

江苏仑山金矿床流体包裹体、稳定同位素 和成矿年代学研究*

陆邦成^{1,6}, 余金杰^{2**}, 陈春生³, 王铁柱^{2,4}, 车林睿⁵, 陆振裕³, 尹灵强³

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3 江苏省地质矿产局第三地质大队, 江苏 镇江 212001; 4 北京市丰台区人民政府宛平城地区办事处, 北京 100072; 5 中矿资源勘探股份有限公司, 北京 100089; 6 广西壮族自治区岑溪市工业和信息化局, 广西 岑溪 543200)

摘要 仑山金矿床位于宁镇矿集区东端。成矿期分为沉积成矿期和热液成矿期, 后者可进一步划分为热液Ⅰ阶段和热液Ⅱ阶段。流体包裹体研究表明, 热液Ⅰ阶段石英中的气液两相流体包裹体均一温度多集中在 330~366℃之间, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 变化于 4.96%~6.74%之间, 热液Ⅰ阶段方解石中气液两相流体包裹体均一温度多集中在 150~240℃之间, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 变化于 0.71%~9.80%之间, 成矿流体为中高温低盐度流体; 热液Ⅱ阶段石英、方解石和萤石的流体包裹体均一温度变化于 124~260℃, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 变化于 1%~8%之间, 成矿流体为中温低盐度流体。氢、氧同位素研究表明, 热液Ⅰ阶段成矿流体为岩浆流体, 热液Ⅱ阶段成矿流体以大气降水占主导, 但仍有少量岩浆流体。硫同位素研究表明, 仑山金矿床沉积成矿期硫除来源于三叠系青龙群膏盐层外, 有机质也参与了沉积成矿期中金矿的形成。热液Ⅰ阶段硫来源于沉积成岩阶段黄铁矿的活化迁移和富集, 岩浆硫也提供了成矿物质。萤石 Sm-Nd 测年分析表明, 仑山金矿床热液Ⅱ阶段成矿年龄为 $(93.7 \pm 3.1) \text{ Ma}$, 推断主成矿阶段形成于晚白垩世。仑山金矿床的形成代表着长江中下游成矿带最晚期的成矿作用。

关键词 地球化学; 流体包裹体; 稳定同位素; Sm-Nd 定年; 矿床成因; 仑山金矿床

中图分类号: P618.51

文献标志: A

Study of fluid inclusions, stable isotopes and geochronology of Lunshan gold deposit, Jiangsu Province

LU BangCheng^{1,6}, YU JinJie², CHEN ChunSheng³, WANG TieZhu^{2,4}, CHE LinRui⁵,
LU ZhenYu³ and YIN LingQiang³

(1 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 No. 3 Geological Party, Jiangsu Geology & Mineral Resources Bureau, Zhenjiang 212001, Jiangsu, China; 4 Wanping Sub-regional Office of Beijing Fengtai District Government 100072, China; 5 Sinomine Resource Exploration Co., Ltd., Beijing 100089, China; 6 Guangxi Cenxi Bureau of Industry and Information Technology, Cenxi 543200, Guangxi, China)

Abstract

The Lunshan gold deposit is located in the east of the Ningzhen ore concentration area. Mineralization stage

* 本文得到“江苏省地质矿产局科研项目(编号: 2014-KY-5)”和“国家自然科学基金(编号: 41372091)”联合资助

第一作者简介 陆邦成, 男, 1990年生, 硕士研究生, 地质工程专业。Email: lunislube@sina.com

** 通讯作者 余金杰, 男, 1966年生, 研究员, 博士生导师, 从事金属矿床成矿作用研究。Email: yjjchina@sina.com

收稿日期 2015-12-05; 改回日期 2016-09-23。张绮玲编辑。

can be divided into sedimentary and hydrothermal epochs. The latter is further divided into hydrothermal I and hydrothermal II stages. The analyses of fluid inclusions indicated that the homogenization temperatures of inclusions in quartz of hydrothermal I stage mostly vary from 330°C to 366°C with the salinities $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ varying from 4.96% to 6.74%. The homogenization temperatures of inclusions in calcite of hydrothermal I stage vary from 150°C to 240°C with the salinities $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ between 0.71% to 9.8%. The ore-forming fluid of hydrothermal I stage was high-medium temperature and low salinity fluid. The homogenization temperatures of two phases (gas + liquid) fluid inclusions in quartz, calcite and fluorite of hydrothermal II stage vary from 124°C to 260°C with salinities $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ mostly between 1% and 8%. Hydrogen and oxygen isotopic studies suggested that the ore-forming fluid of hydrothermal I stage was magmatic fluid, and the hydrothermal II stage fluid was meteoric water with minor magmatic fluid. The sulfur isotope analysis using pyrites of sedimentary epoch indicated that sulfur came from the evaporate bed of the Triassic Qinglong Group with the organic matters involved in the formation of sedimentary pyrites. The sulfur of hydrothermal I stage was from activation, migration and enrichment of sedimentary pyrites. Magmatic sulfur also supplied ore-forming materials of hydrothermal I stage. The Sm-Nd isochron age of fluorite of hydrothermal II stage is (93.7 ± 3.1) Ma, representing the youngest age of the Lunshan gold deposit. The authors infer that the main ore-forming epoch/stage occurred during the Late Cretaceous. The formation of the Lunshan gold deposit represented the final mineralization of the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt.

Key words: geochemistry, fluid inclusions, stable isotopes, Sm-Nd dating, genesis of deposit, Lunshan gold deposit

宁镇地区发育着丰富的铁、铜、铅、锌、金等矿产资源,其中以栖霞山铅锌矿床和安基山铜矿床为代表(常印佛等,1991;翟裕生等,1992)。前人对宁镇地区的侵入岩做过大量的岩石学和地球化学研究工作,并认为宁镇地区的侵入岩与该区的成矿作用密切相关(宁仁祖等,1989;夏嘉生,2000;许继峰等,2001;Wang et al., 2014)。曾键年等(2013)、王小龙等(2014)和 Wang 等(2014)测得宁镇地区与成矿有关的侵入岩锆石 U-Pb 年龄介于 100~109 Ma 之间,代表着长江中下游成矿带最晚一期的成岩成矿作用。仑山金矿床是宁镇矿集区新发现的金矿床,金品位较低,规模属小型,对该矿床的矿床地质研究较为薄弱,缺乏流体包裹体、稳定同位素和成矿年代学资料,致使矿床成因不清楚,制约了对该矿床成矿规律和控矿因素的深入研究。本文对仑山金矿床的地质特征进行了详细介绍,对矿床热液 I 阶段和 II 阶段石英、方解石和萤石进行了流体包裹体研究,对沉积成矿期和热液 I 阶段黄铁矿进行了硫同位素研究,对热液 I 阶段和 II 阶段石英、方解石进行了氢、氧同位素研究,开展了热液 II 阶段萤石年代学研究,探讨了矿床的成矿流体特征、成矿物质来源和成因机制,为今后的矿床勘查提供了资料,同时也为区域成矿规律研究和深部、边部找矿提供了科学数据。

1 区域地质背景

宁镇地区位于长江中下游成矿带最东端,该成矿带 NW 向与郯庐深大断裂、华北克拉通以及秦岭-大别造山带相毗邻,SE 向边界为常州-阳新断裂(图 1a)。宁镇地区基底为中元古代变质岩,原岩主要为中基性火山岩,形成于大陆边缘火山岛弧环境(张永康等,1996)。基底之上叠加了 2 套盖层,一套为震旦纪—早三叠世的地层,岩性为浅海相、海陆交互相沉积的碳酸盐岩和碎屑岩系;另一套为中三叠世—白垩纪地层,岩性由巨厚的陆源红色碎屑岩系和陆相火山侵入岩系构成(王小龙等,2014)。

宁镇地区发育一系列近 EW 向褶皱,由北向南依次为龙潭-仓头复背斜(I)、范家塘复向斜(II)、宝华山-巢凤山-石头岗复背斜(III)、桦墅-亭子复向斜(IV)和汤山-仑山复背斜(V),仑山金矿床处于汤山-仑山复背斜东段(图 1b)。区内断裂以 NE 向、NW 向以及近 EW 向为主,其中近 EW 向断裂发育最晚,切穿 NE 向、NW 向断裂。区内岩浆岩主要为燕山期高 Sr/Y 值花岗质岩石,与区内铜、铅、锌等多金属矿床具密切成因关系,其锆石 U-Pb 年龄介于 100~109 Ma 之间(曾键年等,2013;王小龙等,2014;Wang

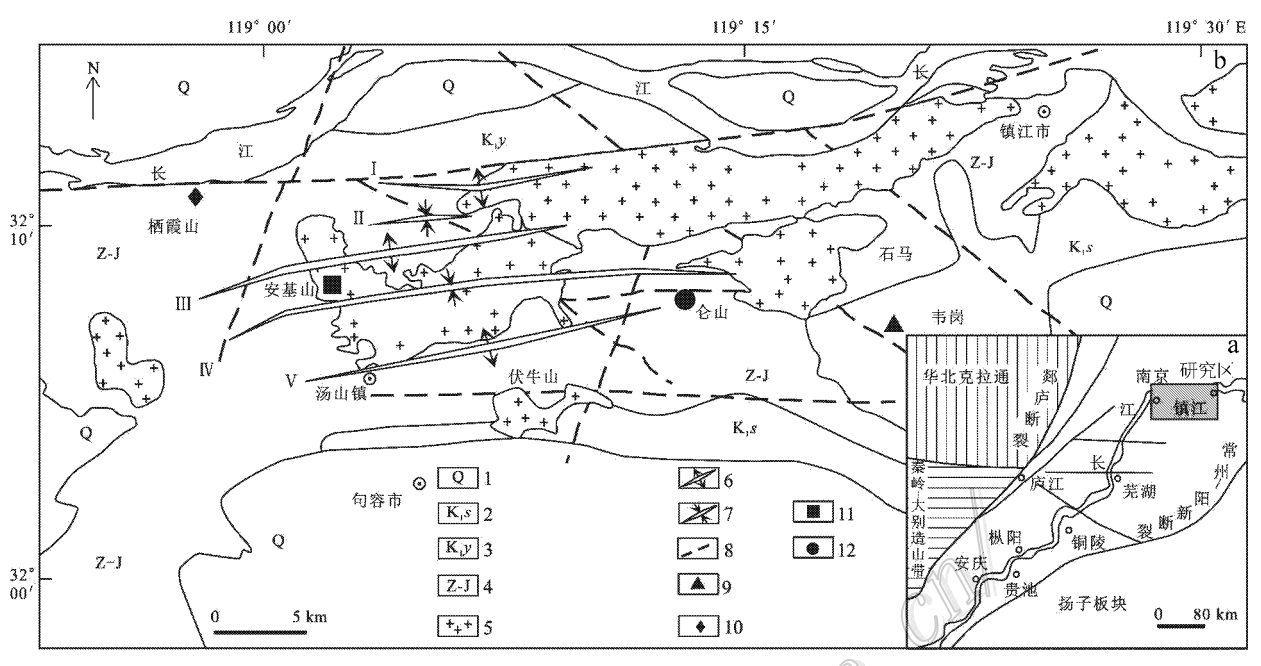


图 1 宁镇地区区域地质简图(据王小龙等,2014 修改)

1—第四系残坡积物；2—白垩系上党组安山岩、安山质凝灰岩和火山角砾岩；3—白垩系杨冲组泥质粉砂岩和碳质泥岩；4—震旦系至侏罗系碎屑岩、碳酸盐岩；5—燕山期花岗质岩石；6—复背斜；7—复向斜；8—断层；9—铁矿床；10—铅锌银矿床；11—铜矿床；12—金矿床

Fig. 1 Simplified geological regional map of the Ningzhen area (modified after Wang et al. , 2014)

1—Quaternary eluvium and deluvium；2—Andesite, andesitic tuff and volcanic breccia of the Cretaceous Shangdang Formation；3—Argillaceous siltstone and carbonaceous mudstone of the Cretaceous Yangchong Formation；4—Sinian to Jurassic clastic rock and carbonatite；5—Yanshanian granitic rocks；6—Anticlinorium；7—Synclinorium；8—Fault；9—Iron deposit；10—Lead-zinc-silver deposit；11—Copper deposit；12—Gold deposit

et al. , 2014)。截止目前,宁镇地区发现不同规模的矿床(点)40 余处,其中铜钼金矿床、矿(化)点 17 处；铅锌及以铅锌为主要多金属矿(化)点 4 处；铁矿床、矿(化)点 19 处；小型金矿 2 处(郑会俊,2014),这些表明宁镇矿集区具有良好的找矿前景。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质

仑山金矿床位于镇江市西南约 24 km 处。矿区出露震旦系灯影组(Z_2dn)、寒武系观音台组(ϵ_{3g})、奥陶系仑山组(O_1l)和红花园组(O_1h)、志留系高家边组(S_1g)和坟头组(S_2f)、泥盆系五通组(D_3w)、石炭系和州组(C_1h)、二叠系孤峰组(P_1g)、三叠系青龙组(T_1q)和薛家村组(T_2x)、侏罗系象山群($J_{1-2}xn$)、白垩系杨冲组(K_{1y})和上党组(K_{1s})以及第四系(Q)(图 2)。震旦系灯影组至侏罗系象山群岩性为碎屑岩-碳酸盐岩,白垩系杨冲组岩性为泥质粉砂

岩、碳质泥岩,上党组岩性为安山岩、石英安山质凝灰岩、火山角砾岩,第四系由残坡积碎石、黏土组成。其中,白垩系杨冲组泥质粉砂岩、碳质泥岩为仑山金矿床主要的容矿围岩。

矿区褶皱构造为仑山背斜,位于区域性汤山-仑山复背斜最东端,属于汤山-仑山复背斜组成部分,仑山背斜呈 NE 向展布,背斜核部为震旦系灯影组和寒武系观音台组,背斜两翼由奥陶系至白垩系组成,仑山金矿床位于背斜轴部西南转折端(图 2)。矿区断裂构造包括 NE 向、NW 向和近 NS 向断裂。NW 向断裂切穿仑山背斜核部和两翼地层。NW 向 F2、F3、F4 断裂(断裂破碎带和硅化带)为主要控矿构造。NS 向断裂为左行平移断裂,切穿 NE 向和 NW 向断裂,如 NS 向断裂(F1)切割 NE 向和 NW 向断裂(图 2)。

矿区岩浆岩主要出现在仑山背斜的中部和北部,主要为燕山期中酸性侵入岩,岩性为石英闪长玢岩、闪长玢岩等。另外,白垩系上党组岩性主要由安

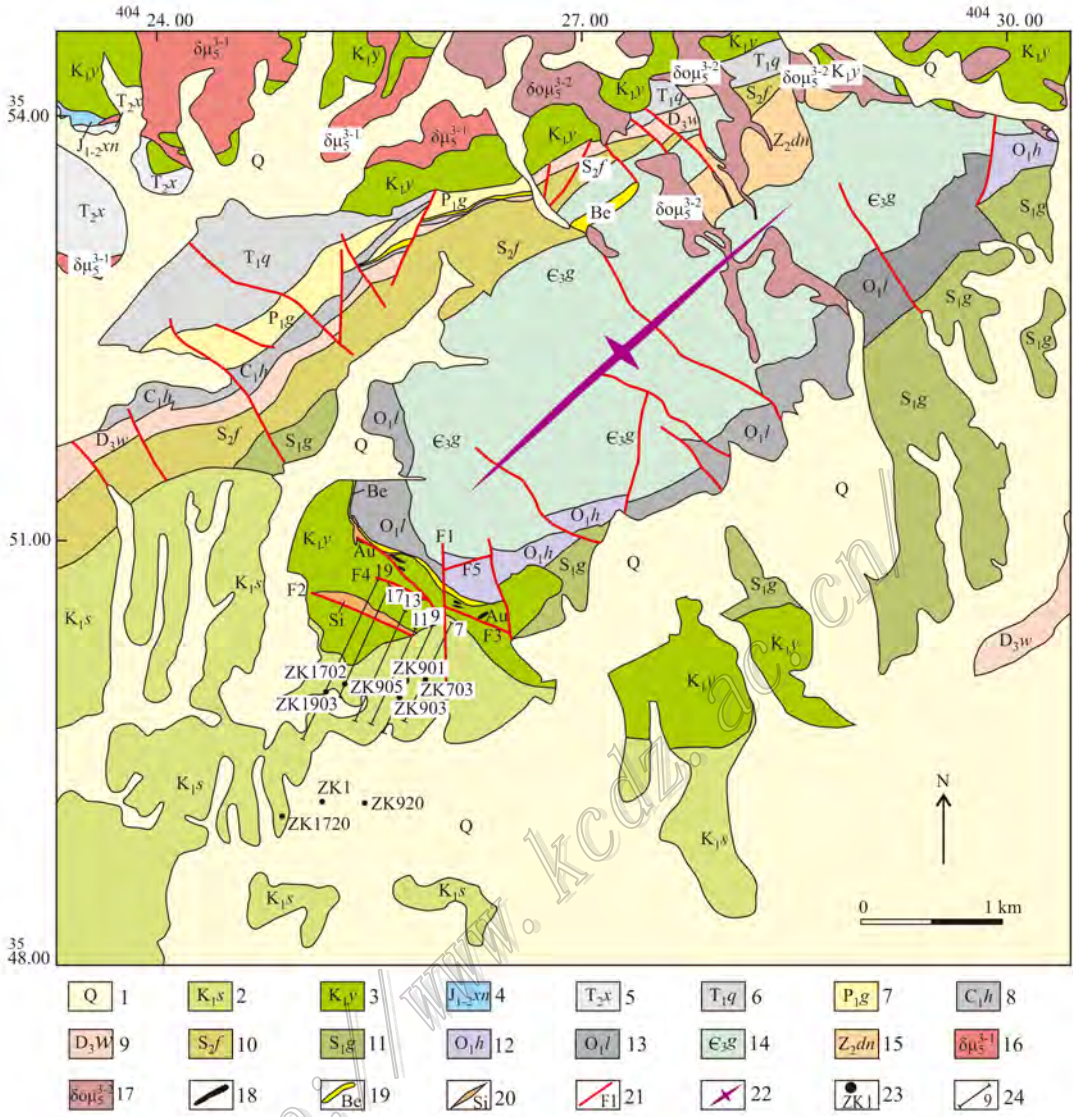


图 2 仑山金矿床矿区地质图(据郑会俊,2014 修改)

1—第四系残坡积物; 2—上党组安山岩、安山质凝灰岩和火山角砾岩; 3—杨冲组泥质粉砂岩和碳质泥岩; 4—象山群砂岩; 5—薛家村组灰岩; 6—青龙组灰岩; 7—孤峰组硅质页岩; 8—和州组泥质灰岩; 9—五通组石英砂岩; 10—坟头组砂岩; 11—高家边组灰岩夹少量粉砂岩、岩屑石英砂岩; 12—红花园组灰岩; 13—仑山组白云质灰岩; 14—观音台组白云岩; 15—灯影组白云岩; 16—闪长玢岩; 17—石英闪长玢岩; 18—金矿体; 19—破碎带; 20—硅化带; 21—断层及其编号; 22—仑山背斜; 23—钻孔及其编号; 24—勘探线及其编号

Fig. 2 Geological map of the Lunshan gold deposit (modified after Zheng, 2014)

1—Quaternary eluvium and deluvium; 2—Andesite, andesitic tuff and volcanic breccia of the Shangdang Formation; 3—Argillaceous siltstone and carbonaceous mudstone of the Yangchong Formation; 4—Sandstone of the Xiangshan Group; 5—Limestone of the Xuejiacun Formation; 6—Limestone of the Qinglong Formation; 7—Siliceous shale of the Gufeng Formation; 8—Argillaceous limestone of the Hezhou Formation; 9—Quartz sandstone of the Wutong Formation; 10—Sandstone of the Wentou Formation; 11—Limestone intercalated with minor siltstone and lithic quartz sandstone in the Gaojiabian Formation; 12—Limestone of the Honghuayuan Formation; 13—Dolomitic limestone of the Lunshan Formation; 14—Dolomite of the Guanyintai Formation; 15—Dolomite of the Dengying Formation; 16—Diorite Porphyrite; 17—Quartz diorite porphyrite; 18—Gold orebody; 19—Fracture zone; 20—Silicified zone; 21—Fault and its serial number; 22—Lunshan anticline; 23—Drill hole and its serial number; 24—Exploration line and its serial number

山质-英安质火山角砾岩组成。

2.2 矿床地质

仑山金矿床矿体呈透镜状、似层状分布于仑山

背斜轴部西南转折端杨冲组中,赋矿围岩为白垩系杨冲组(K_{1y})的泥质粉砂岩、碳质泥岩,矿体顶板围岩为白垩系上党组(K_{1s})火山角砾岩,矿体底板围岩

为奥陶系红花园组(O_1h)碳酸盐岩(图3)。最大的金矿体为1号矿体,东西长约730 m,南北宽约70~230 m,走向为NW,倾向为SW,倾角约 $25^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 。矿体沿走向和倾向多有分支现象,厚度总体表现为由中间向两边逐渐缩小的趋势,平均品位为 1.89×10^{-6} 。

仑山金矿床矿石类型主要为黄铁矿矿石,矿石构造主要为浸染状构造、层纹状构造和胶状构造。矿石结构以自形粒状、半自形粒状结构为主,其次为环带状结构。金属矿物以黄铁矿为主,少量黄铜矿、方铅矿和闪锌矿。显微镜下可见黄铜矿与黄铁矿共生,方铅矿、闪锌矿与脉石矿物共生。非金属矿物主要为石英、方解石、绢云母、萤石等。载金矿物主要为黄铁矿,陆邦成等(2016)通过扫描电子显微镜和电子探针分析发现仑山金矿床的金主要以显微自然金和不可见金的形式存在,其中显微自然金分布在碳质泥岩碎屑石英颗粒中或不同石英颗粒之间,不可见金以纳米级自然金和固溶体金的形式赋存于黄铁矿中。

根据矿床产出特征、围岩蚀变及脉体穿插关系等,将仑山金矿床划分为以下几个成矿期/阶段:

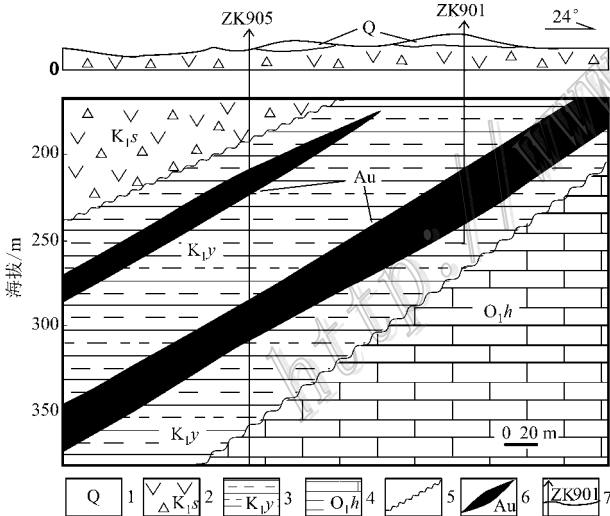


图3 仑山金矿床9号勘探线矿体剖面图(据郑会俊, 2014 修改)

1—第四系;2—白垩系上党组火山岩;3—白垩系杨冲组泥质粉砂岩、碳质泥岩;4—奥陶系红花园组碳酸盐岩;5—角度不整合界线;6—金矿体;7—钻孔及编号

Fig. 3 Geological section along No. 9 exploration line of the Lunshan gold deposit (modified after Zheng, 2014)
1—Quaternary; 2—Volcanic rocks of Cretaceous Shangdang Formation;
3—Argillaceous siltstone, carbonaceous mudstone of Cretaceous Yangchong Formation; 4—Carbonate rocks of Ordovician Honghuayuan Formation; 5—Angular unconformity; 6—Gold orebody;
7—Drill hole and its serial number

(1) 沉积成矿期。以载金矿物黄铁矿呈层纹状顺着围岩层理分布为特点(图4a),该期基本没有形成任何热液脉。围岩主要为白垩系杨冲组(K_1y)的碳质泥岩和泥质粉砂岩,金属矿物主要为黄铁矿。围岩因富含大量有机质而呈黑色,显微镜下可观察到大量草莓状黄铁矿和沥青共生(图4b),围岩中有机质含量高的地方金矿化较好。

(2) 热液成矿期。据热液石英、方解石、萤石脉与围岩的穿插关系以及含金矿物黄铁矿的分布规律,将热液成矿期进一步划为热液Ⅰ和热液Ⅱ两个阶段。热液Ⅰ阶段形成石英、方解石和黄铁矿等矿物,表现为石英细网脉、方解石细网脉穿插围岩(图4a、c、d)或方解石-黄铁矿脉穿插围岩(图4e),镜下可见到绢云母化、高岭土化等矿化蚀变(图4f)以及少量与黄铁矿共生的黄铜矿(图4g),此外,少量方铅矿和闪锌矿等金属矿物也在该阶段形成。热液Ⅱ阶段属于成矿最晚的阶段,该阶段以形成萤石-方解石-石英(黄铁矿)脉为标志(图4h),但是该阶段的黄铁矿在野外不常见,仅在镜下偶尔能见有少量黄铁矿与萤石、石英共生(图4i)。电子探针分析表明,该阶段的黄铁矿仍含有少量金(陆邦成等,2016)。热液Ⅱ阶段仅形成极少量的黄铁矿,因此,热液Ⅱ阶段不是主要成矿阶段,仑山金矿床成矿作用以沉积成矿期和热液Ⅰ阶段为主。各期/阶段矿物生成顺序见陆邦成等(2016),为了避免重复,本文不再赘述。

仑山金矿床围岩蚀变主要分布在白垩系杨冲组中,蚀变类型为硅化、黄铁矿化、碳酸盐化、绢云母化等,其中硅化和黄铁矿化与矿化密切相关。硅化表现为石英呈细网脉状穿插围岩,少量与黄铁矿共生顺着围岩层理分布。黄铁矿化遍布整个成矿过程,其中沉积成矿期黄铁矿呈层纹状顺着泥岩层理分布;热液Ⅰ阶段形成黄铁矿-方解石脉穿插围岩,同时还有少量绢云母形成;热液Ⅱ阶段黄铁矿则与萤石、方解石、石英共生,但黄铁矿较少,仅在薄片中能观测到。

3 流体包裹体研究

3.1 样品描述和测试方法

由于沉积成矿期基本没有形成热液脉,沉积成矿期无法进行流体包裹体的研究,有待今后进一步工作。本次研究主要选取热液Ⅰ阶段和热液Ⅱ阶段形成的石英、方解石和萤石等非金属矿物中的流体

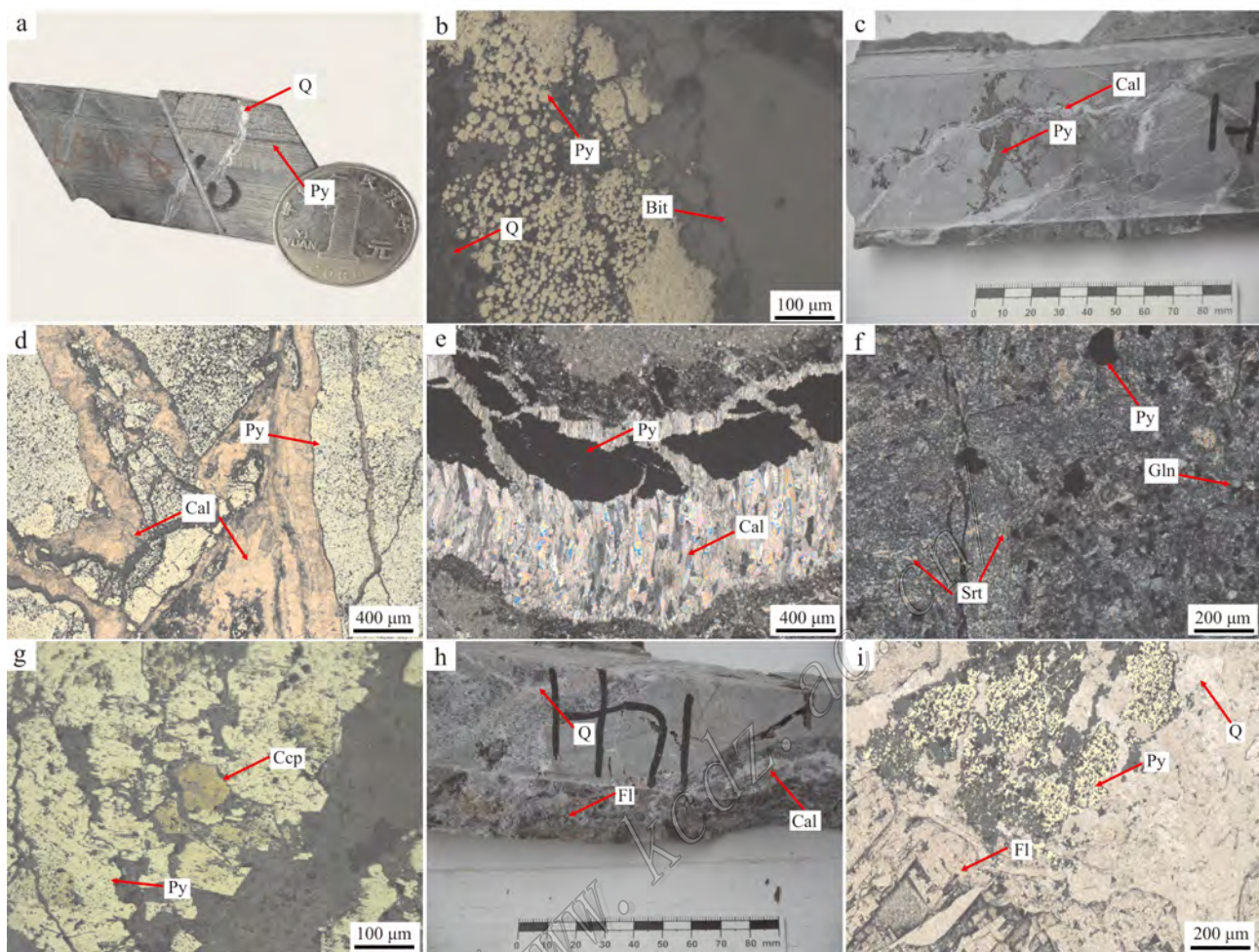


图 4 仑山金矿床野外及镜下照片

a. 泥岩中黄铁矿顺着围岩层理分布, 后期石英细脉穿插黄铁矿; b. 泥岩中草莓状黄铁矿和沥青共生, 局部可见草莓状黄铁矿重结晶成黄铁矿(反射光); c. 泥岩中方解石细脉穿插黄铁矿脉; d. 泥岩中方解石脉穿插先形成的黄铁矿(混光); e. 黄铁矿-方解石脉穿插围岩, 围岩为泥岩(正交偏光); f. 泥岩中的碎屑物发生绢云母化和高岭土化, 不透明矿物为黄铁矿(正交偏光); g. 泥岩中黄铁矿与黄铜矿共生(反射光);

h. 萤石-石英-方解石脉穿插围岩, 围岩为硅化泥岩; i. 萤石-石英-黄铁矿脉, 围岩为泥岩(混光)

Py—黄铁矿; Q—石英; Cal—方解石; Fl—萤石; Srt—绢云母; Gln—高岭石; Bit—沥青

Fig. 4 Field and microscopic photos of the Lunshan gold deposit

a. Pyrite is distributed along bedding in the mudstone, and quartz veinlet cuts bedding and pyrite; b. Framboidal pyrite coexists with asphalt in the mudstone with framboidal pyrite recrystallization (reflected light); c. Calcite veinlet cuts the pyrite veinlet in the mudstone; d. In the mudstone, the calcite veinlet cuts the early pyrite (mixed light); e. Pyrite-calcite vein cuts wall rock, i. e., mudstone (polarized light); f. The debris in the mudstone was subjected to sericitization and kaolinization, opaque minerals were pyrite (polarized light); g. In the mudstone, pyrite coexists with chalcopyrite (reflected light); h. Fluorite-quartz-calcite vein cuts wall rock, i. e., silicified mudstone; i. Fluorite-quartz-pyrite veins in the mudstone (mixed light)

Py—Pyrite; Q—Quartz; Cal—Calcite; Fl—Fluorite; Srt—Sericite; Gln—Kaolinite; Bit—Asphalt

包裹体作为研究对象, 了解仑山金矿床的成矿流体特征。流体包裹体研究的 15 件样品均采自仑山金矿床钻孔中。每件样品的地质特征描述见表 1。

流体包裹体显微测温实验是在中国地质大学(北京)地球化学实验室进行, 实验仪器为 Linkam

THMSG-600 型显微冷热台, 仪器测定的温度范围为 $-196 \sim +600^{\circ}\text{C}$, 在 10°C 以下加热速率为 $0.1 \sim 1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 在 $10 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 之间加热速率为 $3 \sim 5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 测试精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。在 $>100^{\circ}\text{C}$ 时加热速率为 $5 \sim 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 测试精度为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 包裹体

表 1 仑山金矿床样品的地质特征描述

Table 1 Geological characteristics of samples in the Lunshan gold deposit

样品号	采样位置	地质特征描述	成矿阶段	测试项目(对象)
LS-14-14	钻孔 ZK903,372.5 m 处	泥岩,局部可见方解石-黄铁矿细脉穿插围岩	热液Ⅰ阶段	氧同位素(Cal)
LS-14-15	钻孔 ZK903,375.2 m 处	泥岩,局部可见有方解石-黄铁矿细脉穿插围岩	热液Ⅰ阶段	流体包裹体(Cal), 氢、氧同位素(Cal)
LS-14-36	钻孔 ZK1308,292.3 m 处	泥岩,局部可见有方解石-黄铁矿细脉穿插围岩	热液Ⅰ阶段	流体包裹体(Cal),氢、氧 同位素(Cal)
LS-14-39	钻孔 ZK1903,320 m 处	碳质泥岩,局部可见有石英网脉穿插围岩	热液Ⅰ阶段	流体包裹体(Q)
LS-14-41	钻孔 ZK1903,320.7 m 处	碳质泥岩,局部可见有石英网脉穿插围岩	热液Ⅰ阶段	流体包裹体(Q)
LS-14-42	钻孔 ZK1903,323.7 m 处	碳质泥岩,局部可见有石英网脉穿插围岩	热液Ⅰ阶段	流体包裹体(Q)
LS-14-66	钻孔 ZK905,238.7 m 处	碳质泥岩,局部可见有方解石-黄铁矿细脉穿插围岩	热液Ⅰ阶段	流体包裹体(Cal)
LS-14-89	钻孔 ZK703,221.53 m 处	碳质泥岩,局部可见有方解石-黄铁矿细脉穿插围岩	热液Ⅰ阶段	流体包裹体(Cal)
LS-14-102	钻孔 ZK1702,157.9 m 处	泥岩,局部可见有方解石-黄铁矿细脉穿插围岩	热液Ⅰ阶段	流体包裹体(Cal)
LS-14-103	钻孔 ZK1702,167.14 m 处	泥岩,局部可见有方解石-黄铁矿细脉穿插围岩	热液Ⅰ阶段	流体包裹体(Cal),氢、氧 同位素(Cal)
LS-14-72	钻孔 ZK905,257.35 m 处	碳质泥岩,可见有方解石细脉穿切黄铁矿脉	热液Ⅱ阶段	流体包裹体(Cal)
LS-14-8	钻孔 ZK903,320.5 m 处	硅化泥岩,局部见有萤石-石英-方解石细脉-网脉穿插围岩	热液Ⅱ阶段	流体包裹体(Fl、Q、Cal)
LS-14-9	钻孔 ZK903,319.8 m 处	硅化泥岩,局部可见萤石-石英-方解石细脉穿插围岩	热液Ⅱ阶段	氧同位素(Q、Cal)
LS-14-12	钻孔 ZK903,337.9 m 处	泥岩,局部见有萤石-石英-方解石细脉-网脉穿插围岩	热液Ⅱ阶段	流体包裹体(Q、Cal))
LS-14-19	钻孔 ZK1902,212.3 m 处	硅化泥岩,局部可见萤石-石英细脉穿插围岩	热液Ⅱ阶段	氧同位素(Q)
LS-14-24	钻孔 ZK1902,213.1 m 处	硅化泥岩,局部可见萤石-石英细脉穿插围岩	热液Ⅱ阶段	氧同位素(Q)
LS-14-25	钻孔 ZK1902,213.2 m 处	硅化泥岩,局部可见萤石-石英细脉穿插围岩	热液Ⅱ阶段	氧同位素(Q)
LS-14-74	钻孔 ZK905,267.4 m 处	硅化泥岩,可见有萤石-石英-方解石细脉穿插围岩	热液Ⅱ阶段	氧同位素(Cal)
LS-14-75	钻孔 ZK905,270.5 m 处	硅化泥岩,可见有萤石-石英-方解石细脉穿插围岩	热液Ⅱ阶段	流体包裹体(Fl、Q、Cal), 氧同位素(Q)
LS-14-76	钻孔 ZK905,272.0 m 处	碳质泥岩,局部可见萤石-石英细脉穿插围岩	热液Ⅱ阶段	流体包裹体(Fl、Q),氢、氧 同位素(Q)
LS-14-79	钻孔 ZK1102,219.01 m 处	硅化泥岩,可见有萤石-石英-方解石细脉穿插围岩	热液Ⅱ阶段	氧同位素(Q)
LS-14-110	钻孔 ZK1703,246.97 m 处	泥岩,局部可见有萤石-方解石脉穿插围岩	热液Ⅱ阶段	流体包裹体(Fl、Cal), 氧同位素(Cal)

注：流体包裹体测试括号内为寄主矿物,氢、氧同位素测试括号内为分析的单矿物。Q—石英;Cal—方解石;Fl—萤石。

的盐度是用测定的冰点通过 Bodnar(1993)的方程计算而得,然后再根据刘斌等(1999)提出的密度式和等容式,利用流体包裹体均一温度和盐度计算成矿流体的密度,计算结果列于表 2。

3.2 流体包裹体类型

总体来看,热液Ⅰ阶段形成的石英和方解石中流体包裹体较为发育,大小(长轴)一般在 3~17 μm 之间,形状有圆状、椭圆状和不规则状。热液Ⅱ阶段

表 2 仑山金矿床石英、方解石和萤石中的流体包裹体数据表

Table 2 Fluid inclusion data of quartz, calcite and fluorite from the Lunshan gold deposit

成矿阶段及样品号	寄主矿物	种类	大小/ μm	气相分数/%	均一温度/ $^{\circ}\text{C}$	冰点温度/ $^{\circ}\text{C}$	盐度/%	密度/ (g/cm^3)
热液 I 阶段								
LS-14-15	方解石	V-L	4~11	5~10	148~257(13)	-1.5~-0.5(8)	0.88~2.57(8)	0.80~0.92(13)
LS-14-36	方解石	V-L	5~15	5~25	158~270(9)	-2.6~-1.5(8)	2.57~4.34(8)	0.80~0.93(9)
LS-14-39	石英	V-L	3~11	15~25	296~343(10)	-4.0~-3.0(10)	4.96~6.16(10)	0.70~0.78(10)
LS-14-41	石英	V-L	4~13	10~20	338~362(5)	-4.2~-3.3(5)	5.41~6.74(5)	0.65~0.71(5)
LS-14-42	石英	V-L	6~9	20	327~366(2)	-4.1~-3.8(2)	6.16~6.59(2)	0.66~0.73(2)
LS-14-66	方解石	V-L	4~8	5~25	142~251(14)	-3.4~-1.7(14)	2.90~5.56(14)	0.84~0.95(14)
LS-14-89	方解石	V-L	3~12	5~10	150~221(16)	-6.0~-4.7(14)	7.45~9.80(14)	0.90~0.98(16)
LS-14-102	方解石	V-L	3~14	5~20	177~274(18)	-3.3~-2.4(18)	4.03~5.41(18)	0.86~0.93(18)
LS-14-103	方解石	V-L	5~17	5~10	156~231(12)	-3.4~-0.4(12)	0.71~5.56(12)	0.83~0.93(12)
热液 II 阶段								
LS-14-8	石英	V-L	4~12	5~10	167~170(9)	-5.4~-3.0(9)	4.96~8.41(9)	0.93~0.96(9)
	方解石	V-L	5~14	5~15	159~256(10)	-3.4~-2.2(9)	5.71~3.71(9)	0.82~0.95(10)
	萤石	V-L	8~18	10	134~137(10)	-3.2~-1.6(10)	2.74~5.26(10)	0.96~0.97(10)
LS-14-12	石英	V-L	4~5	5~10	160~227(3)	-2.3~-1.3(3)	2.24~3.87(3)	0.86~0.94(3)
	石英	V-L+S	5	5	221(1)			
	方解石	V-L	5~30	5~15	154~240(13)	-1.5~-0.4(13)	0.71~2.57(13)	0.83~0.93(13)
LS-14-72	方解石	V-L	6~11	10~20	169~260(10)	-4.2~-2.6(10)	4.34~6.88(10)	0.84~0.94(10)
LS-14-75	石英	V-L	3~10	5~12	161~241(5)	-4.8~-2.8(4)	4.65~7.59(4)	0.85~0.95(5)
	方解石	V-L	4~8	5~15	124~211(9)	-1.4~-0.8(8)	1.40~2.41(8)	0.86~0.96(9)
	萤石	V-L	5~31	5~10	158~243(10)	-7.4~-4.3(10)	7.02~10.98(10)	0.88~0.99(10)
LS-14-76	石英	V-L	3~24	5~10	133~244(6)	-3.0~-2.1(5)	3.55~4.96(5)	0.91~0.96(6)
	萤石	V-L	5~13	5~10	153~175(7)	-4.3~-1.7(7)	2.90~6.88(7)	0.92~0.94(7)
LS-14-110	方解石	V-L	6~13	5~40	168~226(5)	-1.6~-0.5(5)	0.88~2.74(5)	0.84~0.92(5)
	萤石	V-L	8~14	10	163~166(2)	-4.4~-4.3(2)	6.88~7.02(2)	0.95~0.96(2)

注：括号内为包裹体个数。

形成的石英、方解石和萤石中的包裹体也比较发育，包裹体多呈面状或线状沿晶面生长方向分布，包裹体长轴一般在 3~18 μm 之间，少数达到 30 μm 以上，形状有圆状、椭圆状和规则状等。根据流体包裹体的大小、气相分数，以及加热过程中的均一方式，流体包裹体分为以下 3 种类型：

(1) 气相单相包裹体：该类型包裹体主要发育在热液 I 阶段形成的石英中，几乎全部由气相组成(图 5a)，约占包裹体总量的 2%。包裹体多呈椭圆状、不规则状，包裹体大小不等，一般为几个微米。

(2) 气液两相包裹体：该类型包裹体在本区最为发育，在热液 I 和热液 II 阶段的石英、方解石和萤石的细脉或网脉中均有分布(图 5b~h)，约占包裹体总数的 90% 以上。包裹体由气、液两相组成，热液 I 阶段石英和方解石中的气相分数为 5%~25%，热液 II 阶段石英、方解石和萤石中的气相分数为 5%~20%，个别达 40%。此类包裹体多呈圆状、椭圆状、规则状和不规则状。

(3) 含子晶三相包裹体：该类型包裹体数量较

少，主要分布于热液 II 阶段形成的石英脉中，包裹体由气相、水溶液和子晶矿物三相组成(图 5i)，子晶矿物暂未能测出，包裹体大小(长轴)一般在 5 μm 左右，气相分数为 5%，多呈不规则状。

3.3 均一温度、盐度和密度

热液 I 阶段石英中的气液两相流体包裹体均一温度变化于 296~366 $^{\circ}\text{C}$ ，多集中在 330~366 $^{\circ}\text{C}$ (表 2，图 6a)。盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 变化于 4.96%~6.74% 之间(表 2，图 6b)，流体密度为 0.65~0.78 g/cm^3 。热液 I 阶段方解石中气液两相流体包裹体均一温度变化于 142~274 $^{\circ}\text{C}$ ，多集中在 150~240 $^{\circ}\text{C}$ (表 2，图 6a)。盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 变化于 0.71%~9.80% 之间(表 2，图 6b)，流体密度介于 0.65~0.98 g/cm^3 之间。

热液 II 阶段萤石中的气液两相流体包裹体均一温度变化于 134~243 $^{\circ}\text{C}$ ，多集中在 134~170 $^{\circ}\text{C}$ (表 2，图 6c)。盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 变化于 2.90%~10.98% 之间(表 2，图 6d)，流体密度为 0.92~0.97 g/cm^3 。热液 II 阶段石英中的气液两相流体包裹体均一

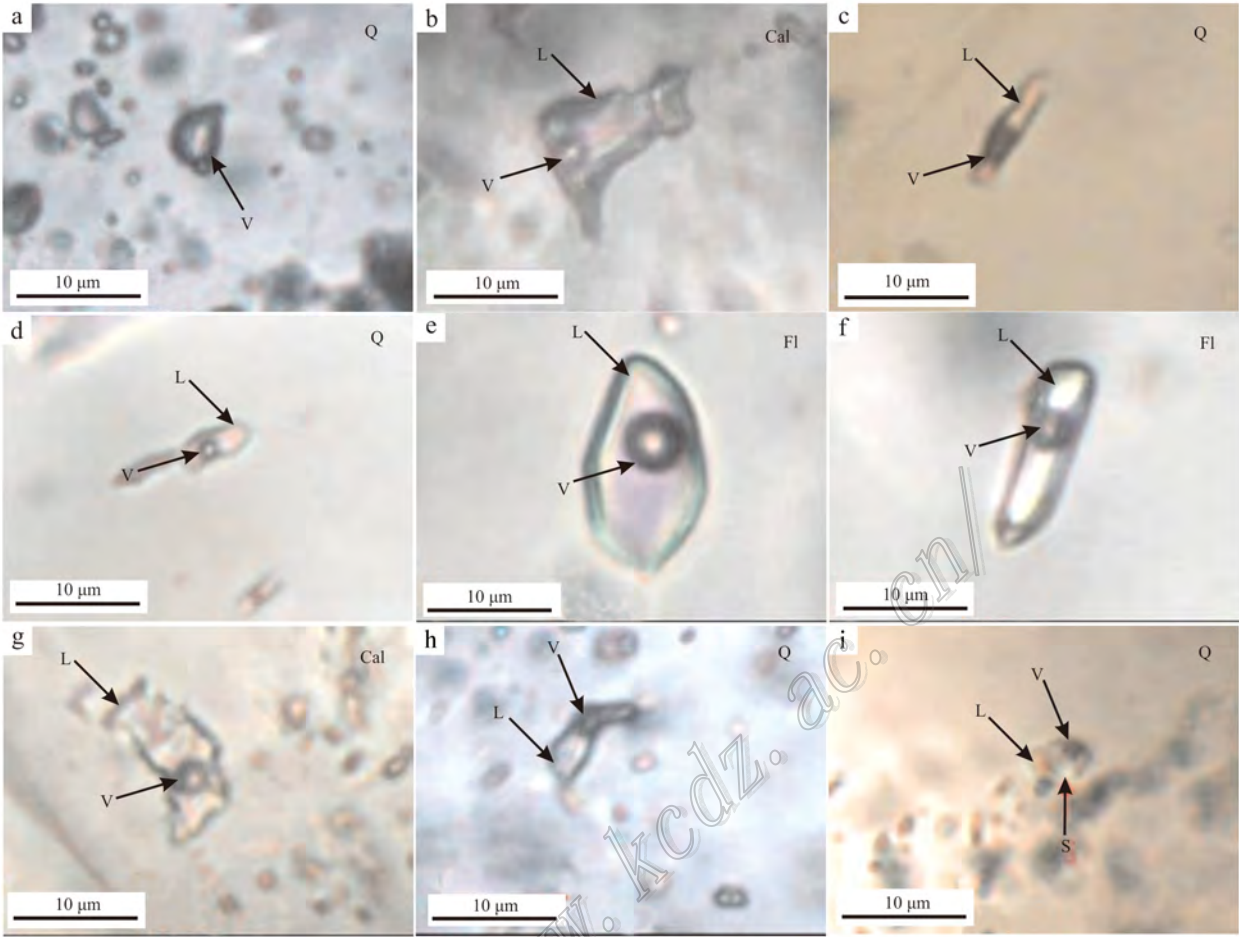


图 5 仑山金矿床流体包裹体显微照片

a. 热液 I 阶段石英中的单相气相包裹体；b. 热液 I 阶段方解石中的气液两相包裹体；c、d. 热液 I 阶段石英中的气液两相包裹体；e、f. 热液 II 阶段萤石中的气液两相包裹体；g. 热液 II 阶段方解石中的气液两相包裹体；h. 热液 II 阶段石英中的气液两相包裹体；i. 热液 II 阶段石英中的三相包裹体

Q—石英；Cal—方解石；Fl—萤石；V—气相；L—液相；S—子晶固相

Fig. 5 Microphotographs of fluid inclusions in the Lunshan gold deposit

a. Gas phase inclusions in quartz of hydrothermal I stage; b. Gas-liquid two phase inclusions in calcite of hydrothermal I stage; c, d. Gas-liquid two phase inclusions in quartz of hydrothermal I stage; e, f. Gas-liquid two phase inclusions in fluorite of hydrothermal II stage; g. Gas-liquid two phase inclusions in calcite of hydrothermal II stage; h. Gas-liquid two phase inclusions in quartz of hydrothermal II stage; i. Three phase inclusions in quartz of hydrothermal II stage

Q—Quartz; Cal—Calcite; Fl—Fluorite; V—Gas phase; L—Liquid; S—Solid phase

温度变化于 133~244℃，多集中在 160~190℃（表 2，图 6c）。盐度 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 变化于 2.90%~7.02% 之间（表 2，图 6d），流体密度为 0.86~0.96 g/cm³。热液 II 阶段方解石中的气液两相流体包裹体均一温度变化于 124~260℃，多集中在 150~210℃（表 2，图 6c）。盐度 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 变化于 0.71%~6.88% 之间（表 2，图 6d），流体密度介于 0.83~0.96 g/cm³ 之间。热液 II 阶段三相流体包裹体数量较少，仅在石英中发现一个，气液两相均一温度为 221℃（表 2）。

4 硫和氢、氧同位素分析

4.1 样品分选和测试方法

在详细的显微镜薄片观察和流体包裹体研究的基础上，挑选出 15 个黄铁矿样品进行硫同位素分析，包括 8 个沉积成矿期形成的和 7 个热液 I 阶段形成的黄铁矿样品，样品地质特征见表 3。流体包裹体的氢、氧同位素分析样品共挑出 13 个单矿物（石

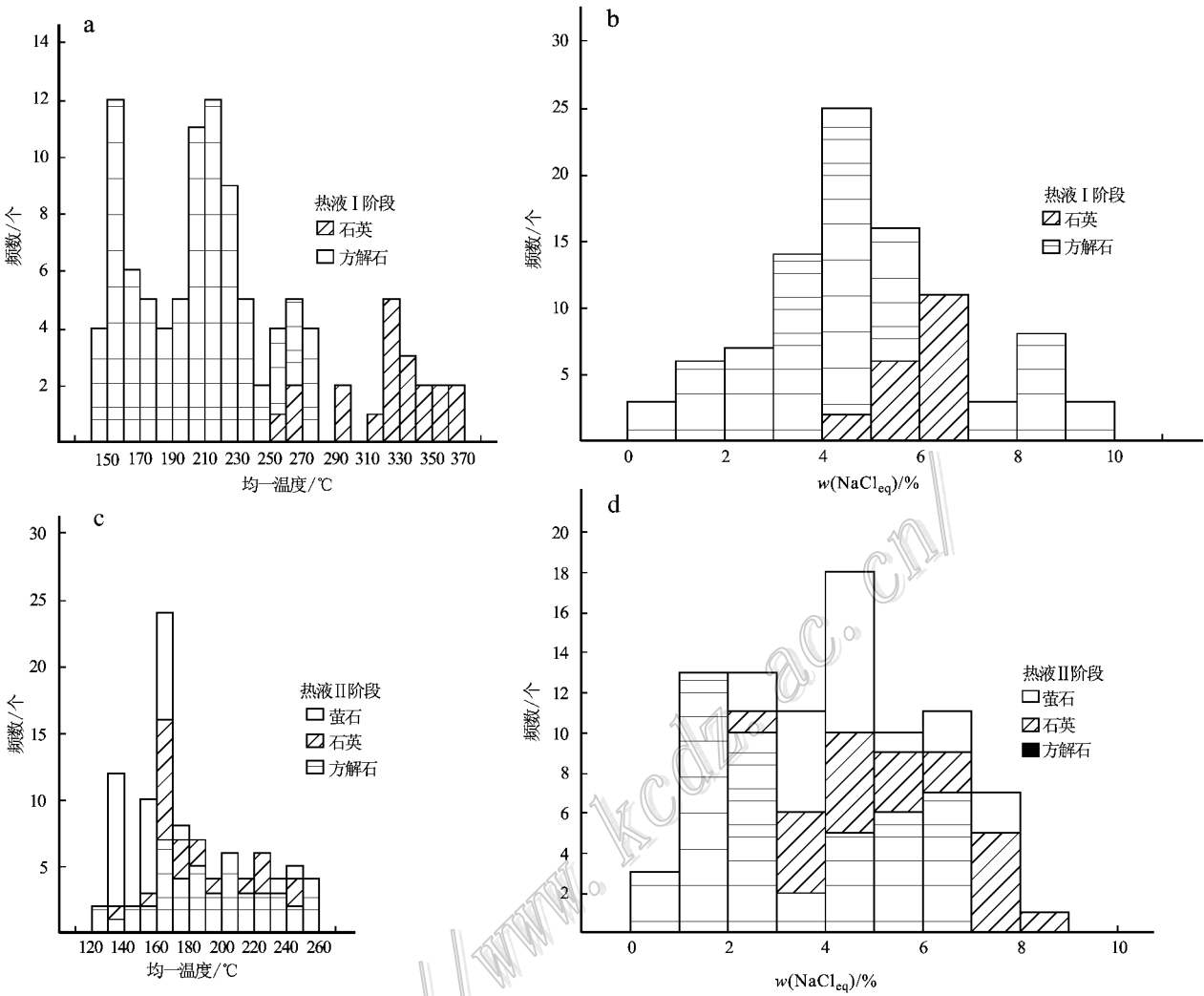


图 6 仑山金矿床流体包裹体的均一温度(a,c)和盐度(b,d)直方图

Fig. 6 Histogram of homogenization temperatures (a,c) and salinities (b,d) of fluid inclusions of the Lunshan gold deposit

表 3 仑山金矿床黄铁矿硫同位素组成

Table 3 Sulfur isotopic compositions of pyrite in the Lunshan gold deposit

序号	样品编号	采样位置	产状	成矿阶段	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
1	LS-14-6	钻孔 ZK903,253.1 m 处	碳质泥岩中顺层分布的黄铁矿	沉积成矿期	-12.8
2	LS-14-33	钻孔 ZK1309,448.1 m 处	泥岩中的星点状黄铁矿	沉积成矿期	+16.8
3	LS-14-57	钻孔 ZK1,664.9 m 处	碳质泥岩中的浸染状黄铁矿	沉积成矿期	+17.2
4	LS-14-84	钻孔 ZK703,200.4 m 处	砂岩中的浸染状黄铁矿	沉积成矿期	-15.3
5	LS-14-85	钻孔 ZK703,201.3 m 处	泥岩中顺层分布的黄铁矿	沉积成矿期	+12
6	LS-14-87	钻孔 ZK703,211.2 m 处	泥岩中的浸染状黄铁矿	沉积成矿期	-7.2
7	LS-14-90	钻孔 ZK703,239.4 m 处	碳质泥岩中顺层分布的细粒黄铁矿	沉积成矿期	+9.4
8	LS-14-103	钻孔 ZK1702,167.14 m 处	泥岩中的星点状黄铁矿	沉积成矿期	-10.3
9	LS-14-31	钻孔 ZK1309,436.7 m 处	泥岩中的黄铁矿细脉	热液 I 阶段	+11.6
10	LS-14-66	钻孔 ZK905,238.7 m 处	碳质泥岩中的黄铁矿细脉	热液 I 阶段	-3.9
11	LS-14-72	钻孔 ZK905,257.35 m 处	碳质泥岩中的黄铁矿脉	热液 I 阶段	-3.3
12	LS-14-104	钻孔 ZK1702,170.66 m 处	泥岩中的团块状黄铁矿	热液 I 阶段	-10.4
13	LS-14-107	钻孔 ZK1702,179.3 m 处	泥岩中方解石-黄铁矿细脉	热液 I 阶段	+13.7
14	LS-14-120	钻孔 ZK1720,593.3 m 处	碳质泥岩中方解石-黄铁矿脉	热液 I 阶段	+4.9
15	LS-14-121	钻孔 ZK1720,593.9 m 处	碳质泥岩中方解石-黄铁矿脉	热液 I 阶段	+7.5

英或方解石)样品,其中 4 个是热液 I 阶段形成的,9 个是热液 II 阶段形成的,样品地质特征见表 1。首先将选出的样品粉碎到 40~60 目,经筛分、清洗晾干和磁选后,再到双目镜下进一步挑选,得到纯度为 99% 的单矿物样品。

硫和氢、氧同位素测试在核工业北京地质研究所实验测试中心完成。硫同位素测试流程为:称取一定量挑好的黄铁矿样品,再采用 Cu_2O 作为氧化剂,在真空系统和高温条件下使硫化物和 Cu_2O 反应,硫全部转化为纯净的 SO_2 气体,然后再用 Finnigan MAT-253 型质谱仪测定其 $\delta^{34}\text{S}$ 值。测试结果采用国际标准为 V-CDT,分析精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。氢同位素的测试流程为:首先加热石英、方解石包裹体样品使其爆裂,释放出挥发分,提取蒸馏水,然后在 400°C 的条件下使水与锌发生还原反应产生氢气,再使用液氮冷冻,收集到有活性碳的样瓶中,最后再 Finnigan MAT-253 质谱仪上分析其氢同位素组成。氢同位素采用的国际标准为 V-SMOW,分析精度为 $\pm 2\text{‰}$ 。

石英的氧同位素测试流程为:首先在制样装置达到 10^{-3}Pa 真空条件下,将样品与纯净的五氟化溴在 $500\sim 680^\circ\text{C}$ 恒温条件下反应 14 h,释放出 O_2 和杂质组分,将 SiF_4 、 BrF_3 等杂质组分用冷冻法分离出去后,纯净 O_2 在 700°C 且有铂催化剂的条件下,与石墨恒温反应生成 CO_2 ,用冷冻法收集 CO_2 ,在 Finnigan MAT-253 气体同位素质谱分析样品的氧同位素。

方解石的氧同位素测试流程为:首先在烘箱 105°C 温度烘烤样品 2 h,去除吸附水,在 75°C 下烘烤在 Gasbench 线制样设备的样品管,烘干后将 0.1 mg 左右样品放入样品管中并封盖,并用高纯氮气将样品管中的空气排出,然后再用酸泵酸针向样品管中加过量的 100% 磷酸,磷酸与碳酸盐样品反应产生 CO_2 气体,再用高纯氮气将生成的 CO_2 气体带入 Finnigan MAT-253 质谱仪测试氧同位素组成。氧同位素采用的国际标准为 V-SMOW,分析精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

4.2 分析结果

硫同位素分析结果见表 3。沉积成矿期形成的黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布在 2 个端员,一个端员的 4 个样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 $9.4\text{‰}\sim 17.2\text{‰}$ 之间,平均值为 13.9‰ ,显示重硫特征;另一端员的 4 个样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 $-7.2\text{‰}\sim -15.3\text{‰}$ 之间,平均值为 -11.4‰ ,显示轻硫特征(表 3,图 7)。热液 I 阶段形

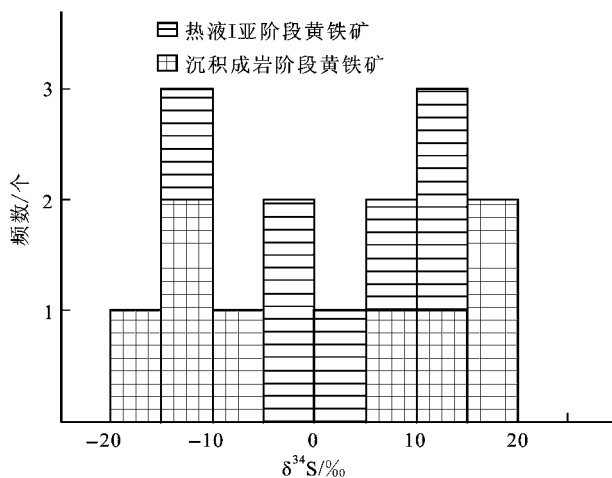


图 7 仑山金矿床硫同位素频数直方图

Fig. 7 Histogram of sulfur isotopes from the Lunshan gold deposit

成的黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较广,变化于 $-10.4\text{‰}\sim 13.7\text{‰}$ 之间,平均为 2.9‰ 。

由于样品量不足的原因,能同时满足氢、氧同位素分析的样品只有 5 件,分别为 LS-14-14、LS-14-15、LS-14-36、LS-14-76、LS-14-103,其他样品数量仅能提供氧同位素测试。氢、氧同位素样品地质特征见表 1,测试分析结果见表 4。热液 I 阶段 4 件方解石样品 δD 分布在 $-25\text{‰}\sim -57.2\text{‰}$ 之间; $\delta^{18}\text{O}_{\text{矿物}}$ 分布在 $16.2\text{‰}\sim 17.8\text{‰}$ 之间,使用样品均一温度平均值,采用公式 $1000 \ln \alpha_{\text{方解石-水}} = 2.78 \times 10^6 T^{-2} - 3.39$ (O'Neil et al., 1969),计算得到 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 值分布在 $7.8\text{‰}\sim 9.5\text{‰}$ 之间,属岩浆水范畴(表 4,图 8)。热液 II 阶段一个石英样品 (LS-14-76) δD 值为 -82.1‰ ,所有石英的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{矿物}}$ 分布在 $10.2\text{‰}\sim 16.6\text{‰}$ 之间(表 4)。结合样品的均一温度平均值,采用公式 $1000 \ln \alpha_{\text{石英-水}} = 3.38 \times 10^6 T^{-2} - 3.40$ (Clayton et al., 1972),计算得到该阶段热液的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 分布在 $-3.1\text{‰}\sim 3.3\text{‰}$ 之间,显示有大气降水的加入。热液 II 阶段方解石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{矿物}}$ 分布在 $17.4\text{‰}\sim 19.3\text{‰}$ 之间,计算得到 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 分布在 $9.2\text{‰}\sim 10.6\text{‰}$ 之间。

5 萤石 Sm-Nd 测年

Sm 和 Nd 都是稀土元素,它们的地球化学性质相似,在外界作用过程中 Sm 和 Nd 的迁移对 Sm-Nd 体系的分馏影响很小,即 Sm-Nd 体系具有很强的封闭性,由于它们的这种特性,目前 Sm-Nd 测年已成

表 4 仑山金矿床的氢氧同位素测试分析结果

Table 4 Hydrogen and oxygen isotope compositions of quartzs and calcites in the Lunshan gold deposit

样号	寄主矿物	成矿阶段	$\delta D/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}/\text{‰}$	均一温度/℃	$\delta^{18}\text{O}_{\text{矿物}}/\text{‰}$
LS-14-14	方解石	热液Ⅰ阶段	-57.2	9.5	214	16.5
LS-14-15	方解石	热液Ⅰ阶段	-25.0	9.5	214	17.8
LS-14-36	方解石	热液Ⅰ阶段	-25.0	8.4	225	16.2
LS-14-103	方解石	热液Ⅰ阶段	-43.5	7.8	204	16.6
LS-14-9	方解石	热液Ⅱ阶段	-	9.2	182	19.2
LS-14-9	石英	热液Ⅱ阶段	-	-0.3	182	12.6
LS-14-19	石英	热液Ⅱ阶段	-	0.5	177	13.8
LS-14-24	石英	热液Ⅱ阶段	-	-1.9	177	11.4
LS-14-25	石英	热液Ⅱ阶段	-	0.0	177	13.3
LS-14-74	方解石	热液Ⅱ阶段	-	10.6	206	19.3
LS-14-75	石英	热液Ⅱ阶段	-	3.3	177	16.6
LS-14-76	石英	热液Ⅱ阶段	-82.1	0.5	165	14.7
LS-14-79	石英	热液Ⅱ阶段	-	-3.1	177	10.2
LS-14-110	方解石	热液Ⅱ阶段	-	8.7	206	17.4

注：LS-14-9 号样与 LS-14-8 号样采样位置相近，选择后者的平均均一温度来换算；LS-14-19、LS-14-24、LS-14-25 和 LS-14-79 号样选择热液Ⅱ阶段所有已测石英的平均均一温度来换算；LS-14-74 和 LS-14-110 号样选择热液Ⅱ阶段所有已测方解石的平均均一温度来换算；“-”表示该值因样品不满足最低测试含量要求而无法测出。

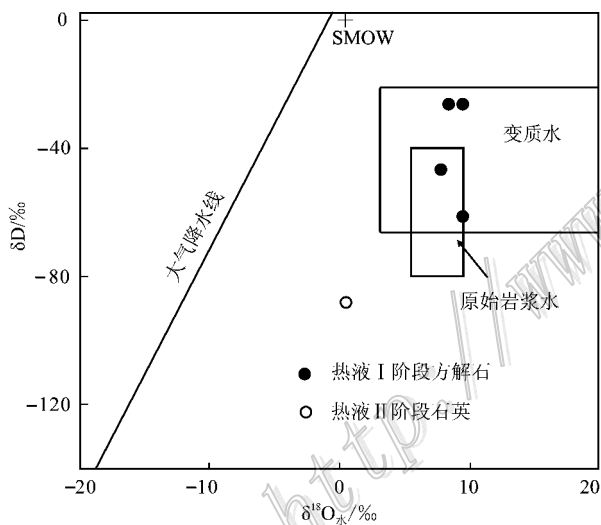


图 8 仑山金矿床成矿流体氢、氧同位素组成图
(底图据 Taylor,1986)

Fig. 8 Hydrogen and oxygen isotopic composition of Lunshan gold deposit (base map after Taylor,1986)

为矿床年代学研究中的一种有效方法(王银喜等, 1991 张家菁等,2012)。本次 Sm-Nd 测年分析的样品主要来源于热液Ⅱ阶段形成的萤石,Sm、Nd 同位素分析在中国科学院南京土壤研究所技术服务中心完成,Sm、Nd 的同位素稀释法定量测定和 Nd 同位素比值测定均在英国 VG354 同位素质谱仪上进行。萤石 Sm-Nd 测年分析结果见表 5。萤石的 $w(\text{Sm})$ 为 $0.0734 \times 10^{-6} \sim 0.3025 \times 10^{-6}$, $w(\text{Nd})$ 为

$0.1468 \times 10^{-6} \sim 0.5307 \times 10^{-6}$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 变化范围分别为 $0.0842 \sim 1.257$ 和 $0.511\,959 \sim 0.512\,665$ 。利用 Isoplot 软件,求得 6 件萤石样品等时线年龄 $t = (93.7 \pm 3.1) \text{ Ma}$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 为 $0.511\,897$, MSWD 为 11.3(图 9)。如图 9 所示,所有的萤石样品数据均排列在一条直线上,表现出明显的线性特征,且样品分布均匀。在镜下可见到仑山金矿床热液Ⅱ阶段黄铁矿与萤石、石英共生,电子探针分析表明该阶段黄铁矿中同样含有少量金(陆邦成等,2016),表明热液Ⅱ阶段成矿作用仍在进行。此次测定的萤石 Sm-Nd 等时线年龄 $(93.7 \pm 3.1) \text{ Ma}$ 应代表成矿晚阶段(热液Ⅱ阶段)的年龄。

6 讨论

6.1 成矿流体性质与来源

仑山金矿床发育丰富的原生流体包裹体,热液Ⅰ阶段石英中的气液两相流体包裹体均一温度变化于 $296 \sim 366^\circ\text{C}$,多集中在 $330 \sim 366^\circ\text{C}$,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 变化于 $4.96\% \sim 6.74\%$ 之间(表 2,图 6b)。热液Ⅰ阶段方解石中气液两相流体包裹体均一温度变化于 $142 \sim 274^\circ\text{C}$,多集中在 $150 \sim 240^\circ\text{C}$,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 变化于 $0.71\% \sim 9.80\%$ 之间(表 2,图 6b)。

表 5 仑山金矿床萤石的 Sm-Nd 含量及同位素组成

Table 5 Sm-Nd content and isotopic compositions of fluorite in the Lunshan gold deposit						
样品号	采样位置	产状	$w(\text{Sm})/(\mu\text{g/g})$	$w(\text{Nd})/(\mu\text{g/g})$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 1\sigma$
LS-14-22	钻孔 ZK1902, 212.9 m 处	硅化泥岩中热液 II 阶段形成的萤石脉	0.0734	0.5307	0.0842	0.511959 ± 7
LS-14-23	钻孔 ZK1902, 212.95 m 处	硅化泥岩中热液 II 阶段形成的萤石脉	0.1076	0.4263	0.1426	0.511978 ± 9
LS-14-24	钻孔 ZK1902, 213.1 m 处	硅化泥岩中热液 II 阶段形成的萤石-石英脉	0.1348	0.3461	0.2342	0.512037 ± 7
LS-14-25	钻孔 ZK1902, 213.2 m 处	硅化泥岩中热液 II 阶段形成的萤石-石英脉	0.3025	0.1468	1.257	0.512665 ± 8
LS-14-74	钻孔 ZK905, 267.4 m 处	硅化泥岩中热液 II 阶段形成的萤石-方解石-石英脉	0.2549	0.1803	0.8534	0.512427 ± 9
LS-14-110	钻孔 ZK1702, 246.97 m 处	硅化泥岩中热液 II 阶段形成的萤石-方解石脉	0.2296	0.4325	0.3261	0.512092 ± 10

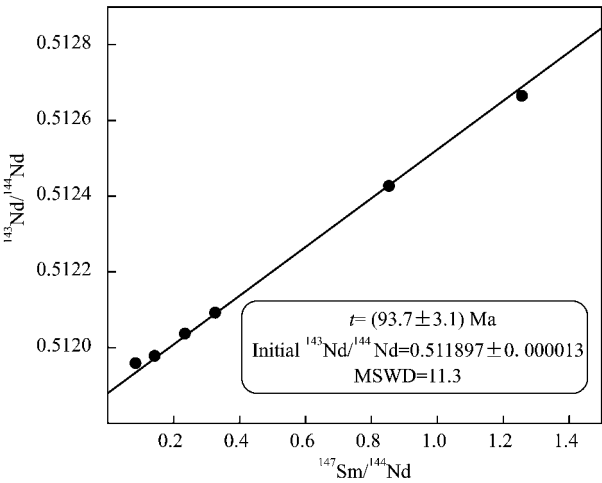


图 9 仑山金矿床萤石 Sm-Nd 等时线

Fig. 9 Sm-Nd isotopic isochron of fluorite in the Lunshan gold deposit

热液 I 阶段方解石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 分布在 $7.8\text{‰} \sim 9.5\text{‰}$ 之间,均落于岩浆流体范围内($5.5\text{‰} \sim 9.5\text{‰}$, Taylor, 1986),指示其成矿流体来源于岩浆。热液 I 阶段方解石成矿流体 δD 值为 $-25\text{‰} \sim -57.2\text{‰}$, 2 个样品 (LS-14-14、LS-14-103) 基本上位于岩浆流体范围内 ($-80\text{‰} \sim -40\text{‰}$, Taylor, 1986)。宁镇矿集区区域地质背景表明,燕山期未经历任何区域变质作用,仑山金矿形成时和形成之后均未遭受到区域变质作用,流体不可能为变质流体,在图 8 中位于变质流体范围的原因有待进一步研究。总体来看,流体包裹体和氢、氧同位素表明,热液 I 阶段为中高温低盐度的岩浆流体。另外,热液 I 阶段石英流体包裹体均一温度明显比方解石高,考虑到方解石均一温度与热液 II 阶段矿物均一温度相近,笔者推断热液 I 阶段方解石的形成比石英稍晚,具体原因仍需要更多的资料来说明,仍需要进一步工作。

热液 II 阶段萤石、石英和方解石中的流体包裹体均一温度变化于 $124 \sim 260^{\circ}\text{C}$ (图 6c), 盐度 $w(\text{Na-Cl}_{\text{eq}})$ 大多变化于 $1\% \sim 8\%$ 之间 (图 6d)。热液 II 阶

段一个样品 (LS-14-76) δD 值为 -82.1‰ , 超出岩浆水范围, 但该样品 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}} = 0.5\text{‰}$ 证实了成矿流体有大气降水加入 (表 4 和图 8)。热液 II 阶段脉石矿物石英和方解石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 值明显分成 2 组, 样品 LS-14-9、LS-14-74、LS-14-110 中方解石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 值分别为 9.2‰ 、 10.6‰ 、 8.7‰ (表 4), 似乎以岩浆流体占主导, 但不排除大气降水的存在, 其他样品中石英 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 值变化于 $-3.1\text{‰} \sim 3.3\text{‰}$ 之间 (表 4), 指示成矿流体有大气降水的加入。热液 II 阶段为中低温低盐度流体, 成矿流体以大气降水占主导, 但仍有少量岩浆流体参与。

6.2 硫的来源

沉积成矿期形成的黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布在 2 个端员, 一个端员的 4 个样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 $9.4\text{‰} \sim 17.2\text{‰}$ 之间, 平均值为 13.9‰ , 显示重硫特征 (图 7)。长江中下游成矿带三叠系青龙群由周冲村组和青龙组组成 (徐学思, 1997), 青龙群中发育沉积成因的石膏, 其 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 $28.0\text{‰} \sim 28.8\text{‰}$ (陈锦石等, 1986), 以富集重硫为特征, 说明仑山金矿沉积成岩阶段的黄铁矿中部分硫可能来自于膏盐层, 也就是说, 杨冲组下伏的老地层 (最可能为青龙群) 为成矿提供了部分硫。另一个端员的 4 个样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 $-7.2\text{‰} \sim -15.3\text{‰}$ 之间, 平均值为 -11.4‰ , 显示轻硫特征 (图 7), 低达 -15.3‰ 的硫同位素暗示沉积成岩阶段有机质参与了黄铁矿的形成。前人研究表明, 宁镇地区白垩系沉积物形成环境主要为湖泊相环境 (张明超, 2015), 本文研究表明杨冲组碳质泥岩、粉砂岩中赋存有大量的有机质, 草莓状黄铁矿与沥青共存 (图 4b), 杨冲组成岩环境为还原环境, 说明有机质完全有可能参与了沉积成矿期金矿的形成, 同时也使得一部分重硫被还原成氢硫。

热液 I 阶段形成的黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较广, 变化于 $-10.4\text{‰} \sim 13.7\text{‰}$ 之间 (图 7)。样品 LS-14-31 和 LS-14-107 黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值分别为 11.6‰ 和

13.7‰,样品 LS-14-104 黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -10.4‰ (表 3),这 3 个黄铁矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值保留有沉积成岩阶段黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值的特点,说明热液 I 阶段黄铁矿的形成部分可能来源于沉积成岩阶段黄铁矿的活化迁移和富集。热液 I 阶段其余样品黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 $-3.9\text{‰} \sim 7.5\text{‰}$ 之间(表 3,图 7),基本上位于岩浆流体($-3\text{‰} \sim +7\text{‰}$, Ohmoto et al., 1997)范围,说明热液 I 阶段成矿物质硫部分可能来源于深部岩浆,与前述的热液 I 阶段成矿流体为岩浆流体的特点相一致。

总之,仑山金矿的成矿物质硫是多源的,沉积成矿期黄铁矿中的硫来自于下伏三叠系青龙群膏盐层,有机质参与了沉积成岩阶段黄铁矿的形成。热液 I 阶段黄铁矿除来源于沉积成岩阶段成矿物质活化迁移和富集外,不排除有部分硫来源于深部岩浆。仑山金矿成矿作用比较复杂。

6.3 矿床形成背景和形成过程

长江中下游成矿带中的矿床分成 3 种类型:第一种类型为斑岩-矽卡岩-层控 Cu-Au-Mo-Fe 矿床(唐永成等,1998;Mao et al., 2006, 2011),形成于隆起区,成矿作用与富钾钙碱性闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩和花岗闪长斑岩有关(137~156 Ma);第二种类型为磁铁矿-磷灰石矿床或玢岩铁矿床(唐永成等,1998;Mao et al., 2006, 2011;Yu et al., 2011;Zhou et al., 2013),形成于凹陷区,成矿作用与橄榄安粗岩系火山-次火山岩有关(127~135 Ma);第三种类型为中小型金矿床和小型铀矿床,形成于隆起区和凹陷区,与 A 型花岗岩有关(125~127 Ma),岩石类型包括石英正长岩、正长岩、石英二长岩和碱性花岗岩(范裕等,2008)。这个矿床类型的划分并未考虑宁镇矿集区中的矿床。

宁镇地区与成矿有关的侵入岩 Sr/Y 比值高(Wang et al., 2014),侵入岩放射性成因 Pb 同位素比值低,与典型古老下地壳 Pb 同位素值相似(Xu et al., 2002;徐继峰等,2011;Wang et al., 2014)。与成矿有关的侵入岩由拆沉下地壳的部分熔融作用所形成(Xu et al., 2002),或由富集地幔部分熔融形成的岩浆与古老下地壳混和作用所形成(Wang et al., 2014)。宁镇地区与成矿有关的侵入岩锆石 U-Pb 年龄介于 100~109 Ma 之间(曾键年等,2013;王小龙等,2014;Wang et al., 2014),宁镇矿集区代表着长江中下游成矿带最晚期的成矿作用,本文报道的仑山金矿萤石 Sm-Nd 等时线年龄为 (93.7 ± 3.1) Ma,

也支持宁镇矿集区成矿作用最晚,其成矿动力学背景对应中国东部晚中生代岩石圈拆沉与减薄事件,与晚中生代太平洋板块向欧亚大陆俯冲有关,晚中生代俯冲板块发生了反转(Wang et al., 2014;Yang et al., 2014)。

陆邦成等(2016)对仑山金矿金的赋存状态进行了研究,下白垩统杨冲组沉积成岩作用造成了金的局部预富集,扫描电镜观测到碳质泥岩碎屑石英中的显微自然金,沉积成矿期形成的黄铁矿金含量较高(电子探针分析),沉积成矿期形成的石英颗粒太细,无法进行包裹体观察,沉积成矿期流体性质仍不清楚。杨冲组碳质泥岩和粉砂岩形成于还原环境,有机质参与了沉积成矿期黄铁矿的形成,另一部分硫来源于下伏三叠系青龙群膏盐层。

早白垩世最晚期(100~109 Ma),宁镇地区有大量的花岗质岩石侵入(图 1),矿区可见石英闪长玢岩和闪长玢岩的侵入(图 2),这些花岗质岩石的侵入就位除提供成矿物质外,当岩浆分异作用形成的成矿流体萃取沉积成岩阶段黄铁矿等成矿物质,成矿流体向构造薄弱地带(仑山背斜轴部西南转折端)迁移富集,由于温度压力下降,导致仑山金矿床热液 I 阶段方解石-黄铁矿细脉、黄铁矿细脉和石英(黄铁矿)细脉的形成。在成矿最晚的热液 II 阶段,大量大气水加入岩浆-流体系统,导致热液 II 阶段萤石-石英-方解石(黄铁矿)细脉-网脉的形成。

7 结 论

(1) 仑山金矿床矿化蚀变与硅化和黄铁矿化密切相关,金属矿物主要为黄铁矿,极少量为黄铜矿、闪锌矿和方铅矿等,非金属矿物为石英、方解石、萤石和绢云母等,矿石结构为粒状、环带状结构,矿石构造为浸染状、层纹状和胶状构造,矿体呈透镜状、似层状赋存于白垩系杨冲组的泥质粉砂岩和碳质泥岩中,仑山金矿床的形成分为沉积成矿期和热液成矿期,热液成矿期进一步划分为热液 I 阶段和热液 II 阶段,成矿作用以沉积成矿期和热液 I 阶段为主。

(2) 热液 I 阶段为中高温低盐度的岩浆流体,热液 II 阶段以中低温低盐度的大气降水为主,但不排除有少量岩浆流体。

(3) 沉积成矿期硫来源于三叠系青龙群膏盐层,有机质也参与了仑山金矿沉积成矿期金矿的形成。热液 I 阶段硫来源于沉积成岩阶段黄铁矿的活

化迁移和富集,岩浆也提供了硫。

(4) 热液Ⅱ阶段萤石 Sm-Nd 等时线年龄为 (93.7 ± 3.1) Ma, 代表着仑山金矿床最年轻年龄, 推断主成矿阶段年龄为晚白垩世。仑山金矿床代表着长江中下游成矿带最晚期的成矿作用 (110~90 Ma)。

志 谢 野外工作期间得到江苏省地质矿产勘查局第三地质大队的大力支持和帮助, 室内测试得到中国地质大学(北京) 诸惠燕老师的帮助, 审稿专家对本文提出了许多富贵的修改意见, 大大提高了本文的质量, 在此一并表示衷心感谢!

References

- Bodnar R J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H_2O -NaCl solutions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57 : 683-684.
- Chang Y F, Liu X P, and Wu Y C. 1991. Copper and iron mineralization belt of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River [M]. Beijing : Geological Publishing House. 379p (in Chinese with English abstract).
- Chen J S, Chu X L and Shao M R. 1986. Sulfur isotopes of Triassic sea [J]. *Journal of Earth Science*, 4 : 330-339 (in Chinese with English abstract).
- Clayton R N, O'Neil J R and Mayeda T K. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water [J]. *Journal of Geophysical Research*, 77(17) : 3057-3067.
- Fan Y, Zhou T F, Yuan F, Qian C C, Lu S M and Cooke D. 2008. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the A-type granites in the Lu-Zong (Lujiang-Zongyang) area and their geological significances [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8) : 1715-1724 (in Chinese with English abstract).
- Liu B, and Shen K. 1999. Thermodynamics of fluid inclusion [M]. Beijing : Geological Publishing House. 290p (in Chinese with English abstract).
- Lu B C, Yu J J, Chen C S, Wang T Z, Che L R, Lu Z Y and Yin L Q. 2016. Research on occurrence and enrichment mechanism of gold in the Lunshan gold deposit, Jiangsu Province [J]. *Modern Geology*, 30(2) : 316-327 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Wang Y T, Lehmann B, Yu J J, Du A D, Mei Y X, Li Y F, Zang W S, Stein H J and Zhou T F. 2006. Molybdenite Re-Os and albite ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications [J]. *Ore Geology Reviews*. 29(3) : 307-324.
- Mao J W, Xie G Q, Duan C, Pirajno F, Ishiyama D and Chen Y. 2011. A tectono-genetic model for porphyry-skarn-stratabound Cu-Au-Mo-Fe and magnetite-apatite deposits along the Middle-Lower Yangtze River Valley, eastern China [J]. *Ore Geology Reviews*, 43(1) : 294-314.
- Ning R Z and Chen G S. 1989. REE characteristics of the Yanshanian intrusive rocks in the Ningzhen district [J]. *Geochimica*, 1 : 52-62 (in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H and Goldhaber M B. 1997. Sulfur and carbon isotopes [A]. In : Barnes H L, ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* [C]. 3rd ed. New York : John Wiley and Sons. 517-611.
- O'Neil J R, Clayton R N and Mayeda T K. 1969. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates [J]. *Journal of Chemical Physics*, 51(12) : 5547-5558.
- Tang Y C, Wu Y C, Chu G Z, Xing F M, Wang Y M, Cao F Y and Chang Y F. 1998. Geology of the copper-gold-polymetallic deposit along the Yangtze River, Anhui Province [M]. Beijing : Geological Publishing House. 351p (in Chinese with English abstract).
- Taylor B E. 1986. Magmatic volatiles : Isotopic variation of C, H, and S [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 16 : 185-225.
- Wang F Y, Liu S G, Li S G, Akhtar S and He Y. 2014. Zircon U-Pb ages, Hf-O isotopes and trace elements of Mesozoic high Sr/Y porphyries from Ningzhen, eastern China : Constraints on their petrogenesis, tectonic implications and Cu mineralization [J]. *Lithos*, 200-201 : 299-316.
- Wang X L, Zeng J N, Ma C Q, Li X F, Wu Y F and Lu S F. 2014. Zircon U-Pb dating of Yanshanian intrusive rocks in Ningzhen district, Jiangsu : The chronology evidence for a new stage of petrogenesis and metallogeny in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River [J]. *Earth Science Frontiers*, 21(6) : 289-301 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y X, Yang J D, Wang J M and Yang N Q. 1991. Sm-Nd, Rb-Sr mineralization age and geological significance of the Suzhou Yuliduo polymetallic deposit [J]. *Chinese Science Bulletin*, 17 : 1326-1329 (in Chinese).
- Xia J S. 2000. Preliminary division of granite rock lineage unit in the Ningzhen district [J]. *Jiangsu Geology*, 2 : 81-86 (in Chinese with English abstract).
- Xu J F, Wang Q, Xu Y G, Zhao Z H and Xiong X L. 2001. Geochemistry of Anjishan intermediate-acid intrusive rocks in Ningzhen district : Constraint to origin of the magma with HREE and Y depletion [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4) : 576-584 (in Chinese with English abstract).
- Xu J F, Shinjo R, Defant M J, Wang Q and Rapp R P. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of East China : partial melting of delaminated lower continental crust [J]. *Geology*, 30(12) : 1111-1114.
- Xu X S. 1997. Rock strata in Jiangsu Province [M]. Wuhan : China Univer-

- sity of Geosciences Press. 288p(in Chinese with English abstract).
- Yang Y Z, Chen F k, Siebel W, et al. 2014. Age and composition of Cu-Au related rocks from the lower Yangtze River belt: Constraints on paleo-Pacific slab roll-back beneath eastern China [J]. *Lithos*, 202-203(4): 331-346.
- Yu J J, Chen Y C, Mao J W, Pirajno F and Duan C. 2011. Review of geology, alteration and origin of iron oxide-apatite deposits in the Cretaceous Ningwu volcanic basin, Lower Yangtze River Valley, eastern China: implications for ore genesis and geodynamic setting [J]. *Ore Geology Reviews*, 43: 170-181.
- Zeng J N, Li J W, Chen J H and Lu J P. 2013. SHRIMP Zircon U-Pb dating of Anjishan intrusive rocks and its geological significance in the Ningzhen district, Jiangsu Province [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 38(1): 57-67 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Y S, Yao S Z, Lin X D, Zhou, X R, Wan T F, Jin F Q and Zhou Z G. 1992. Fe-Cu (Au) metallogeny of the Middle-Lower Changjiang region [M]. Beijing: Geological Publishing House. 235p (in Chinese).
- Zhang J J, Wang D H, Liu S B, Chen Z H, Shi G H, Wang J, Wang Y Q and Wei Y W. 2012. Geochronology and isotopic compositions of the Huangbi lead-zinc deposits, Jiangxi, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10): 3325-3333 (in Chinese with English abstract).
- Zhang M C. 2015. Research on mineralization of the Qixiashan lead-zinc-silver polymetallic deposit, Jiangsu province, China (dissertation for doctor degree) [D]. Supervisor: Chen R Y. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). 222p(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y K and Liu C. 1996. The Mesoproterozoic tectonic in the north-eastern margin of Yangtze Block [J]. *Jiangsu Geology*, 20(2): 65-71 (in Chinese with English abstract).
- Zheng H J. 2014. Geological exploration report of Lunshan gold deposit and its peripheral region in the Jurong City, Jiangsu Province [R]. Zhenjiang: No. 3 Geological Brigade, Jiangsu Province Bureau of Geology and Mineral Exploration. Unpublished report. 41p (in Chinese).
- Zhou T F, Fan Y, Yuan F, Zhang L J, Qian B, Ma L, Yang X F and Cooke D R. 2011. Geochronology and significance of volcanic rocks in the Ning-Wu Basin of China [J]. *Science China (Earth Science)*, 54(2): 185-196.
- 4: 330-339.
- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带 [M]. 北京: 地质出版社. 379 页.
- 范裕, 周涛发, 袁峰, 钱存超, 陆三明, David Cooke. 2008. 安徽庐江一枞阳地区 A 型花岗岩的 LA-ICP-MS 定年及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 24(8): 1715-1724.
- 刘斌, 沈昆. 1999. 流体包裹体热力学 [M]. 北京: 地质出版社. 290 页.
- 陆邦成, 余金杰, 陈春生, 王铁柱, 车林睿, 陆振裕, 尹灵强. 2016. 江苏仑山金矿床金的赋存状态和富集机理研究 [J]. *现代地质*, 30(2): 316-327.
- 宁仁祖, 陈根生. 1989. 宁镇地区燕山期侵入岩的稀土元素特征 [J]. *地球化学*, 1: 52-62.
- 唐永成, 吴言昌, 储国正, 邢凤鸣, 王永敏, 曹奋扬, 常印佛. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质 [M]. 北京: 地质出版社. 351 页.
- 王小龙, 曾键年, 马昌前, 李小芳, 吴亚飞, 陆顺富. 2014. 宁镇地区燕山期侵入岩锆石 U-Pb 定年: 长江中下游新一期成岩成矿作用的年代学证据 [J]. *地学前缘*, 21(6): 289-301.
- 王银喜, 杨杰东, 汪建民, 杨年强. 1991. 苏州迁里多金属矿床 Sm-Nd, Rb-Sr 成矿年龄及地质意义 [J]. *科学通报*, 17: 1326-1329.
- 夏嘉生. 2000. 宁镇地区花岗岩类岩石谱系单位的初步划分 [J]. *江苏地质*, 2: 81-86.
- 徐继峰, 王强, 徐义刚, 赵振华, 熊小林. 2001. 宁镇地区中生代安基山中酸性侵入岩的地球化学: 亏损重稀土和钇的岩浆产生的限制 [J]. *岩石学报*, 17(4): 576-584.
- 徐学思. 1997. 江苏省岩石地层 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 288 页.
- 曾键年, 李锦伟, 陈津华, 陆建培. 2013. 宁镇地区安基山侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 38(1): 57-67.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多, 周●若, 万天丰, 金福全, 周宗桂. 1992. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律 [M]. 北京: 地质出版社. 235 页.
- 张家菁, 王登红, 刘善宝, 陈郑辉, 施光海, 王静, 王永庆, 魏英文. 2012. 江西省铅山县篁碧铅锌矿区同位素年代学和稳定同位素组成 [J]. *岩石学报*, 28(10): 3325-3333.
- 张明超. 2015. 江苏栖霞山铅锌银多金属矿床成矿作用研究(博士论文) [D]. 导师: 陈仁义. 北京: 中国地质大学(北京). 222 页.
- 张永康, 刘聪. 1996. 扬子地块东北缘中元古代的大地构造 [J]. *江苏地质*, 20(2): 65-71.
- 郑会俊. 2014. 江苏省句容市仑山金矿详查及外围普查 [R]. 镇江: 江苏省地质矿产勘查局第三地质大队. 内部报告. 41 页.

附中文参考文献

陈锦石, 储雪雷, 邵茂茸. 1986. 三叠纪海的硫同位素 [J]. *地质科学*,