庐断裂 带本身研究众多,而对断裂带内发育的金、铜、铅、锌 等矿产的成矿作用尤其是精确的成矿时代研究较 少,仅有少数研究主要集中于成矿特征、成矿机制等 方面(李洪奎等,2004,2007,2009,2011). 龙泉站 金矿是目前在沂沭断裂带内发现的唯一一个蚀变岩 型金矿,属于沂沭断裂带金属成矿带的重要组成部 分,但针对该矿床成矿时代研究相对较少,以往研究 多是根据沂沭断裂带两侧研究程度较高的矿床对比



图 1 华北克拉通大地构造位置(a)和山东省地质矿产简图(b)

Fig. 1 The tectonic setting of North China Craton and the geology (a) and major mineral deposits of Shandong Province (b) a. 据 Santosh *et al.* (2010); Li *et al.* (2012)修改; b. 据徐贵忠等(2002)修改

推断.关于沂沭断裂带内金矿成矿时代目前仅有少量的蚀变钾长石 K-Ar、锆石 U-Pb 年代学资料,李 洪奎等(2009,2011)根据沂水龙泉站金矿、南小尧 金矿和牛家小河金蚀变钾长石获得的 K-Ar 年龄值 分别为 141.92±2.06 Ma、94.29±1.38 Ma、 95.92±1.40 Ma,南小尧金矿矿石中挑选的锆石采 用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年获得下交点年龄为 116±20 Ma,认为金矿的形成应在早白垩世中一晚 期.由于缺乏高精度的成矿年代学研究,在一定程度 上制约了矿床成因研究以及找矿工作.为此,本文在 矿床地质学、矿石学研究的基础上,选取沂沭断裂带 内部龙泉站金矿床为研究对象,应用黄铁矿 Rb-Sr 定年方法首次精确厘定了该矿床的成矿时代,并探 讨了矿床成因以及成矿构造背景.

1 区域地质背景

研究区位于华北克拉通东南缘,沂沭断裂带中 南段,东临胶东、胶南地块,西接鲁西地块(图 la、 1b). 区内地层与鲁西地块相似,主要出露新太古代 沂水杂岩(沂水岩群与太古代岩浆杂岩)及泰山岩 群、新元古代土门群、寒武纪一奥陶纪长清群、九龙 群和马家沟组、白垩纪青山群、大盛群及第四系. 沂 水岩群主要岩性为二辉麻粒岩夹紫苏麻粒岩、紫苏 辉石斜长角闪岩、黑云变粒岩等,为一套经受了高级 变质作用的火山岩一陆缘碎屑岩一硅质岩沉积建 造,沈其韩等(1994)获得了二辉斜长角闪岩的 Sm-Nd 同位素年龄,为 2 993~2 997 Ma. 赵子然等 (2009)通过锆石 SHRIMP U-Pb 定年获得了该岩 石早期麻粒岩相变质与晚期角闪岩相一麻粒岩相变 质作用的时间,其中早期变质年龄下限和上限分别 为2719 Ma 和2560~2607 Ma,晚期变质年龄为 2 509~2 522 Ma. 泰山岩群为一套高角闪岩相变质 岩系,主要岩性为石榴石英岩、斜长角闪岩、黑云变 粒岩、二云石英片岩、透闪阳起片岩、石墨片岩、磁铁 石英岩及科马提岩等.自下而上划分为孟家屯岩组、 雁翎关岩组、山草峪岩组、柳杭岩组. 王世进等 (2012)通过锆石 SHRIMP U-Pb 定年精确地厘定 了孟家屯岩组与雁翎关岩组形成年代为2750~ 2700 Ma,而山草峪岩组与柳杭岩组形成年龄为 2560~2530 Ma. 新元古代土门群主要分布于汞丹 山断隆区东侧的浮来山地区,近南北向长条分布.下 部岩性以页岩、石英砂岩为主,中上部为页岩、石英 砂岩夹薄层灰岩.寒武纪一奥陶纪地层主要为一套 海相石灰岩,次为白云岩、页岩及少量砂岩、粉砂岩 沉积建造,白垩纪青山群岩性以中基性火山岩为主, 局部为酸性火山岩,自下而上依次为后夼组、八亩地 组、石前庄组与方戈庄组,沂沭断裂带内主要发育八 亩地组与石前庄组地层. 邱检生等(2012)获得了汤 头盆地内八亩地组黑云母粗安岩与辉石粗安岩的锆 石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为 124.0±1.3 Ma 与 106.4±4.0 Ma. 李友连等(2012)获得了郯城神 泉八亩地组钠质火山岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为96.5±1.4 Ma,因此,青山群火山岩在沂沭 断裂带内主要形成于 125~96 Ma 之间. 大盛群为 一套紫色砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩夹安山岩和安山 质凝灰岩等陆源碎屑岩相组合,自下而上可分为小 店组、大土岭组、马朗沟组、田家楼组、寺前庄组与孟 疃组,马站-苏村盆地内广泛出露.区内主要发育马 朗沟组地层,主要为紫红色长石细砂岩夹黄绿色粉 砂岩,局部夹流纹质角砾熔岩.大盛群与青山群既不 是严格的上、下关系,也不是完全的同期相变,而是 大盛群的底界高于青山群的底界,二者呈交叉对应 关系(刘明渭等,2003).

区内侵入岩主要有新太古代与中生代两期,其 中新太古代侵入岩主要由一系列岩浆杂岩组成,主 体岩性为片麻状二长花岗岩,同时也是龙泉站金矿 的主要赋矿围岩,其成岩年龄主要集中于2537~ 2582 Ma(沈其韩等,1997,2000,2004,2007;苏尚 国等,1999;赵子然等,2008),为新太古代岩浆活动 产物.上述新太古代岩浆杂岩与新太古代变质表壳 岩(沂水岩群)构成区内的沂水杂岩,变质表壳岩以 角闪岩一基性麻粒岩为主,统称变基性岩,变基性岩 多以透镜状或包裹体形式产出于岩浆杂岩中,局部 可见成层分布.中生代岩体较少,以中基性脉岩为 主,目前尚无年代学数据.

沂沭断裂带为郯庐断裂带的山东段,主要由4 条断裂构成,自西向东依次为鄌郚一葛沟、沂水一汤 头、安丘一莒县和昌邑一大店断裂,构成了两堑(安 丘一莒县、马站一苏村地堑)夹一垒(汞丹山地垒)的 构造格局(图 1b).区内主要存在3种构造形式:韧 性剪切带、脆性断裂及褶皱,其中韧性剪切带发育于 古老的结晶基底中,产状有 NE-NNE 与 NEE 两组, 并往往被后期的脆性断裂叠加,褶皱构造多发育在 中生代地层分布区,呈多字形,在沂水岩群与泰山岩 群中也常见小型揉皱与牵引褶皱.

2 矿床地质特征

矿区跨汞丹山断隆和马站-苏村断陷两个N级构造单元,位于汞丹山凸起中部和苏村凹陷北部交界部位.区内地层出露简单,主要为白垩纪大盛群马朗沟组地层;岩浆岩以太古代早期泰山岩套望府山条带状细粒英云闪长岩与傲徕山超单元条花峪二长花岗岩为主,为矿区主要的赋矿围岩;中生代中基性脉岩主要有闪长岩、辉长岩、辉绿岩、煌斑岩等;区内构造形迹复杂,以沂水-汤头断裂为主干断裂,它是控制汞丹山凸起与马站-苏村凹陷的分划性断层,同时也是矿区内主干断裂构造以及控矿断裂,自南向北纵贯全区,区内出露总长度约13 km,影响宽度80~460 m. 走向上表现为舒缓波状,总体走向10°~25°,倾向 NW,倾角 30°~56°(图 2,图 3a).

该主干断裂及其下盘古老结晶基底中的北东一 北北东一北东东向次级脆一韧性构造带,是主要控 矿构造.沿方水一汤头断裂带主要分布有2种类型 的金矿,主要包括石英脉型(规模较小),分布于沂水 县东营、刘家岭、南小尧及沂南张家哨等地,矿体多 呈脉状赋存于变质基底岩系或中生代岩体内,沿走 向多呈舒缓波状. 龙泉站金矿为目前沂沭断裂带内 发现的唯一一个碎裂蚀变岩型金矿,矿体主要产于 中生代白垩纪大盛群马朗沟组地层与新太古代变质 基底接触带部位,以及沂水一汤头大断裂下盘新太 古代变质岩系中(图 2,图 3a),其中新太古代傲徕山 岩套条花峪二长花岗岩、花岗闪长岩以及呈捕掳体 形式产出的斜长角闪岩是矿区内矿体的主要赋矿围 岩.随着与沂水一汤头断裂的距离逐渐减小,岩石的 糜棱岩化强度逐渐增强,后期伴随的碎裂岩化也逐 渐增强,易于后期矿液的充填交代成矿.目前矿区内 已发现近于平行的2条矿化蚀变带(Ⅰ号、Ⅱ号),其 中1号矿化蚀变带是沂水一汤头断裂的主要组成部 分,为区内主要的含矿构造带.该带延长大于 11 km,南至牛家小河矿床,北至司家官庄;带内岩 石较破碎,镜下观察可见造岩矿物破碎,矿石类型主 要有黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩(图 3c,图 4d、4e)、 黄铁绢英岩化糜棱岩质碎裂岩(图 3d)、蚀变绿片岩



图 2 据山东省地质调查院山东省沂南县龙泉站矿区金矿普查报告(2009)修编;1. 地质界线;2, 断裂;3. 矿体;4. 花肉糜棱岩质碎裂岩带;5. 碎裂岩;6. 钻孔;Ar₃¹⁻²gn²⁰b. 新太古代卑胡泰山岩套望府山条带状细粒英云闪长岩;Ar₃³⁻²gy^m,新太古代傲侠山超单元条花峪二长花岗岩; K₁ml. 白垩系大盛群马朗沟组紫红色长石细砂岩夹黄绿色粉砂岩;γπ. 燕山晚期花岗斑岩;2. 煌斑岩脉;δμ. 闪长岩脉;βμ. 辉绿岩脉; v₅³. 辉长 岩; I、II. 代表矿化蚀变带



图 3 龙泉站金矿床野外地质现象、矿石类型以及矿化特征

Fig. 3 Geology ore type and mineralization features of the Longquanzhan gold deposit a. 沂水一汤头断裂带;b. 接触带位置大盛群马朗沟组紫红色含砾长石砂岩角砾被后期石英、碳酸盐、重晶石以及萤石等矿物胶结;c. 网脉状花 岗质碎裂岩型矿石,根据穿插关系可分 3 个成矿阶段;d. 黄铁绢英岩化糜棱岩质碎裂岩,矿石中局部可见残留的二长花岗岩

以及石英脉型;目前已初步控制了10余个金矿体, 矿体总体呈脉状、透镜状、不规则条带状、扁豆状,产 状与区内沂水一汤头断裂基本一致,倾向上产状由 陡变缓,呈南南西侧伏,侧伏角约 40°. Ⅱ号矿化蚀 变带长2.3 km,宽5~60 m,其内已控制2个金矿 体;矿石以黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩型为主,呈脉 状 NNE 向展布: 矿石构造以块状(图 3d)、角砾状、 网脉状(图 3c)、浸染状为主,矿石结构以脉状交代、 充填、包含、镶边结构和交代残余结构、胶状结构为 主;矿石中金属矿物以银金矿、自然金、黄铁矿为主, 含有少量的黄铜矿、毒砂以及方铅矿,其中自然金以 裂隙金、晶隙金或包体金形式赋存于黄铁矿中 (图 4c);非金属矿物主要以石英、方解石、绢云母、 钾长石、绿泥石、斜长石、重晶石、高岭土、萤石为主; 近矿围岩蚀变以硅化、绿泥石化、绢云母化、方解石 化为主,次为萤石化、重晶石化,并伴随黄铁矿化,矿 与非矿界限不明显.

根据矿石结构构造、矿物组合以及矿物的穿插 关系,龙泉站金矿可分为内生期和表生期2个成矿 期,内生期可进一步划分为4个成矿阶段: A石英-黄铁矿阶段:主要矿物组合为石英、黄 铁矿等,是早期的矿化,但矿化较弱,黄铁矿呈粗粒 自形-半自形状(图 4a).

B石英一绢云母一黄铁矿阶段:主要矿物组合 为石英、绢云母、黄铁矿等,该阶段糜棱岩质碎裂岩 普遍发生黄铁矿化、绢云母化蚀变(图4d~4f),但 金矿化微弱,该阶段黄铁矿为中粒自形结构,为第二 世代黄铁矿(图4a、4b).

C金一石英一多金属硫化物阶段:该阶段矿物 组合复杂,以黄铁矿、石英为主,次有黄铜矿、方铅 矿、闪锌矿、银金矿、自然金等,黄铁矿多呈细粒自 形一半自形粒状、浸染状分布,部分聚集成细脉状; 金矿物与多金属硫化物大多沿黄铁矿的裂隙或晶隙 分布,部分呈包体金(图 4c).

D碳酸盐化阶段:是晚期矿化阶段,该阶段形成 的矿物主要为方解石脉和黄铜矿,其中碳酸盐岩矿 物多呈细脉状产出,黄铜矿多为自形晶,呈团块状、 脉状产于方解石脉中,局部形成单独的铜矿体.

表生期主要以形成褐铁矿、孔雀石等矿物为主. 由于沂沭断裂带为相对开放系统,矿液以流渗



图 4 龙泉站金矿床矿石与蚀变围岩镜下照片

Fig. 4 Photomicrographs of selected ores and wall rock with hydrothermal alterations from the Longquanzhan gold deposit a. 早期自形一半自形黄铁矿(Py1)破碎,并被中细粒黄铁矿(Py2)以及硅酸盐细脉穿插交代;b. 细粒黄铁矿(Py3)硅酸盐脉穿插于中粒黄铁矿 (Py2)硅酸盐脉和黄铁矿之间相互绕行,无明显穿插交代关系;c. 自然金以晶隙金与包体金形式赋存于黄铁矿中;d. 花岗质碎裂岩发育硅化、绢 云母化、黄铁矿化,多个矿物颗粒构成的碎斑周边常发育细脉状绢云母,并伴随着少量的自形粒状黄铁矿;e. 围岩花岗质岩石中的斜长石是发 生破碎、位错等应力作用的产物,局部被后期石英穿插与交代,颗粒内部有一组明显的斜列式破裂面,有不均匀消光和波状消光的现象,碎斑的 成分主要由石英、斜长石和钾长石等构成;f. 穿插于早期硅化、绢云母化蚀变岩的石英一黄铁矿细脉;Py1. 第1阶段黄铁矿;Py2. 第2阶段黄铁 矿;Py3. 第3阶段黄铁矿;Q. 石英;Pl. 斜长石;Ser. 绢云母;Au. 自然金;Kf. 钾长石

作用较快速上移,造成脉石矿物中流体包裹体包体 较小、流体类型较简单(以 NaCl-H₂O 型为主,未发 现 CO₂ 型)等.早期成矿流体为中高温(330~ 260℃,最高可达 500℃)、中等盐度(8.5%~ 12.39%)的岩浆流体;晚期为低温(160~125℃)、 低盐度(3.5%~6.5%)的岩浆水与天水的混合流体 (李洪奎,2010).上述特征与鲁西地区金矿类似.

3 样品采集及分析方法

热液矿物 Rb-Sr 定年的基本前提是样品满足同源、同时、封闭系统、Rb/Sr 比值的差异性或者 Rb-Sr 同位素体系被完全重置的条件.在中低温热液矿床中,热液矿物中通常含有均一温度相差不大的原生与次生包裹体(张长青等,2008),为了尽量避免矿

物中次生包裹体的影响,在空间位置上,本次用于 Rb-Sr 测年的 10 件样品采集是在露天采坑内沿同 一矿脉走向局部范围内近等距进行的,样品新鲜、无 风化,以块状、稠密浸染状与网脉状矿石为主,矿石 矿物以黄铁矿为主,镜下观察不同阶段的黄铁矿粒 度、自形程度具有一定程度的差别(图 4a、4b),且不 同阶段的黄铁矿主要以脉状充填结构为主(图 4b), 相互穿插交代的现象较少. 第1阶段粗粒黄铁矿具 有一定程度的破碎,并被后期脉石矿物穿插充填,粒 径约在1~3mm之间,多集中于1.5mm左右;第2 阶段黄铁矿主要呈中粒自形晶,晶形较为完整,后期 破碎较弱,粒径在 0.5~1 mm 之间,多集中于 0.5 mm左右;第3阶段黄铁矿粒度最细,基本上均 小于0.5 mm,较为自形,基本无后期破碎与脉石矿 物穿插.基于上述不同阶段黄铁矿之间粒径的差别, 在矿物选择上,本文挑选了其中较为自形、裂隙不发 育、很少有后期脉石矿物穿插的第2阶段黄铁矿颗 粒,并在加工时将样品粉碎至200目以下,因而在很 大程度上满足了 Rb-Sr 测年的同源、同时、封闭与初 始比值一致的前提条件.

本文测试的 10 件黄铁矿样品经过不同浓度 HCl+HNO₃ 混合酸、H₂SO₄和 HNO₃+HClO₄ 混 合酸的多次消化溶解成清液,蒸干后以酸为介质溶 解成清液,并将该溶液一分为二:一份为测定同位素 解成清液,并将该溶液一分为二:一份为测定同位素 比值样品(不加 Rb-Sr 同位素稀释剂),另一份为测 定同位素含量样品(加进口高纯丰度的 Rb-Sr 同位 素稀释剂).静置 12 h以达同位素平衡,待上分离 拄.样品中的 Rb-Sr 同位素比值测定均在南京大学 现代分析中心用英国制造的新近改造的 VG354 多 接收同位素质谱计完成.测定 Rb-Sr 同位素含量,一 般采用单接收系统.测 Sr 同位素比值采用 5 个多接 收器,用峰跳式扫描测定软件程序进行测定.为了获 取高精度 Sr 同位素比值,采用相对低些的发射电流 和高效率的发射剂,每一个样品测定要用 3~5 h 以 上的测定时间.实验测定美国国家标准局 NBS-987 碳酸盐锶同位素标准样中⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 测定值为 0.710 241±7(2σ , n=8),⁸⁶ Sr/⁸⁸ Sr=0.119 4为标准 化值; Sr 的全流程本底为 3×10⁻⁹ g.实验给出 TIMS 测定的 Rb、Sr 含量和⁸⁵ Rb/⁸⁷ Rb、⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 同 位素比值,同时给出测定的美国 NBS-987 Sr 同位素 标准值,以⁸⁶ Sr/⁸⁷ Sr=0.119 4 为标准化值,测得 ⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr=0.710 224±8,n=10; Sr 全流程本底为 3×10⁻⁹ g.详细的 Rb-Sr 同位素化学制备、质谱测 定方法以及各类标准样品测定结果可参考王银喜等 (2007)和 Wang *et al.*(2007).

4 结果

龙泉站金矿黄铁矿 Rb-Sr 同位素测试数据见 表 1,年龄计算采用国际通用的 Ludwig(1998)研制 的 ISOPLOT 计算程序.在等时线年龄计算中,样品 ⁸⁷ Rb/⁸⁶ Sr 为 1%,⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 误差(2σ)采用 0.01%. 本次测试的 10 件黄铁矿样品计算得到的 Rb-Sr 等 时线年龄为 96±2 Ma(MSWD=1.2),计算得到黄 铁矿的⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 初始比值为 0.714 090±0.000 10 (n=10)(图 5).

5 讨论

5.1 龙泉站金矿成矿时代

本次测试的 10 件黄铁矿样品 Rb 变化范围为 3.984~19.860, Sr 为 7.494~31.390, Rb/Sr 比值 为 0.16~2.05, 变化范围较大, 表明测试的黄铁矿 中可能存在 Rb 和 Sr 的分异, 这一点在 1/Sr-⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr和1/Rb-⁸⁷ Rr/⁸⁶ Sr关系图中(图6)显示得较为

Table 1 The Rb-Sr isotopic data of 10 pyrites from the Longquanzhan gold deposit

Tuble I	1110 115 51 15515	pre data or ro	pyrnee nom a	ie Bongquaimie	ai gola acpobli
样品号	${ m Rb}(\mu { m g}/{ m g})$	$Sr(\mu g/g)$	$^{87}{ m Rb}/^{86}{ m Sr}$	$^{87}{ m Sr}/^{86}{ m Sr}$	误差(2σ)
N-1	17.810	10.190	5.1560	0.721248	0.000007
N-2	15.430	18.260	2.4910	0.717 374	0.000009
N-4	12.980	17.810	2.1520	0.717 136	0.000008
N-6	19.860	7.494	7.8120	0.724 637	0.000011
N-8	11.530	10.020	3.4030	0.718 853	0.000010
N-9	12.610	12.470	2.9840	0.718064	0.000009
N-10	13.480	14.960	2.6590	0.717 815	0.000012
N-20	6.019	27.170	0.6532	0.714 868	0.000008
N-21	5.346	31.390	0.5025	0.714793	0.000011
N-22	3.984	24.410	0.4817	0.714736	0.000009





Fig. 5 Rb-Sr isochron for pyrite samples from Longquanzhan gold deposit



图 6 龙泉站金矿床黄铁矿 1/Sr-⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和 1/Rb-⁸⁷Rr/⁸⁶Sr关系 Fig. 6 Relation of 1/Sr-⁸⁷Sr/⁸⁶Sr and 1/Rb-⁸⁷Rb/⁸⁶Sr of pyrites from the Longquanzhan gold deposit

明显,不同样品的 Rb、Sr 含量变化较大,但⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 和⁸⁷ Rr/⁸⁶ Sr 则相对稳定,说明在黄铁矿生长期间其 初始比值基本保持不变, Rb、Sr 含量的变化可能与 黄铁矿中存在的矿物包裹体有关(Li *et al.*, 2007). 因此可以认为黄铁矿与其中的矿物包裹体同时生长 时同位素可能达到了平衡,本文所获得的等时线年 龄应能代表黄铁矿形成年龄.

对于山东省金矿成矿时代而言(图 7,表 2),多 数学者认为存在一个主成矿期(图 7 中①),即130~ 110 Ma之间(涂光炽和赵振华,1983; Zhai et al., 2001; 陈衍景等,2004; Li et al., 2012).少数学者



图 7 山东省金矿成矿年龄概率密度图(n=49)

Fig. 7 Age probability diagram for gold deposits Shandong Province, eastern China (n=49)

①代表晚侏罗世(150 Ma 左右)金矿成矿作用;②代表早白垩世(106~130 Ma)金矿成矿爆发期;③代表早白垩世晚期一晚白垩世早期金成矿作用.数据引自骆万成和吴勤生,1987;李华芹等,1993; 吕古贤和孔庆存,1993;张振海等,1994;孙丰月等,1995;张德全等,1995;Yang and Zhou,2001;李厚民等,2002,2003;张连昌,2002;Li et al.,2003,2006;Zhang et al.,2003a,2003b;胡芳芳等,2004,2010;侯明兰等,2006;李红梅等,2010;蔡亚春等,2011;姜晓辉等,2011;丁正江等,2012;本文参考文献中成矿年龄的测试对象、测试方法等详见表2

认为区内存在2个或多个成矿期(邓军等,2000;杨 金中和李光明,2001;刘连登等,2002;王义文等, 2002; Mao et al., 2003; 杨立强等, 2006; 丁正江等, 2012).山东省金矿成矿时代跨度较大,最早可至侏 罗纪,如胶东留村石英脉型金矿单颗粒黄铁矿 Rb-Sr 年龄为 151.0±2.7 Ma,指示胶东地区存在晚侏 罗世规模较小的金成矿事件(图7中②)(姜晓辉等, 2011). 根据与侏罗纪岩浆活动对应的金成矿事件距 早白垩世金成矿大爆发期相差约 20 Ma 推测,山东 省是否可能存在约 100 Ma 开始的第 3 期与火山-次火山活动有关的金成矿事件(图7中③)? 近年 来,随着高精度成矿年代学资料不断积累(表 2)与 矿床勘探程度不断提高,不少学者认为除主成矿期 (120±10 Ma)外,山东省还存在另一期与燕山晚期 火山一次火山作用有关的金多金属矿化(杨金中和 李光明,2001; 刘连登等,2002; 王义文等,2002; 杨 立强等,2006; 丁正江等,2012),但主要依据矿床中 围岩及后期穿插的脉岩大致推断,如牟平宋家沟金 矿床、烟台金矿床、蓬莱后大雪金矿床、栖霞百里店 金矿床和山城金矿床以及招远十里铺含金银矿床、 莱西平度金矿1号脉、威海范家埠金矿(中型)、文登

333

表 2 山东省金矿成矿年龄统计

Table 2 Mineralization ages of gold deposits from Shandong Province

地区	金矿	测试对象	测试方法	成矿时代(Ma)	资料来源
	蓬家夼	绢云母	Ar-Ar	$120.9 \pm 0.4 \sim 119.1 \pm 0.2$	Li et al., 2006
	蓬家夼	石英	Ar-Ar	115.2 ± 1.0	
	蓬家夼	石英	Ar-Ar	117 ± 0.1	北大日 2002
	蓬家夼	石英	Ar-Ar	116 ± 0.4	旅连台,2002
	蓬家夼	矿石	Rb-Sr	128 ± 7	
	蓬家夼	石英、黑云母	Ar-Ar	$117.5 \pm 0.3 \sim 118.4 \pm 0.3$	Zhang et al., 2003a
	蓬家夼	绢云母	K-Ar	100.5 \pm 1.9	孙丰月等,1995
	乳山	蚀变岩	Rb-Sr	121.3 ± 0.5	
	乳山	蚀变岩	Rb-Sr	113.3 ± 4.4	北东海体 1004
	乳山	蚀变岩	Rb-Sr	101.7 \pm 4.8	派派 (母守, 1994
	乳山	蚀变岩	Rb-Sr	112.3 ± 3.3	
	乳山	热液锆石	SHRIMP U-Pb	117 ± 3	胡芳芳等,2004
	乳山	绢云母	Ar-Ar	109.3 \pm 0.3 \sim 107.7 \pm 0.5	Li et al., 2006
	东季	钾长石	Ar-Ar	116.3±0.8	李厚民等,2003
	东季	石英	Ar-Ar	114.4 ± 0.2	李厚民等,2003
	玲珑	黄铁矿	Rb-Sr	122~123	Yang and Zhou, 2001
	玲珑	绢云母	Rb-Sr	100.7 \pm 3.5	张振海等,1994
	玲珑	绢云母	Rb-Sr	111.3 ± 2.8	张振海等,1994
	玲珑	绢云母	Rb-Sr	126.5 ± 5.7	李华芹等,1993
	玲珑	绢云母	Rb-Sr	100.2 ± 3.7	骆万成和吴勤生,1987
	玲珑	绢云母	Rb-Sr	112 ± 2	骆万成和吴勤生,1987
	金城	长石	Ar-Ar	116.3 ± 13	李厚民等,2002
	金城	石英	Ar-Ar	114.4 ± 0.9	李厚民等,2002
胶东	大庄子	石英	Ar-Ar	115.6 ± 1	Zhang et al., 2003a
	发云夼	黄铁矿	Rb-Sr	128.2±7	Zhang et al., 2003a
	仓上	绢云母	Ar-Ar	121.3 ± 0.2	Zhang et al., 2003b
	下雨村	绢云母	K-Ar	124.6 \pm 2.5	孙丰月等,1995
	胡八庄	绢云母	Rb-Sr	126.5 ± 5.6	蔡亚春等,2011
	马家窑	黄铁矿	Rb-Sr	106.1±4.9	张振海等,1994
	马家窑	石英	Rb-Sr	137.6 ± 7.1	李华芹等,1993
	马家窑	绢云母	Rb-Sr	135.1 ± 5.2	张振海等,1994
	河西	黄铁矿	Rb-Sr	122.3 ± 3.1	侯明兰等,2006
	黑岚沟与大柳行	黄铁矿	Rb-Sr	117.8 ± 6.5	侯明兰等,2006
	焦家	绢云母/白云母	Ar-Ar	$120.5 \pm 0.6 \sim 119.2 \pm 0.2$	Li et al., 2003
	焦家	石英	Rb-Sr	134 ± 8	
	焦家	长石	K-Ar	100	学华斤寺,1993
	焦家	蚀变岩	Rb-Sr	115 ± 5	
	焦家	绢云母	Rb-Sr	105 ± 7	吕古贤和孔庆存,1993
	焦家	绢云母	K-Ar	106 ± 2	骆万成和吴勤生,1987
	新城	黄铁绢英岩全岩	Rb-Sr	116 ± 5	杨进辉等,2000
	新城	绢云母/白云母	Ar-Ar	120.7 \pm 0.2 \sim 120.2 \pm 0.3	Li et al., 2003
	望儿山	绢云母/白云母	Ar-Ar	$121.0\pm0.4{\sim}119.4{\pm}0.2$	Li et al., 2003
	邓格庄	绢云母	Rb-Sr	118 ± 9	张德全等,1995
	灵山沟	蚀变水白云母	Rb-Sr	115 ± 5	骆万成和吴勤生,1987
	土堆一沙旺	石英	Rb-Sr	119 ± 10	李红梅等,2010
	邢家山钼钨矿床	辉钼矿	Re-Os	158.70 ± 2.06	丁正江等,2012
	胶东留村	黄铁矿	Rb-Sr	151±2.7	姜晓辉等,2011
鲁西	沂南	黑云母	Rb-Sr	$133 \pm 6 \sim 128 \pm 2$	胡芳芳等,2010
沂沭断裂带	龙泉站	黄铁矿	Rb-Sr	96 ± 2	本文

汤村店子金矿(小型)、大时家金矿(小型)、尹格庄金 矿晚期叠加含金银矿体均为青山期的产物,推测成 矿年龄主体在 110~90 Ma 之间. 其中莱西张家金 矿含有大量胶黄铁矿的第 2 期金矿体切穿了全岩 Rb-Sr等时线年龄为 117.6±2.3 Ma的超浅成细晶 花岗岩脉、烟台(南张家)金矿脉切穿了 Rb-Sr等时 线年龄为 112.7±5 Ma 的次火山岩脉等,均说明成 矿时代略晚于早白垩世青山组火山岩.但关于该期 金矿床精确的成矿年代学数据至今报道较少.而龙 泉站金矿成矿时代的精确厘定,指示了沂沭断裂带 内成矿时代略晚于两侧金矿集中区金成矿爆发期, 但可能与两侧第3期与白垩纪火山一次火山活动有 关的小规模金矿成矿事件相对应.目前还缺乏高精 度成矿年代学研究.

龙泉站金矿主要产于中生代白垩系大盛群马朗 沟组地层与新太古代变质基底接触带部位以及下盘 变质岩系中,金矿脉切穿燕山期花岗斑岩脉,同时, 大盛群马朗沟组砂砾岩局部也相应发生蚀变及矿化 作用(孔令芝和刘其臣,2003). 区内大盛群为一套紫 色砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩夹安山岩和安山质凝灰 岩等陆源碎屑岩相组合,马站一苏村盆地内广泛出 露.从区域地层格架上看,在沂沭断裂带内的大盛群 内发育的火山岩夹层可以与青山群中八亩地组及石 前庄组对应(刘明渭等,2003). 而在研究区及其附 近,大盛群一般都是发育在青山群八亩地组之上,而 相应的青山群上部的层位(石前庄组、方戈庄组)多 不发育,同期火山岩层(多以中酸性火山岩为主)以 夹层形式产于大盛群各组中,同时在研究区内大盛 群马朗沟组地层中见数层流纹质角砾熔岩,因此可 将马朗沟组地层视为石前庄组的一套地层. 邱检生 等(2012)获得汤头火山盆地内钾质与钠质粗安岩的 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄,分别为 124±1 Ma、 106±4 Ma,其中钠质粗安岩位于八亩地组的顶部. 凌文黎等(2006)获得鲁东胶莱盆地内石前庄组火山 岩的底部与顶部的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄,分别为 105±4 Ma、98±1 Ma,因此可以说明汤头火山盆地 内大盛群的形成年龄应为 106±4 Ma 左右. 根据上 述分析,龙泉站蚀变岩型金矿的形成时代应略晚于 大盛群马朗沟组的沉积年龄,前已叙述龙泉站金矿 10件黄铁矿样品构筑的 Rb-Sr 等时线年龄为 96± 2 Ma(MSWD=1.2),为晚白垩世产物,并与地质情 况相吻合,这与相邻沂南金矿成矿时代(133±6~ 128±2 Ma)、成岩时代(133~126 Ma)(胡芳芳等, 2010; 王永, 2010) 相差约 30 Ma, 以上表明龙泉站 金矿与鲁西铜井等岩浆活动并没有直接的成因关 系,且与沂南金矿之间具有较大的时差,反映龙泉站 金矿可能属于另外一期的成矿事件.

样品的初始 $^{\rm 87}$ Sr / $^{\rm 86}$ Sr 比值为 0. 714 090 ±

0.000 010(图 5),与大陆地壳锶同位素⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 平 均值 0.719 0(孙省利,2001)相接近,具有富放射性 成因锶的特征,说明龙泉站金矿成矿物质主要来源 于陆壳.

5.2 成矿构造背景

关于郑庐断裂带多数学者认为起源于印支期华 北与扬子克拉通的碰撞造山过程中的陆内左旋转换 断层(Xu et al., 1987;朱光等,2005).该断裂在中 侏罗世至晚侏罗世初受古太平洋板块斜向俯冲作用 再次发生左行平移(朱光等,2008),随后在早白垩世 至古近纪期间出现了区域性的伸展运动(王勇生等, 2006),沿沂沭断裂带形成了一系列的伸展断陷盆地 (张岳桥和董树文,2008),并在伸展期沿断裂发生了 大规模的岩浆活动(牛漫兰等,2007).

龙泉站金矿位于我国华北克拉通东南缘、郯庐 大断裂带内沂沭断裂带中段,而郯庐断裂带作为我 国东部最大的巨型断裂系,在华北克拉通破坏中扮 演着重要的角色,充当了新生软流圈物质上涌及地 幔改造与置换作用的良好通道,且一系列地学断面 显示,该断裂带下的岩石圈比两侧薄 20~40 km(朱 光等,2002),郯庐断裂带从晚白垩世一早第三纪已 转变成巨型的伸展构造,断裂引张程度不断增强(朱 光等,2004). 谢成龙(2008) 进一步指出郯庐断裂带 是华北克拉通岩石圈减薄中的强减薄带,它为软流 圈地幔上涌并对原有地幔进行改造提供了良好通 道.结合目前已有的成岩年代学资料,认为郯庐断裂 带内各个部位岩浆活动持续时间较长,结束时间较 晚(127~96 Ma). 且随着时间由早至晚,断裂带内 岩浆源区具有逐渐变浅的演化趋势.鲁西及汞丹山 凸起太古代二长花岗岩与马战一苏村凹陷大盛群火 山碎屑岩中的磷灰石裂变径迹显示在早白垩世晚期 鲁东、鲁西经历过强烈伸展,沂沭断裂带主要以伸展 为主的左行张剪活动, 目晚白垩世该区仍处于强烈 伸展期(王先美等,2007). 自早白垩世晚期至晚白垩 世早期(106~96 Ma), 沂沭断裂带内火山岩开始由 富钾向富钠方向转变,代表着沂沭断裂带内晚白垩 世火山岩软流圈的成分逐渐增加(李友连等,2012; 邱检生等,2012),断裂带内及其附近的侵入岩源区 也逐渐以更浅的壳源为主(谢成龙,2008),前已叙述 了龙泉站金矿黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄为 96± 2 Ma,为晚白垩世早期产物,表明龙泉站金矿可能 为晚白垩世沂沭断裂带强烈拉张环境下的产物.早 白垩世晚期至晚白垩世早期沂沭断裂带的强烈伸 展,致使断裂带内及附近软流圈不断抬升,等温线也 不断升高,其进而诱发的强烈壳幔作用为带内金成 矿作用提供了大量的成矿流体与成矿物质. 龙泉站 金矿成矿时代的限定指示了山东地区存在晚白垩世 金成矿作用,主要为与青山群火山一侵入岩系相关 的浅成热液矿床,目前多个矿山已经发现存在多期 金成矿作用,且可独立成矿,沂沭断裂带在山东省延 伸约 260 km,带内广泛分布晚中生代火山岩与侵入 岩类,因此具有较大的找矿潜力.

6 结论

龙泉站金矿床黄铁矿 Rb-Sr 等时线年龄为96± 2 Ma(MSWD=1.2),该年龄与沂沭断裂带内及其 附近强烈引张背景下的岩浆活动时限(106~ 96 Ma)相吻合,表明成矿与早白垩世晚期至晚白垩 世早期的岩浆活动关系密切.黄铁矿 Rb-Sr 年龄的 精确厘定,指示了龙泉站金矿为晚白垩世沂沭断裂 带强烈拉张环境下的产物.同时结合近些年来山东 省成岩成矿的高精度年代学成果以及矿产勘查成果 资料,表明华北克拉通东南缘可能存在晚白垩世金 成矿作用.

致谢:论文得到了匿名审稿专家及编辑部老师 建设性的修改意见,本文样品的前期处理工作得到 了中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验 室陈海红老师的大力支持,成文过程中陆建培和姚 春亮老师、熊乐和王震同学给予了极大帮助,野外工 作中山东省地质调查院提供了便利的条件,特此一 并致谢.

References

- Cai, Y. C., Fan, H. R., Hu, F. F., et al., 2011. Ore-Forming Fluids, Stable Isotope and Mineralizing Age of the Hubazhuang Gold Deposit, Jiaodong Peninsula of Eastern China. Acta Petrologica Sinica, 27(5):1341-1351 (in Chinese with English abstract).
- Chen, G. Y., Shao, W., Sun, D. S., 1989. Genetic Mineralogy of Gold Deposits in Jiaodong Region with Emphasis on Gold Prospecting. Chongqing Science and Technology Publishing House, Chongqing (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. J., Pirajno, F., Lai, Y., et al., 2004. Metallogenic Time and Tectonic Setting of the Jiaodong Gold Province, Eastern China. Acta Petrologica Sinica, 20(4): 907-922 (in Chinese with English abstract).
- Deng, J., Yang, L. Q., Fang, Y., et al., 2000. Crust-Mantle

Interaction and Ore-Forming Effect of Gold Ore Deposits Concentrated Area in Jiaodong, Shandong, China. *Scientia Geologica Sinica*, 35(1):60-70 (in Chinese with English abstract).

- Ding, Z. J., Sun, F. Y., Liu, J. H., et al., 2012. Re-Os Dating of Molybdenites from the Xingjiashan Molybdenum-Tungsten Deposit in Jiaodong Peninsula, China and Its Geological Significance. Acta Petrologica Sinica, 28 (9):2721-2732 (in Chinese with English abstract).
- Hou, M. L., Jiang, S. Y., Jiang, Y. H., et al., 2006. S-Pb Isotope Geochemistry and Rb-Sr Geochronology of the Penglai Gold Field in the Eastern Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2525-2533 (in Chinese with English abstract).
- Hu, F. F., Fan, H. R., Yang, J. H., et al., 2004. Mineralizing Age of the Rushan Lode Gold Deposit in the Jiaodong Peninsula; SHRIMP U-Pb Dating on Hydrothermal Zircon. *Chinese Science Bulletin*, 49(15); 1629-1636 (in Chinese with English abstract).
- Hu, F. F., Wang, Y., Fan, H. R., et al., 2010. Geochronology and Ore-Forming Fluids in the Jinchang Skarn Gold-Copper Deposit, Yinan County, Western Shandong Province. Acta Petrologica Sinica, 26(5):1503-1511 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S. Y., Slack, J. F., Palmer, M. R., 2000. Sm-Nd Dating of the Giant Sullivan Pb-Zn-Ag Deposit, British Columbia. *Geology*, 28(8): 751 - 754. doi: 10. 1130/0091 -7613(2000)28<751: SDOTGS>2. 0. CO; 2
- Jiang, X. H., Fan, H. R., Hu, F. F., et al., 2011. Ore-Forming Fluids and Genesis of Liucun Gold Deposit in Northwestern Jiaodong Peninsula. *Mineral Deposits*, 30 (3):511-521 (in Chinese with English abstract).
- Kong, L. Z., Liu, Q. C., 2003. The Geological Characters and Exploration Prospects of Gold Deposit in Niujiaxiaohe, Yinan, Shandong. In: Li, W. X., ed., 2003 China Steel Annual Meeting Proceedings (2) of Chinese Society for Metals. Metallurgical Industry Press, Beijing, 232-235 (in Chinese).
- Li, H. K. ,2010. Study on Tectonic Evolution and Gold Mineralization in Yishu Fault Belt (Dissertation). Shandong University of Science and Technology, Qingdao (in Chinese with English abstract).
- Li, H. K., Geng, K., Li, Y. F., et al., 2011. Zircon SHRIMP U-Pb Age of Tongjing Gold Deposit in Yinan County, Shandong and Its Geological Significance. *Mineral Deposits*, 30(3): 497-503 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. K., Yang, Y. B., Tian, J. X., et al., 2004. Geological

Characteristic of Gold Deposits in the Middle Section of the Yi-Shu Fault Belt, *Geology and Prospecting*, 40 (4):27-31 (in Chinese with English abstract).

- Li, H. K., Yang, Y. B., Wang, Y. L., 2009. Isotopic Geochronological Characteristics and Implications of the Nanxiaoyao Gold Deposit in Yishui. *Geological Survey* and Research, 32(1):1-7 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. K., Yue, C. L., Yang, F. J., et al., 2007. Genesis of Longquanzhan Gold Deposit in Yishui County of Shandong Province. Acta Mineralogica Sinica, 27 (Supplement):25-27 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. M., Mao, J. W., Shen, Y. C., et al., 2003. Ar-Ar Ages of K-Feldspar and Quartz from Dongji Gold Deposit, Northwest Jiaodong, and Their Significance. *Mineral Deposits*, 22 (1): 72 - 77 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. M., Shen, Y. C., Mao, J. W., et al., 2002. Tectonics-Mineralization of Jiaojia-Type Gold Deposits—An Example from Jincheng Gold Deposit, Northwestern Jiaodong Peninsula. *Geotectonica et Metallogenia*, 26 (4):396-403 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. M., Wei, J. H., Wang, Q., et al., 2010. Isotopic Composition Features and Ore-Forming Mechanism of the Tudui-Shawang Gold Deposit in Shandong Province. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(6):791-802 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. Q., Liu, J. Q., Wei, L., 1993. The Isochronology of Inclusions of Hydrothermal Deposits and Its Geological Application. Geological Publishing House, Beijing, 83-90 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. W., Bi, S. J., Selby, D., et al., 2012. Giant Mesozoic Gold Provinces Related to the Destruction of the North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 349:26-37. doi:10.1016/j.epsl.2012.06.058
- Li, J. W., Paulo, V., Zhou, M. F., 2006. Geochronology of the Pengjiakuang and Rushan Gold Deposits, Eastern Jiaodong Gold Province, Northeastern China; Implications for Regional Mineralization and Geodynamic Setting. *Economic Geology*, 101(5): 1023-1038. doi: 10. 2113/gsecongeo. 101. 5. 1023
- Li, J. W., Vasconcelos, P. M., Zhang, J., et al., 2003. ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar Constraints on a Temporal Link between Gold Mineralization, Magmatism, and Continental Margin Transtension in the Jiaodong Gold Province, Eastern China. *The Journal of Geology*, 111(6):741-751. doi: 10.1086/378486
- Li, Q. L., Chen, F. K., Yang, J. H., et al., 2007. Single Grain

Pyrite Rb-Sr Dating of the Linglong Gold Deposit, Eastern China. *Ore Geology Review*, 34(3): 263-270. doi: 10. 1016/j. oregeorev. 2007. 10, 003

- Li, Y. L., Qiu, J. S., Liu, L., 2012. Geochronology and Geochemistry of Sodic Volcanic Rocks from Shenquan in Tancheng County, Shandong Province: Implications for Unraveling the Nature of Mantle Source and Petrogenesis. Acta Petrologica et Mineralogica, 31(6):783-798 (in Chinese with English abstract).
- Ling, W. L., Xie, X. J., Liu, X. M., et al., 2006. Zircon U-Pb Dating on the Mesozoic Volcanic Suite from the Qingshan Group Stratotype Section in Eastern Shandong Province and Its Tectonic Significance. Science in China (Series D), 36(5):401-411 (in Chinese).
- Liu, L. D., Chen, G. H., Zhang, H. H., et al., 2002. Two Geodynamic Settings for Mineralization in Jiaodong Gold Metallogenetic Region. *Mineral Deposits*, 21 (Supplement):36-39 (in Chinese).
- Liu, M. W., Zhang, Q. Y., Song, W. Q., 2003. Division of the Cretaceous Lithostratigraphic and Volcanic Sequences of Shandong. *Journal of Stratigraphy*, 27(3): 247 – 253 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 1998. Using Isoplot/Ex: Age of Chronological Toolkit for Microsoft Excel, Version 1. 00. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1:1-4.
- Luo, W. C., Wu, Q. S., 1987. Timing Metallogenesis of Gold Deposit in Jiaodong Area Using Alteration Minerals. *Chinese Science Bulletin*, 32(16):1245-1248 (in Chinese).
- Lü, G. X., Kong, Q. C., 1993. Geology in Linglong-Jiaojia Gold Deposits in Eastern Shandong. Science Press, Beijing, 25-53 (in Chinese).
- Lüders, V., Ziemann, M., 1999. Possibilities and Limits of Infrared Light Microthermometry Applied to Studies of Pyrite-Hosted Fluid Inclusions. *Chemical Geology*, 154 (1-4): 169-178. doi: 10. 1016/S0009-2541(98) 00130-2
- Mao, J. W., Wang, Y., Zhang, Z., 2003. Geodynamics Settings of Mesozoic Large-Scale Mineralization in North China and Adjacent Areas. Science in China (Series D),46(8):838-848. doi:10.1007/BF02879527
- Niu, M. L., Xie, C. L., Song, C. Z., et al., 2007. K-Ar Dating of Early Cretaceous Volcanic Rocks along the Tan-Lu Fault Zone and Its Tectonic Significance. *Chinese Journal of Geology*, 42(2):382-387 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J. S., Liu, L., Li, Y. L., 2012. Geochronology and Geochemistry of Potassic and Sodic Volcanic Rocks in

Tangtou Basin, Shandong Province: Implications for Lithospheric Thinning beneath the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1044 – 1056 (in Chinese with English abstract).

- Santosh, M., Zhao, D. P., Kusky, T. M., 2010. Mantle Dynamics of the Paleoproterozoic North China Craton: A Perspective Based on Seismic Tomography. *Journal of Geodynamics*, 49(1): 39-53. doi: 10.1016/j.jog. 2009. 09.043
- Shen, Q. H., Shen, K., Geng, Y. S., et al., 2000. Geological Evolution and Composite of Yishui Complex, Shandong. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Shen, Q. H., Song, B., Xu, H. F., et al., 2004. Emplacement and Metamorphism Ages of the Caiyu and Dashan Igneous Bodies, Yishui County, Shandong Province: Zircon SHRIMP Chronology. *Geological Review*, 50(3):275-284 (in Chinese with English abstract).
- Shen, Q. H., Xu, H. F., Shen, K., et al., 1997. Study on Chronology for Xueshan and Linjiaguanzhuang Bodies in Yishui, Shandong Province. *Scientia Geologica Sinica*, 32 (3): 291 – 298 (in Chinese with English abstract).
- Shen, Q. H., Zhang, Z. Q., Xu, H. F., 1994. Study on the Isochron Age in the Archean Granulite Terrains of Yishui, Shandong Province. Acta Geoscientia Sinica, 1 (1-2):17-19 (in Chinese with English abstract).
- Shen, Q. H., Zhao, Z. R., Song, B., et al., 2007. Geology, Petrochemistry and SHRIMP Zircon U-Pb Dating of the Mashan and Xueshan Granitoids in Yishui County, Shandong Province. *Geological Review*, 53 (2): 180-186 (in Chinese with English abstract).
- Su, S. G., Zhou, X. R., Gu, D. L., et al., 1999. Characteristics, Ages and Genesis of Charnockites in Yishui Area, Shandong Province. *Earth Science—Journal of China* University of Geosciences, 24(1): 57-62 (in Chinese with English abstract).
- Sun, F. Y., Shi, Z. L., Feng, B. Z., 1995. The Geology of Gold Deposits in Jiaodong and Petrogenesis and Metallogenesis of Mantle-Derived C-H-O Fluids. People's Publishing House of Jilin, Changchun (in Chinese).
- Sun, S. L., 2002. The Study on Metallogenic Series of Hydrocarbon Alkali-Fluids in Devonian in Xicheng Concentrated Mineralization Area, West Qinling, Gansu Province (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu, 43-44 (in Chinese with English summary).
- Tu,G. C., Zhao, Z. H., 1983. On the Diversity of Minerogenetic Processes of the Yanshanian Period. Geological

Review, 29(1): 57 - 65 (in Chinese with English abstract).

- Wang, S. J., Wan, Y. S., Song, Z. Y., et al., 2012. Stratigraphic Division and Formation Era of Taishan Group in Luxi Area—Evidence of Zircon SHRIMP U-Pb Dating. Shandong Land and Resource, 28(12):15-23 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. M., Zhong, D. L., Wang, X. S., et al., 2007. Low-Temperature Thermochronology Evidence for Extensional Movement of the Yi-Shu Fault Zone in Late Early Cretaceous. *Chinese Journal of Geology*, 42(4):625-638 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., 2010. Late Mesozoic Magmatism and Gold-Copper Mineralization in the Southwestern Part of Shandong Province (Dissertation). Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 32-67 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. S., Zhu, G., Chen, W., et al., 2005. Thermochronologic Information from the Tan-Lu Fault Zone and Its Relationship with the Exhumation of the Dabie Mountains. *Geochimica*, 34(13):193-214(in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. W., Zhu, F. S., Gong, R. T., 2002. Study on the Metallogenic Chronology of Gold Deposits in Jiaodong Gold Concentration Zone. *Gold Geology*, 8(4):48-55 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. X., Gu, L. X., Zhang, Z. Z., et al., 2007. Sr-Nd-Pb Isotope Geochemistry of Rhyolite of the Late Carboniferous Dashitou Group in Eastern Tianshan. Acta Petrologica Sinica, 23 (7): 1749 – 1755 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. X., Yang, J. D., Chen, J., et al., 2007. The Sr and Nd Isotopic Variations of the Chinese Loess Plateau during the Past 7 Ma; Implications for the East Asian Winter Monsoon and Source Areas of Loess. *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, 249 (3-4):351-361. doi:10.1016/j. palaeo. 2007. 02.010
- Xie, C. L., 2008. The Late Mesozoic Magmatism along the South Segment of the Tan-Lu Fault Zone and Its Implication for Lithospheric Thinning (Dissertation). Hefei University of Technology, Hefei (in Chinese with English abstract).
- Xu,G. Z., Zhou, R., Wang, Y. F., et al., 2002. The Intrinsic Factors Causing the Significant Differences in Mesozoic Mineralization between Jiaodong and Luxi Areas. *Geo-science*, 16 (1): 9 – 18 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. W., Zhu, G., Tong, W. X., et al., 1987. Formation and

Evolution of the Tancheng-Lujiang Wrench Fault System: A Major Shear System to the Northern of the Pacific Ocean. *Tectonophysics*, 134(4):273-310. doi:10. 1016/0040-1951(87)90342-8

- Yang, J. H., Zhou, X. H., 2001. Rb-Sr, Sm-Nd and Pb Isotope Systematics of Pyrite: Implications for the Age and Genesis of Lode Gold Deposits. *Geology*, 29(8):711-714. doi: 10. 1130/0091-7613(2001)029<0711; RSS-NAP>2. 0. CO; 2
- Yang, J. H., Zhou, X. H., Chen, L. H., 2000. Dating of Gold Mineralization for Super-Large Altered Tectonite-Type Gold Deposits in Northwestern Jiaodong Peninsula and Its Implications for Gold Metallogeny. Acta Petrologica Sinica, 16 (3): 454 - 458 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. Z., Li, G. M., 2001. Comparison of Different Mineralizations in Mesozoic and Its Significance in Jiaodong Region, Shandong Province. *Geology and Prospecting*, 37(1):33-37 (in Chinese with English abstract).
- Yang, L. Q., Deng, J., Ge, L. S., et al., 2006. Reviews of the Metallogenic Epoch and Genesis Studies in the Jiaodong Gold Deposits. *Progress in Natural Science*, 16 (7): 797-802 (in Chinese).
- Zhai, M. G., Yang, J. H., Liu, W. J., 2001. Large Cluster of Gold Deposits and Large-Scale Metallogenesis in Jiaodong Peninsula, Eastern China. Science in China (Series D), 44(8):758-768. doi:10.1007/BF02907205
- Zhang, C. Q., Li, X. H., Yu, J. J., et al., 2008. Rb-Sr Dating of Single Sphalerites from the Daliangzi Pb-Zn Deposit, Sichuan, and Its Geological Significances. *Geological Review*, 54 (4): 532 - 538 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D. Q., Xu, H. L., Sun, G. Y., 1995. Emplacement Ages of the Denggezhuang Gold Deposit and the Kunyu shan Granite and Their Geological Implications. *Geological Review*,41(5):415-425 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. C. , 2002. Geochemistry and Dynamics of Metallogenic System of Three Types of Gold Deposits in Jiaodong. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. C., Shen, Y. C., Liu, T. B., et al., 2003a. ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar and Rb-Sr Isochron Dating of the Gold Deposits on Northern Margin of the Jiaolai Basin, Shandong, China. *Science in China* (*Series D*), 46(7):708-718. doi:10. 1360/03yd9062
- Zhang, X. O., Cawood, P. A., Wihle, S. A., et al., 2003b. Ge-

ology and Timing of Mineralization at the Cangshang Gold Deposit, North-Western Jiaodong Peninsula, China. *Mineralium Deposita*, 38(2):141-153. doi:10. 1007/s00126-002-0290-7

- Zhang, Y. Q., Dong, S. W., 2008. Mesozoic Tectonic Evolution History of the Tan-Lu Fault Zone, China: Advances and New Understanding. *Geological Bulletin of China*, 27(9):1371-1390 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. H., Zhang, J. X., Ye, S. Z., 1994. Isotope Ages of Gold Deposits in Jiaodong. Seismological Press, Beijing, 56 (in Chinese).
- Zhao, Z. R., Song, H. X., Shen, Q. H., et al., 2008. Geological and Geochemical Characteristics and SHRIMP U-Pb Zircon Dating of the Yinglingshan Granite and Its Xenoliths in Yishui County, Shandong, China. Geological Bulletin of China, 27(9):1551-1558 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. R., Song, H. X., Shen, Q. H., et al., 2009. The Petro-Geochemical Characters and SHRIMP U-Pb Zircon Ages of Meta-Mafic Rocks from the Yishui Complex, in Yishui County, Shandong Province. *Geological Review*, 55 (2): 286 – 299 (in Chinese with English abstract).
- Zhu,G., Hu,Z. Q., Chen,Y., et al., 2008. Evolution of Early Cretaceous Extensional Basins in the Eastern North China Craton and Its Implication for the Craton Destruction. *Geological Bulletin of China*, 27 (10): 1594-1604 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G., Song, C. Z., Niu, M. L., et al., 2002. Lithospheric Textures of the Tan-Lu Fault Zone and Their Genetic Analysis. *Geological Journal of China Universities*, 8 (3):248-256 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G., Wang, D. X., Liu, G. S., et al., 2004. Evolution of the Tan-Lu Fault Zone and Its Responses to Plate Movements in West Pacific Basin. *Chinese Journal of Geology*, 39 (1): 36 - 49 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G., Xie, C. L., Wang, Y. S., et al., 2005. Characteristics of the Tan-Lu High-Pressure Strike-Slip Ductile Shear Zone and Its ⁴⁰ Ar-³⁹ Ar Dating. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (6): 1687 – 1702 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡亚春,范宏瑞,胡芳芳,等,2011. 胶东胡八庄金矿成矿流 体、稳定同位素及成矿时代研究. 岩石学报,27(5): 1341-1351.
- 陈光远,邵伟,孙岱生,1989.胶东金矿成因矿物学与找矿.重

庆:重庆科技出版社.

- 陈衍景, Pirajno, F., 赖勇, 等, 2004. 胶东矿集区大规模成矿 时间和构造环境. 岩石学报, 20(4): 907-922.
- 邓军,杨立强,方云,等,2000.胶东地区壳幔相互作用与金成 矿效应.地质科学,35(1):60-70.
- 丁正江,孙丰月,刘建辉,等,2012.胶东邢家山钼钨矿床辉钼 矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义. 岩石学报,28(9): 2721-2732.
- 侯明兰,蒋少涌,姜耀辉,等,2006. 胶东蓬莱金成矿区的 S-Pb 同位素地球化学和 Rb-Sr 同位素年代学研究. 岩石 学报,22(10): 2525-2533.
- 胡芳芳,范宏瑞,杨进辉,等,2004. 胶东乳山含金石英脉型金 矿的成矿年龄:热液锆石 SHRIMP 法 U-Pb 测定. 科学 通报,49(12): 1191-1198.
- 胡芳芳,王永,范宏瑞,等,2010.鲁西沂南金场夕卡岩型金铜 矿床矿化时代与成矿流体研究.岩石学报,26(5): 1503-1511.
- 姜晓辉,范宏瑞,胡芳芳,等,2011.胶西北留村金矿成矿流体 特征与矿床成因.矿床地质,30(3):511-521.
- 孔令芝,刘其臣,2003.山东沂南牛家小河金矿矿床特征及找 矿前景.见:李文秀编,中国金属学会 2003 中国钢铁年 会论文(2).北京:冶金工业出版社,232-235.
- 李洪奎,2010. 沂沭断裂带构造演化与金矿成矿作用研究(博 士学位论文). 青岛:山东科技大学.
- 李洪奎, 耿科, 李逸凡, 等, 2011. 沂南县铜井金矿床锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. 矿床地质, 30(3): 497-503.
- 李洪奎,杨永波,田京祥,等,2004.山东沂沐断裂带中段金矿 地质特征.地质与勘探,40(4):27-31.
- 李洪奎,杨永波,王岳林,2009. 沂水南小尧金矿同位素年代 学特征及其地质意义. 地质调查与研究,32(1):1-7.
- 李洪奎,岳成利,杨锋杰,等,2007.山东沂水县龙泉站金矿成 因初探.矿物学报,27(增刊):25-27.
- 李厚民,毛景文,沈远超,等,2003. 胶西北东季金矿床钾长石 和石英的 Ar-Ar 年龄及其意义. 矿床地质,22: 72-77.
- 李厚民,沈远超,毛景文,等,2002. 焦家式金矿构造一流体成 矿作用特征——以胶西北金城金矿床为例. 大地构造 与成矿学,26(4): 396-403.
- 李红梅,魏俊浩,王启,等,2010.山东土堆一沙旺金矿床同位 素组成特征及矿床成因讨论.地球学报,31(6): 791-802.
- 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.北京:地质出版社,83-90.
- 李友连,邱检生,刘亮,2012.山东郯城神泉钠质火山岩的年 代学与地球化学——对源区地幔性状与岩石成因的启 示.岩石矿物学杂志,31(6):783-798.
- 凌文黎,谢先军,柳小明,等,2006.鲁东中生代标准剖面青山

群火山岩锆石 U-Pb 年龄及其构造意义.中国科学(D 辑),36(5):401-411.

刘连登,陈国华,张辉煌,等,2002.世界级胶东金矿集中区两 类成矿地球动力学环境.矿床地质,21(增刊):36-39.

刘明渭,张庆玉,宋万千,2003. 山东省白垩纪岩石地层序列 与火山岩系地层划分. 地层学杂志,27(3): 247-253.

- 骆万成,吴勤生,1987.应用蚀变矿物测定胶东金矿的成矿年 龄.科学通报,32(16):1245-1248.
- 吕古贤,孔庆存,1993.胶东玲珑一焦家式金矿地质.北京:科 学出版社,25-53.
- 牛漫兰,谢成龙,宋传中,等,2007. 郯庐断裂带早白垩世火山 岩的 K-Ar 年龄及其构造意义. 地质科学,42(2): 382-387.
- 邱检生,刘亮,李友连,2012.山东汤头盆地钾质及钠质火山 岩的年代学与地球化学:对华北克拉通岩石圈减薄的 启示.岩石学报,28(4):1044-1056.
- 沈其韩,沈昆,耿元生,等,2000.山东沂水杂岩的组成与地质 演化.北京:地质出版社.
- 沈其韩,宋彪,徐惠芬,等,2004.山东沂水太古代蔡峪和大山 岩体 SHRIMP 锆石年代学.地质论评,50(3): 275-284.
- 沈其韩,徐惠芬,沈昆,等,1997.山东沂水雪山岩体和林家官 庄岩体的同位素年代学.地质科学,32(3):291-298.
- 沈其韩,张宗清,徐惠芬,1994. 山东沂水太古宙麻粒岩区年 代学研究成果简介. 地球学报,1(1-2): 17-19.
- 沈其韩,赵子然,宋彪,等,2007.山东沂水新太古代马山和雪 山岩体的地质、岩石化学特征和 SHRIMP 锆石年代研 究.地质论评,53(2):180-186.
- 苏尚国,周询若,顾德林,等,1999.山东沂水紫苏花岗岩特 征、形成时代及成因探讨.地球科学——中国地质大学 学报,24(1):57-62.
- 孙丰月,石准立,冯本智,1995. 胶东金矿地质及地幔 C-H-O 流体分异成岩成矿. 长春:吉林人民出版社.
- 孙省利,2002. 西秦岭泥盆系西成矿化集中区烃碱流体成矿 系列研究(博士学位论文). 成都:成都理工大学, 43-44.
- 涂光炽,赵振华,1983. 燕山期成矿作用的多样性. 地质论评, 29(1):57-65.
- 王世进,万渝生,宋志勇,等,2012. 鲁西泰山岩群地层划分及 形成时代——锆石 SHRIMP U-Pb 测年的证据. 山东 国土资源,28(12): 15-23.
- 王先美,钟大赉,王雪松,等,2007. 沂沭断裂带早白垩世晚期 伸展的低温年代学证据. 地质科学,42(4):625-638.
- 王永,2010.鲁西南地区晚中生代岩浆活动与金铜矿成矿作 用(博士学位论文).北京:中国科学院地质与地球物理 研究所,32-67.
- 王勇生,朱光,陈文,等,2005. 郯庐断裂带热年代学信息及其 与大别造山带折返的关系.地球化学,34(3):

193-214.

- 王义文,朱奉三,宫润潭,2002. 胶东金矿集中区金矿成矿年 代学研究. 黄金地质,8(4):48-55.
- 王银喜,顾连兴,张遵忠,等,2007. 东天山晚石炭世大石头群 流纹岩 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学研究. 岩石学报,23 (7): 1749-1755.
- 谢成龙,2008. 郑庐断裂带南段晚中生代岩浆活动及其对岩 石圈减薄的指示(博士学位论文). 合肥:合肥工业大 学.
- 徐贵忠,周瑞,王艺芬,等,2002. 胶东和鲁西地区中生代成矿 作用重大差异性的内在因素.现代地质,16(1):9-18.
- 杨进辉,周新华,陈立辉,2000. 胶东地区破碎带蚀变岩型金 矿时代的测定及其地质意义. 岩石学报,16(3): 454-458.
- 杨金中,李光明,2001. 胶东中生代两期金矿化作用的对比研 究及其意义. 地质与勘探,37(1): 33-37.
- 杨立强,邓军,葛良胜,等,2006.胶东金矿成矿时代和矿床成 因研究评述.自然科学进展,16(7):797-802.
- 张长青,李向辉,余金杰,等,2008.四川大梁子铅锌矿床单颗 粒闪锌矿铷-锶测年及地质意义.地质论评,54(4): 532-538.
- 张德全,徐洪林,孙桂英,1995.山东邓格庄与昆嵛山花岗岩 的定位时代及其地质意义.地质论评,41(5):

415-425.

- 张连昌,2002.胶东地区三类金矿成矿系统地质地球化学及 动力学(博士后出站报告).北京:中国科学院地质与地 球物理研究所.
- 张岳桥,董树文,2008. 郑庐断裂带中生代构造演化史:进展 与新认识. 地质通报,27(9): 1371-1390.
- 张振海,张景鑫,叶素芝,1994.胶东金矿同位素年龄的厘定. 北京:地震出版社,56.
- 赵子然,宋会侠,沈其韩,等,2008.山东沂水英灵山花岗岩及 其捕掳体的地质、岩石地球化学特征和锆石 SHRIMP U-Pb 定年.地质通报,27(9):1551-1558.
- 赵子然,宋会侠,沈其韩,等,2009.山东沂水杂岩中变基性岩的岩石地球化学特征及锆石 SHRIMP U-Pb 定年.地 质论评,55(2):286-299.
- 朱光,胡召齐,陈印,等,2008. 华北克拉通东部早白垩世伸展 盆地的发育过程及其对克拉通破坏的指示. 地质通报, 27(10): 1594-1604.
- 朱光,宋传中,牛漫兰,等,2002. 郯庐断裂带的岩石圈结构及 其成因分析. 高校地质学报,8(3): 248-256.
- 朱光,王道轩,刘国生,等,2004. 郯庐断裂带的演化及其对西 太平洋板块运动的响应. 地质科学,39(1): 36-49.
- 朱光,谢成龙,王勇生,等,2005. 郯庐高压走滑韧性剪切带特 征及其⁴⁰ Ar⁻³⁹ Ar 定年. 岩石学报,21(6): 1687-1702.