

兰坪盆地科登涧脉状铜矿床地质、地球化学特征

张锦让^{1,2}, 温汉捷², 邹志超³

(1. 中国地质调查局 成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 中国科学院 地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002;
3. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要: 兰坪盆地西缘发育一系列脉状铜矿床, 科登涧铜矿床是其组成之一。该矿床矿体主要产于上三叠统崔依比组(T_3c)中基性火山岩内部的断层破碎带中。热液期成矿作用可大致划分为2个成矿阶段: 主成矿阶段主要发育大量含铜硫化物石英脉, 晚成矿阶段主要发育贫硫化物方解石脉。流体包裹体结果表明, 主成矿期石英和成矿后期石英/方解石中均主要发育两相水溶液包裹体, 含 CO_2 包裹体极少出现。主成矿期石英脉中包裹体均一温度变化幅度较小, 集中在 $180\sim 240^\circ C$, 盐度($NaCl_{eq}$, 质量分数)集中在 $8\%\sim 14\%$ 。成矿流体主要表现为盆地热卤水的特征, 这与兰坪盆地内其它Pb、Zn、Cu等贱金属矿床的成矿流体特征较为一致。成矿流体的 $\delta^{18}O$ 值为 $3.5\%\sim 5.5\%$, δD 值为 $-62\%\sim -38\%$, 介于岩浆水/变质水和大气降水之间。热液硫化物黄铜矿、黄铁矿、斑铜矿的 $\delta^{34}S$ 值显示较低的负值($-20.8\%\sim -9.4\%$), 明显有别于赋矿围岩(安山岩)的 $\delta^{34}S$ 值($11.1\%\sim 11.6\%$), 推测该矿床成矿所需还原硫主要来自于地层硫酸盐。综合分析认为, 该矿床成矿物质主要来源于地层, 成矿流体主要为源于大气降水或建造水的盆地热卤水。

关键词: 地质特征; 地球化学; 科登涧脉状铜矿床; 兰坪盆地

中图分类号: P597⁺.2; P618.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)04-0692-11

Geology and geochemistry of the Kedengjian vein-type copper deposit in western Lanping basin

ZHANG Jin-rang^{1,2}, WEN Han-jie² and ZOU Zhi-chao³

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 3. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: A series of sediments-hosted vein-type copper deposits have been discovered in the western part of the basin. The Kedengjian vein-type copper deposit is one of these deposits in Lanping basin. The Cu mineralization mainly occurs as sulfide-bearing quartz-carbonate veins in faults and fractures, hosted by volcanic rocks of Triassic Cuiyibi Formation (T_3c). Ore-forming process of the Kedengjian copper deposit can be divided into two stages: the major stage (massive polymetallic sulfide quartz vein stage), and the late stage (carbonate-quartz stage). A detailed study of fluid inclusions led to the recognition of two types of fluid inclusions, i.e., aqueous water, and CO_2 - H_2O inclusions, with the aqueous water inclusions being dominant. Total homogenization temperatures range from $180^\circ C$ to $240^\circ C$, with corresponding salinities from 8% to 14% NaCl equivalent. These characteristics of fluid inclusions in the Kedengjian copper deposit are comparable with those of basinal mineralization systems, which formed most Pb-Zn deposits in the Lanping basin. The H, O isotope studies of inclusions

收稿日期: 2015-12-01; 接受日期: 2016-06-06

基金项目: 国家青年科学基金资助项目(41403038); 中国地质调查局资助项目(121201010000150016-05)

作者简介: 张锦让(1985-), 男, 助理研究员, 研究方向: 矿床地球化学研究; E-mail: zhangjinrang123@163.com。

in quartz suggest that the ore-bearing fluid was derived from atmospheric water. The $\delta^{34}\text{S}$ of sulfide minerals are widely variable between -20.8‰ and -9.4‰ , indicating that the sulfur was derived from the sedimentary rocks of the basin. Comprehensive studies indicate that the ore-forming materials originated mainly from sedimentary rocks, and the ore-forming fluids were mainly composed of basinal brines, derived from formation water in strata and meteoric water.

Key words: geology; geochemistry; Kedengjian vein-type copper deposit; Lanping basin

Fund support: National Natural Science Foundation for the Youth (41403038); Project of China Geological Survey (121201010000150016-05)

兰坪盆地位于我国著名的“三江”成矿带的中段,大量发育新生代脉状 Pb、Zn、Cu 等贱金属矿床,主要包括中国最大 Pb-Zn 矿(金顶 Pb-Zn 矿床)、白秧坪 Cu-Ag-Co 多金属矿化区及产出于盆地西缘的一系列脉状 Cu 矿床/点(侯增谦等, 2006; 赵海滨, 2006; He *et al.*, 2009; 宋玉财等, 2011)。

盆地西缘发育大量脉状 Cu 多金属矿床/点,大致沿澜沧江断裂呈带状分布,矿体主要以含铜石英脉的形式产出于围岩裂隙中,赋矿围岩主要为盆地中新生的各类沉积岩,部分产出于中基性火山岩中(李永森, 2002; 侯增谦等, 2006; 刘仕军等, 2014)。科登涧铜矿床是盆地西缘脉状铜成矿带的代表性矿床之一,其在赋矿围岩、热液蚀变等特征上与盆地内其它热液铜矿床存在明显不同,显示出一定的成矿独特性,矿体主要赋存于上三叠统崔依比组(T_3c)中基性火山岩中,矿体受断裂破碎带的控制。开展该矿床成矿学的研究对全面认识兰坪盆地 Pb、Zn、Cu 多金属成矿区的成矿作用具有重要的意义,并有助于本区的找矿勘查工作。

前人对科登涧脉状铜矿床的研究较少,仅刘仕军等(2014)对该矿床进行过矿区地质的描述性研究。本文开展了本矿床矿区地质特征、流体包裹体和稳定同位素的系统研究,初步总结了该矿床成矿流体特征、成矿物质来源等,以期全面揭示该矿床矿床成因提供新的资料。

1 区域地质背景

科登涧铜矿床产出于兰坪盆地西缘,矿体主要产出在上三叠统崔依比组(T_3c)中基性火山岩内的断裂破碎带中。区域上,兰坪盆地位于“三江”特提斯构造域的中段,受到印度板块和欧亚板块长期相互作用的影响,盆地内构造活动复杂,成矿条件十分优越,产出有大量新生代脉状 Pb、Zn、Cu 等贱金属矿

床,成为“三江”Pb、Zn、Cu 多金属成矿带的重要组成部分(图 1, 李文昌等, 2001, 2010; 侯增谦等, 2006)。

兰坪盆地内部主要出露三叠系-古近系碎屑岩、碳酸盐岩,仅在盆地西缘发育少量三叠系中基性火山岩。兰坪盆地经历了复杂的构造演化,三叠纪时期本区表现为大陆裂谷性质,在盆地边缘大量堆积了海相-海陆交互相碎屑岩、碳酸盐岩,局部出现酸性、基性火山岩(薛春纪等, 2002; 李文昌等, 2010)。燕山期受雅鲁藏布江洋快速扩张的影响,本区产生相对拗陷,沉积大量陆相碎屑岩(薛春纪等, 2002)。喜马拉雅期,受到印度板块向欧亚大陆俯冲的影响,位于青藏高原东缘的兰坪盆地构造活动强烈,盆地边缘的中生代地层形成构造岩片,由盆地两侧向中央推覆于古近系地层之上,形成近平行的两个大型逆冲推覆构造,控制着盆地内主要 Pb、Zn、Cu 等贱金属矿床的分布(何龙清等, 2004; 侯增谦等, 2008; He *et al.*, 2009)。受盆地边缘及内部一系列深大断裂长期活动的影响,兰坪盆地的岩浆活动比较强烈。晚古生代的火成岩沿澜沧江断裂呈带状展布,以石炭纪中基性火山岩为主,零星分布于澜沧江东缘的石登、小格拉一带(阙梅英等, 1998; 张成江等, 2000)。印支期盆地边缘发育大量中性喷出岩、火山碎屑岩和中基性火山岩,燕山期盆地边缘则主要发育石英闪长岩、花岗闪长岩(阙梅英等, 1998)。新生代岩浆岩亦主要分布于盆地的边缘,盆地内部只在南部永平、巍山一带出露有少量碱性岩体,时代介于 68~23 Ma 之间,盆地中北部无岩浆岩出露(张成江等, 2000; 董方浏等, 2005)。

2 矿床地质特征

科登涧铜矿床位于兰坪县城北西约 40 km 的营盘镇科登涧村周边,周围已发现有金满、连城、小格

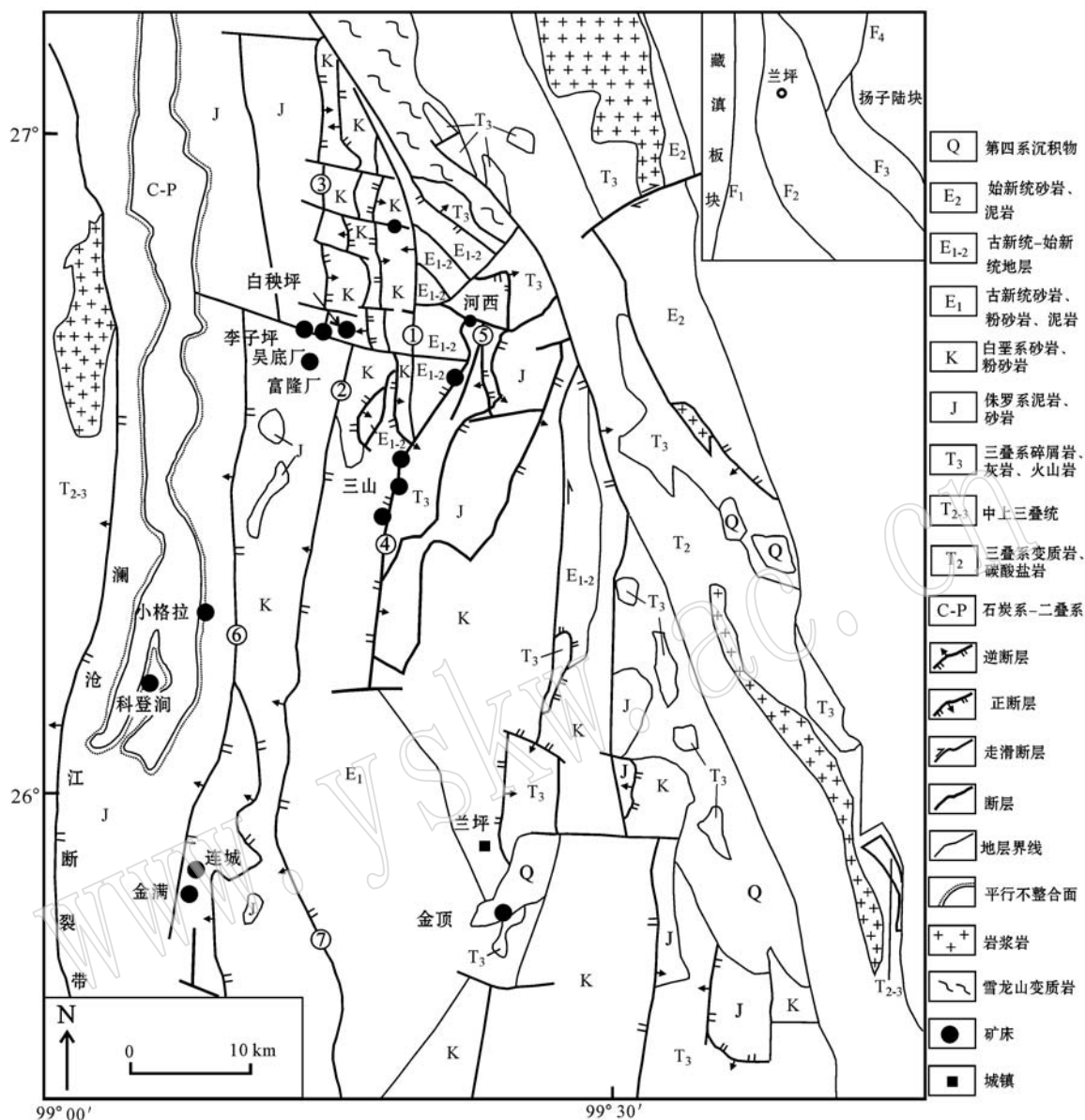


图 1 兰坪盆地北部地质简图及主要矿床分布图(据李峰等,2000)

Fig. 1 Geological map showing distribution of main deposits in northern Lanping basin (modified after Li Feng *et al.*, 2000)

F₁—怒江断裂带; F₂—澜沧江断裂带; F₃—金沙江-哀牢山断裂带; F₄—中甸-剑川断裂带; ①—匡力底断裂;

②—四十里箐断裂; ③—富隆厂断裂; ④—华昌山断裂; ⑤—水磨房断裂; ⑥—营盘断裂(?); ⑦—大山箐断裂

F₁—Nujiang fault zone; F₂—Lancangjiang fault zone; F₃—Jingshajiang-Ailaoshan fault zone; F₄—Zhongdian-Jianchuan fault zone; ①—Kuanglidi fault; ②—Sishiliqing fault; ③—Fulongchang fault; ④—Huachangshan fault; ⑤—Shuimofang fault; ⑥—Yingpan fault (?); ⑦—Dashanqing fault

拉等一系列脉状铜矿床/点。赋矿围岩为上三叠统崔依比组(T_{3c})中基性火山岩,矿体的产出受断裂破碎带控制。该矿床目前正处在勘查阶段,据云南地矿国际矿业公司的勘查资料,该矿床的铜矿资源量属于小型规模,矿体平均品位为2.4%~3.8%(刘仕军等,2014)。

矿区内出露的地层主要有下二叠统拉竹河组(P_{2l})、上三叠统崔依比组(T_{3c})、中侏罗统花开左组(J_{2h})及上侏罗统坝注路组(J_{3b})(图2)。拉竹河组(P_{2l})主要出露于矿区西北侧,大致呈NE向展布,岩性为含凝灰质深灰色板岩。崔依比组(T_{3c})广泛出露于矿区内,是本区主要的赋矿层位,岩性比较复

杂,主要为玄武岩、玄武安山岩、安山岩等中基性火山岩,局部可见少量英安岩、流纹英安岩。岩石热液蚀变强烈,主要发育绿帘石化、硅化、绢云母化、青盘岩化、碳酸盐化等。花开左组上段(J_2h^2)主要出露于矿区的东侧,岩性相对简单,为青灰色、浅灰色含钙质板岩、石英砂岩。该地层是兰坪盆地最重要的铜矿化层位(金满、连城矿床的主要赋矿层位),但在科登洞地区目前尚未发现明显的铜矿化体。花开左组下段(J_2h^1)含砾砂岩、紫红色板岩主要出露于矿区的两侧,与崔依比组的接触关系为角度不整合。坝注路组(J_3b)紫红色板岩、粉砂岩主要出露于矿区东南侧(李永森, 2002; 刘仕军等, 2014)。

矿区内控矿构造以 NE 向断裂构造为主,是矿区内主要控矿断层, F_1 是主要断裂,由一系列近平行的层间压扭性断层组成。破碎带宽 5~12 m,破碎带内充填有大量构造角砾岩、透镜体及含矿热液石英、方解石脉等,表现为构造挤压的特点(刘仕军等, 2014)。

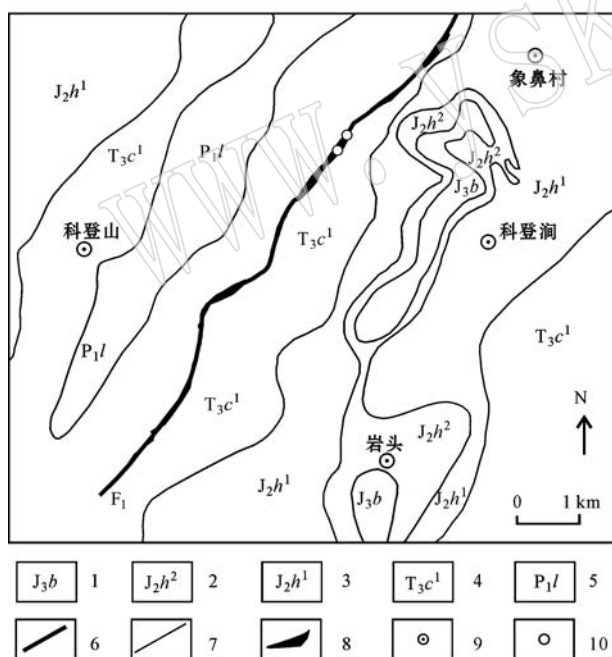


图2 科登洞铜矿床地质简图(据李永森, 2002)

Fig. 2 Geological map of the Kedengjian copper deposit (modified after Li Yongsen, 2002)

1—上侏罗坝注路组绢云母板岩; 2—花开佐组上段砂岩; 3—花开佐组下段钙质板岩; 4—崔依比组下段火山岩; 5—拉竹河组板岩; 6—断层; 7—地层界线; 8—矿体; 9—村庄; 10—采样位置
1—Upper Jurassic Bazhulu Formation argillaceouslastic rock; 2—Upper Huakaizuo Formation sandstone; 3—Lower Huakaizuo Formation Carbonaceous shale/slate; 4—Lower Cuiyibi Formation volcanic rock; 5—Lazhuhe Formation slate; 6—fault; 7—stratigraphic boundary; 8—orebody; 9—village; 10—sampling location

科登洞铜矿床内的矿体赋存于上三叠统崔依比组(T_3c)玄武安山岩、凝灰岩、安山质构造角砾岩中,主要呈带状、透镜状或脉状产出于 F_1 断裂破碎带内,地表主要为氧化矿(图 3a、3b)。围岩蚀变主要有硅化、绢云母化、方解石化、绿泥石化等(图 3a、3b、3e、3f),与成矿关系主为密切的是硅化和方解石化,硅化形成大量含有黄铜矿、斑铜矿等硫化物的热液石英脉(图 3a、3b、3c、3d)。方解石化明显具有多期次性的特点,主成矿期方解石多与石英共生,其中多伴生有铜的矿化。矿石矿物以斑铜矿、黄铜矿为主,含少量辉铜矿,其它金属矿物主要为黄铁矿(图 3d),地表主要形成铜的氧化物,主要为孔雀石、蓝铜矿。脉石矿物主要有石英、方解石、绢云母、绿泥石、重晶石等。矿石构造主要有浸染状、块状、角砾状、脉状构造等,结构以充填及自形-半自形粒状结构为主。根据矿脉穿插关系,可将科登洞铜矿床热液期成矿作用划分为 2 个成矿阶段,即早期的石英-多金属硫化物阶段(主要形成含硫化石英-方解石脉)和碳酸盐阶段(主要形成不含矿方解石脉)。

3 流体包裹体地球化学

前人(李峰等, 2000; 徐晓春等, 2005; Chi and Xue, 2011)对兰坪盆地 Pb、Zn、Cu 等贱金属矿床开展过很多流体包裹体的研究工作,但对科登洞铜矿床流体包裹体特征仅做过少量零星的工作,研究不够系统。本次,笔者在总结前人数据的基础上,重点补充了该矿床主成矿阶段石英中流体包裹体的研究工作。流体包裹体的岩相观察和测温工作均在中国科学院矿床地球化学国家重点实验室的流体包裹体室完成。测试仪器为 Linkam THMSG 600 型的冷热台,仪器的测温范围为 $-196 \sim +600^\circ\text{C}$,测温数据的精度为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ (Su *et al.*, 2009)。

3.1 流体包裹体岩相学特征

主成矿阶段石英中流体包裹体较为发育,主要为水溶液两相包裹体,多呈面状或孤立状产出(图 4a、4b、4c),局部呈带状产出于石英微裂隙(多为次生包裹体,测温过程中应予以剔除,图 4d),大小为 $6 \sim 30 \mu\text{m}$,形态主要为椭圆形和不规则形等,包裹体充填度多在 80% 以上。成矿晚期方解石中流体包裹体相对较少,也主要以水溶液两相包裹体为主,多沿方解石解理及微裂隙呈线状分布,包裹体大小一般小于 $10 \mu\text{m}$,包裹体形态多样。

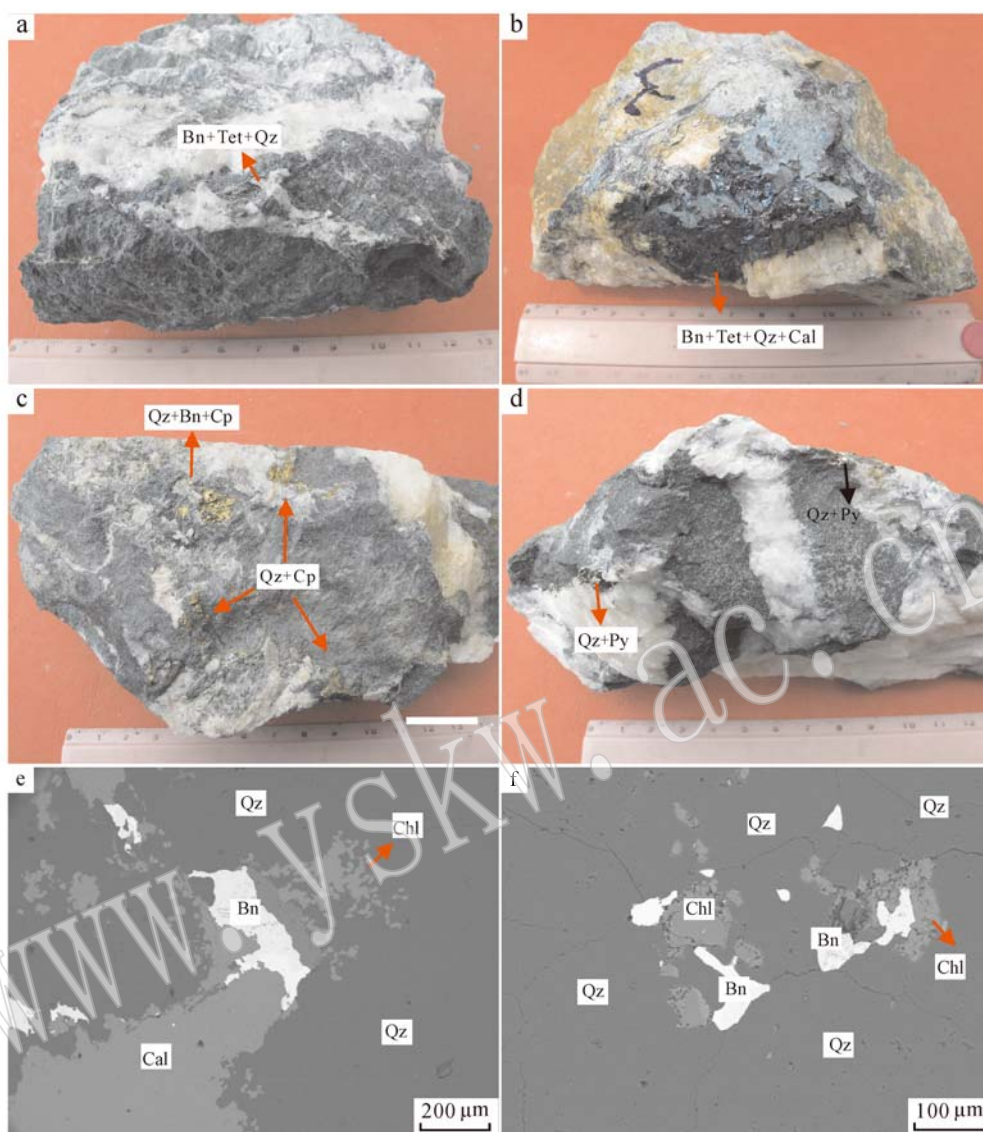


图 3 科登涧铜矿床矿物组合手标本及镜下照片

Fig. 3 Scanned images of ores and photomicrographs showing relationships of hydrothermal minerals in the Kedengjian deposit
a—含斑铜矿、黝铜矿石英网脉充填于绿泥石化安山岩中；b—大脉状含斑铜矿、黝铜矿石英脉；c—含斑铜矿、黄铜矿石英脉；d—含自形黄铁矿石英脉；e—含斑铜矿石英-方解石脉，可见绿泥石化；f—含斑铜矿石英-方解石脉，可见绿泥石化；Qz—石英；Chl—绿泥石；Bn—斑铜矿；Cp—黄铜矿；Py—黄铁矿；Tet—黝铜矿

a—bornite-bearing quartz and calcite veins filling chlorite andesite; b—bornite-bearing quartz vein; c. bornite and chalcopyrite-bearing quartz vein; d—pyrite-bearing quartz vein; e—back-scattered electron (BSE) image of bornite-bearing quartz and calcite vein, with chlorite; f—back-scattered electron (BSE) image of bornite-bearing quartz and calcite vein, with chlorite; Qz—quartz; Cal—calcite; Bn—bornite; Cp—chalcopyrite; Py—pyrite; Tet—tetrahedrite

3.2 流体包裹体显微测温结果

选取的科登涧铜矿床不同阶段石英中存在大量的包裹体，既有原生成因，又有次生成因，次生包裹体多沿矿物裂隙成线状分布，形态多不规则，本次研究中予以剔除。主成矿期石英中主要发育水溶液包裹体，根据测得的冰点温度，在 Bodnar(1993)给出的冰点与盐度关系表上查得水溶液包裹体的盐度。流

体包裹体多完全均一至液相，均一温度为 $135 \sim 235^{\circ}\text{C}$ ，集中在 $180 \sim 240^{\circ}\text{C}$ ，对应的盐度 (NaCl_{eq} ，质量分数，下同) 为 $2.1\% \sim 13.1\%$ ，集中在 $8\% \sim 14\%$ 。成矿晚期方解石中亦仅发育水溶液两相包裹体，均一温度为 $120 \sim 185^{\circ}\text{C}$ ，对应的盐度为 $2.1\% \sim 7.8\%$ 。测温结果表明(图 5)，从主成矿阶段到成矿晚阶段，流体包裹体类型变化不大，均以水溶液包裹

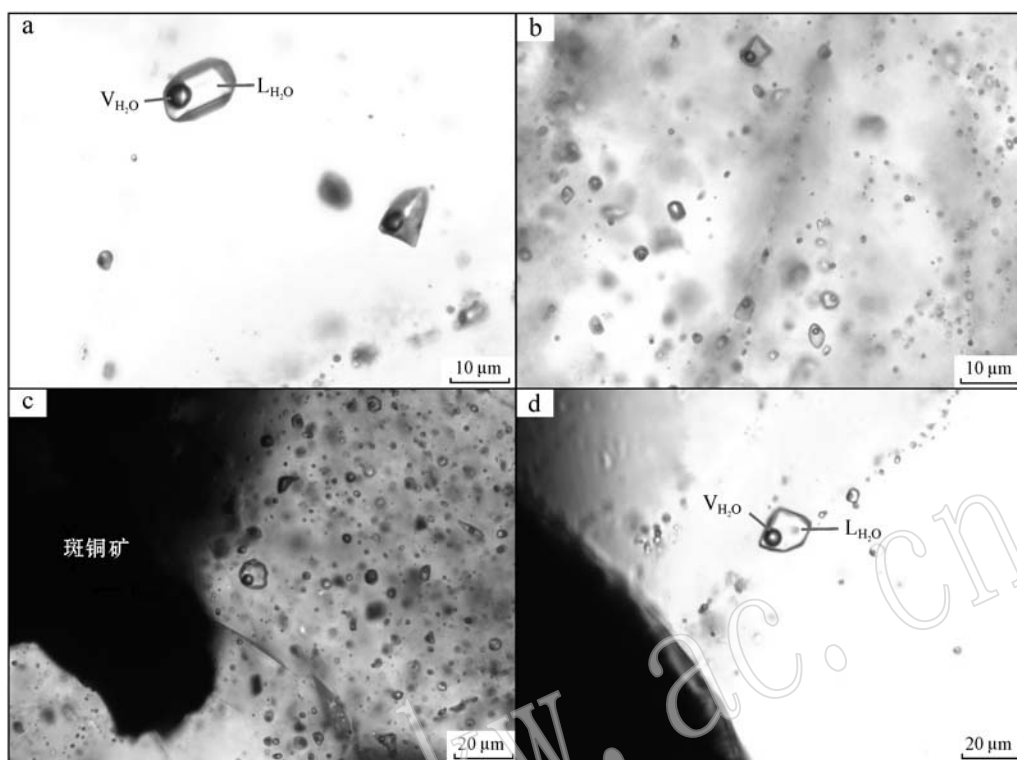


图4 科登涧铜矿床包裹体照片

Fig. 4 Photomicrographs of fluid inclusion at 25°C in the Kedengjian copper deposit

a、b—水溶液包裹体分布在石英颗粒中；c—水溶液包裹体群分布在与黄铜矿密切共生的石英颗粒中；d—水溶液包裹体群分布在石英颗粒中

a、b—aqueous water inclusions occurring in quartz；c—aqueous water inclusions occurring within a small area adjacent to chalcopyrite；

d—aqueous water inclusions occurring in quartz

体为主,均一温度和盐度则都明显降低,晚期主要显示出大气降水的特征。

4 稳定同位素地球化学

4.1 样品及测试方法

H、O 同位素分析样品均采自主成矿阶段含黄铜矿、斑铜矿石英脉；S 同位素分析选择主成矿阶段黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿样品。采用常规分选方法,在双目显微镜下人工反复挑选,直至样品纯度达到 98% 以上。在中国地质科学院矿产资源研究所完成 H、O 同位素测试工作,测试仪器为 MAT-253 稳定同位素质谱仪。H 同位素测试流程如下:首先采用爆裂法将流体包裹体中的水释放出来,然后在 400°C 的金属锌炉中使其与锌反应产生 H₂ 气体,然后采用液氮冷冻,最后将其收集到装有活性炭的样品管中。O 同位素分析样品的制备采用 BrF₅ 方法,详细的测试过程参考 Tian 等(2006)。数据的 δ¹⁸O 和 δD 均采

用 SMOW 做为相对标准,O 同位素的分析误差为 ± 0.2‰,H 同位素误差为 ± 2‰。根据测得的石英样品的 δ¹⁸O 值,结合测得的包裹体温度,根据石英-水体系的 O 同位素分馏方程($1000 \ln \alpha_{Q-H_2O} = 3.38 \times 10^6 / T^2 - 2.90$, Friedman *et al.*, 1977),计算得到成矿流体的 δ¹⁸O 流体。S 同位素测试工作在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室完成。分析测试采用连续硫同位素质谱仪 CF-IRMS (EA-IsoPrime Euro3000, GV instruments) 配备 Elemental Analyzer 进样器完成,S 同位素的相对标准为 CDT,测试误差为 ± 0.2‰。具体的测试流程如下:在玛瑙钵中将待测硫化物样品研磨至 200 目以下,加入相应比例的 CuO 混合后装入容器中,然后将其置于马弗炉内,加热至 1000°C,保持 15 min 以上,将矿物中的 S 氧化成 SO₂。

4.2 H、O 同位素组成特征

前人资料及本次测得的数据列于表 1,科登涧铜矿床主成矿期成矿流体的 δD 值变化范围相对较小,

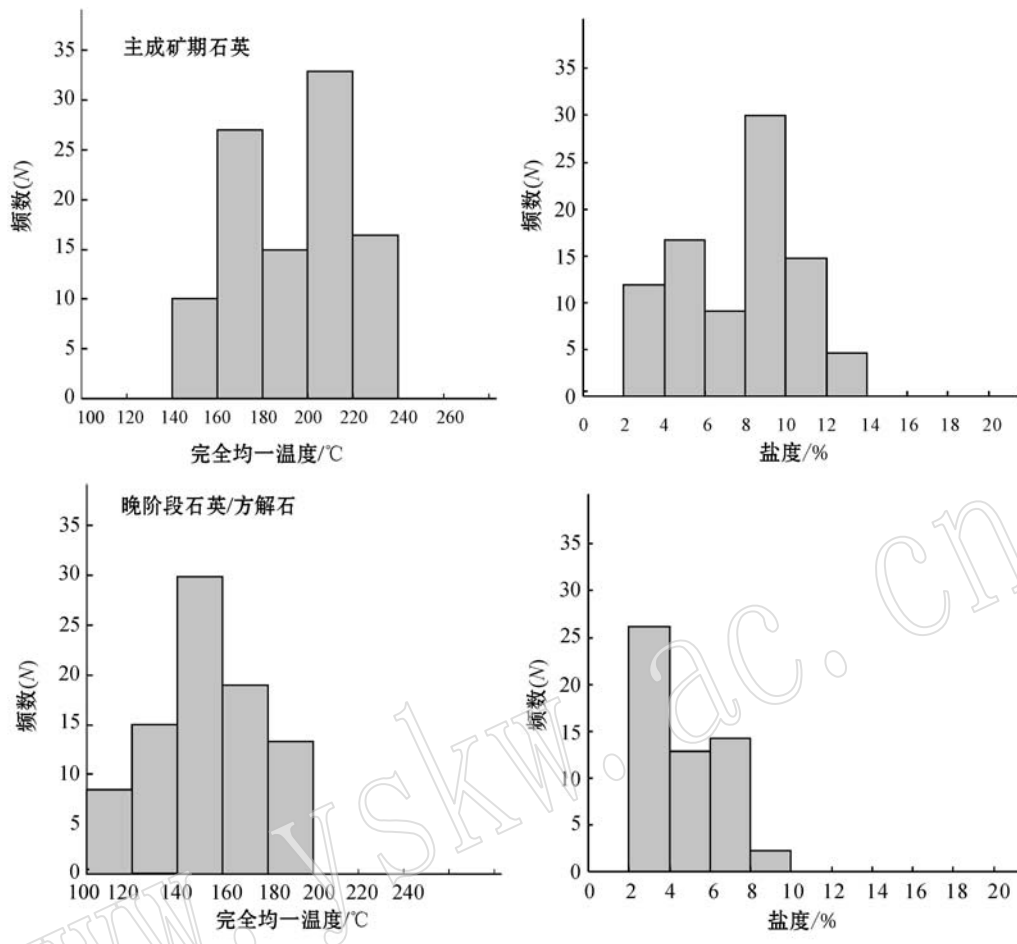


图 5 科登涧铜矿床流体包裹体均一温度及盐度图解

Fig. 5 Histograms of microthermometric data of fluid inclusions from the Kedengjian copper deposit

表 1 科登涧铜矿床 H、O 同位素数据

Table 1 Hydrogen and oxygen isotopic compositions of fluid inclusions from the Kedengjian copper deposit

样品 编号	分析 矿物	$\delta^{18}\text{O}_{\text{矿物}}/\text{‰}$	$\delta\text{D}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{流体}}/\text{‰}$	资料 来源
Hb-13	石英	18.1	-56	5.9	本文
Hb-14	石英	17.7	-47	5.5	
Hb-16	石英	17.4	-38	5.2	
KDJ2-0	石英	15.8	-62	3.7	李永森, 2002
KDJ2-5	石英	15.7	-58	3.6	

介于 $-62\text{‰} \sim -38\text{‰}$ (平均 -52‰) 之间; 对应的流体 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $3.5\text{‰} \sim 5.5\text{‰}$ (本文数据根据包裹体测温结果, 取温度为 220°C)。

在 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 关系图(图 6)中, H、O 同位素数据点大多落在变质水、岩浆水左侧和大气降水之间的区域。其 H、O 同位素组成整体上显示出变质水和建造水的特征。

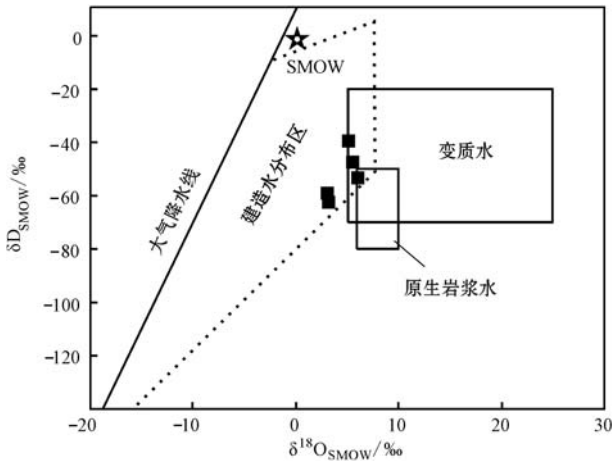


图 6 科登涧铜矿床 H、O 同位素组成图解
(底图据郑永飞等, 2000)

Fig. 6 Hydrogen and oxygen isotopic composition of the Kedengjian copper deposit(after Zheng Yongfei et al., 2000)

4.3 S 同位素组成特征

硫同位素分析结果列于表 2, 矿体中黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-20.8\text{‰} \sim -9.4\text{‰}$, 斑铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值与黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值较为一致, 为 $-17.3\text{‰} \sim -9.7\text{‰}$, 黄

铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -18.3‰ , 矿石中硫位素分馏未达到平衡(Ohmoto, 1972; 郑永飞等, 2000)。赋矿火山岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值表现出较大的正值, 为 $11.1\text{‰} \sim 11.6\text{‰}$, 明显不同于硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值。

表 2 科登涧铜矿床 S 同位素数据

Table 2 Sulfur isotopic compositions of the Kedengjian copper deposit

样品编号	测试矿物	采样位置	样品描述	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	来源
HB-12	斑铜矿	民采洞口	含斑铜矿石英脉	-14.4	本文
HB-14	斑铜矿	民采洞口	含斑铜矿石英脉	-10.2	
HB-15	斑铜矿	民采洞口	含斑铜矿石英脉	-9.7	
HB-18	斑铜矿	民采洞口	含斑铜矿石英脉	-10.1	
HB-19	黄铜矿	民采洞口	含黄铜矿石英脉	-9.4	
HB-23	斑铜矿	民采洞口	细粒黄铜矿集合体	-15.0	
HB-25	黄铜矿	民采洞口	细粒黄铜矿集合体	-14.9	
科登涧 1-4	安山岩全岩	矿区内	块状	11.6	李永森, 2002
科登涧 1-2	安山岩全岩	矿区内	块状	11.1	
科登涧 2-0	斑铜矿	民采洞口	含斑铜矿石英脉	-17.3	
科登涧 2-0	黄铁矿	民采洞口	含黄铁矿石英脉	-18.3	
科登涧 2-5	黄铜矿	民采洞口	含黄铜矿石英脉	-20.8	

综合本次分析结果及前人部分硫同位素数据, 绘制硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值频率直方图(图 7)。如图 7 所示, 科登涧铜矿床硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值则显示较低的负值($-20.8\text{‰} \sim -9.4\text{‰}$), 且跨度相对较大。

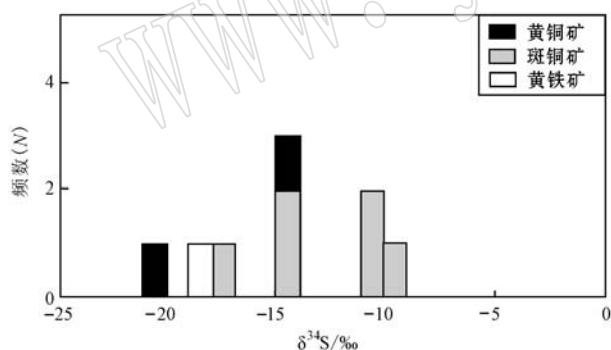


图 7 科登涧铜矿床 S 同位素组成图解

Fig. 7 Sulfur isotopic composition of the Kedengjian copper deposit

5 讨论

许多地质学家曾对兰坪盆地 Pb、Zn、Cu 等贱金属矿床的成矿流体进行过研究, 积累了大量的数据。整体上, 兰坪盆地 Pb-Zn 多金属矿床成矿流体普遍具有中低温(集中在 $160 \sim 240^\circ\text{C}$)、中高盐度(集中在 $9.4\% \sim 20.8\%$ 之间)、贫 CO_2 等挥发分的特征, 属于

$\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ 体系(温春齐等, 1995; 徐启东等, 2003; 何明勤等, 2004; 卢焕章等, 2004; 徐晓春等, 2005; 薛伟等, 2010)。结合 C、H、O 等同位素的特征表明, 前人普遍认为, 兰坪盆地 Pb、Zn、Cu 等贱金属矿床的成矿流体主要是源于大气降水的盆地卤水体系(刘建明, 2000; 刘家军等, 2000; Xue *et al.*, 2006, 2007; He *et al.*, 2009)。近年来, 前人及笔者的研究表明, 兰坪盆地西缘的脉状 Cu 多金属矿床(以金满、连城矿床为代表)成矿早、中阶段, 出现大量富 CO_2 包裹体, 成矿流体整体上具有中高温(集中在 $280 \sim 340^\circ\text{C}$)、中低盐度(集中在 $1\% \sim 4\%$ 之间)、富 CO_2 等挥发分的特征, 这在整个兰坪盆地是十分罕见的, 不属于典型的盆地流体系统(Chi and Xue, 2011; 张锦让等, 2015)。

本次科登涧脉状铜矿床的流体包裹体研究表明, 主成矿阶段石英脉中包裹体类型较为简单, 主要发育大量水溶液包裹体, 含 CO_2 包裹体极少出现, 显著有别于区域上的金满、连城等铜矿床。流体包裹体均一温度集中在 $180 \sim 240^\circ\text{C}$, 盐度集中在 $8\% \sim 14\%$ 。总体上, 科登涧脉状铜矿床成矿流体以中低温、中高盐度、贫 CO_2 包裹体为特征, 与盆地内 Pb-Zn 多金属矿床成矿流体较为一致(Xue *et al.*, 2007; Chi and Xue, 2011)。

在盐度-均一温度图解(图 8)中, 流体包裹体数据大致呈出一定的线性关系, 显示出低温、低盐度流体

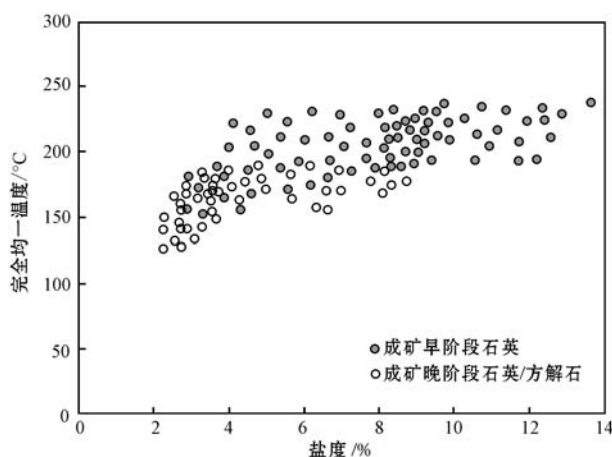


图8 包裹体均一温度对盐度图解

Fig. 8 Plot of homogenization temperature (T_h) versus salinity in the ore deposits within western Lanping basin

和中低温、中等盐度流体混合的结果。和兰坪盆地典型的盆地热卤水(均一温度集中在 $160\sim 250^{\circ}\text{C}$, 盐度集中在 $9\%\sim 22\%$; Xue *et al.*, 2006, 2007; Chi and Xue, 2011)相比, 均一温度相差不大, 盐度却略低, 故笔者认为科登涧铜矿床成矿流体可能主要为盆地卤水, 晚期可能有大气降水的加入。

前人研究表明, H、O 同位素是示踪成矿流体中 H_2O 来源的最常用的手段之一(郑永飞等, 2000)。在 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 关系图(图6)中, 数据点大多落在变质水、岩浆水左侧和大气降水之间的区域, 少量数据落在变质水的区域。考虑到本矿床矿体主要产于中基性火山岩中, 笔者推测科登涧铜矿床成矿流体应该是一种和围岩成分充分交换的大气降水或盆地建造水。其 O 同位素组成的特点, 可能是流体与火山岩发生充分反应和成分交换的结果。

综合流体包裹体及 H、O 同位素特征, 笔者认为, 科登涧铜矿床成矿流体主要为源于大气降水或建造水的盆地热卤水。

科登涧铜矿床的硫化物以黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿为主, 硫酸盐矿物较少出现, 认为硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值可以近似代表成矿流体的硫同位素组成。如表2所示, 黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值均显示出明显的负值, 且变化范围较大, 与赋矿围岩(安山岩全岩)的硫同位素组成明显不同, 可以排除赋矿火山岩为成矿提供主要硫源的可能。推测成矿过程中所需的还原性硫(H_2S)主要来自于盆地地层中的

硫酸盐, 与岩浆岩的关系不大, 这一结论与前人铅同位素的研究成果较为一致(李永森, 2002)。

研究表明, 硫酸盐还原机制主要有热化学还原作用及生物还原作用, 其中生物还原作用要求温度较低($50\sim 70^{\circ}\text{C}$), 热化学还原作用要求温度较高, 达到 150°C 以上(郑永飞等, 2000)。前人研究也表明, 在科登涧铜矿床围边的金满等脉状铜矿床的形成过程中有机质发挥了积极作用。刘家军等(2001)发现金满铜矿中存在由黄铁矿、黄铜矿和斑铜矿组成的木质结构, 并指出, 这些木质结构表明有机质对金满铜矿的形成起了相当重要的作用。

科登涧铜矿床主成矿阶段石英中流体包裹体的均一温度集中在 $180\sim 240^{\circ}\text{C}$, 成矿流体温度相对较高, 推测该矿床硫酸盐还原的机制应可能主要是有机质参与的热化学还原作用, 但是 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布范围较广的特征暗示生物还原也起到了很大的作用。

综上所述, 科登涧铜矿床成矿流体整体上显示出中低温、中低盐度、贫 CO_2 的特征, 成矿流体主要为源于大气降水或建造水的盆地热卤水, 成矿物质主要来源于盆地地层沉积岩, 成矿与火山岩的关系可能不大。成矿与构造关系较为密切, 矿区内的断裂应是主要的赋矿空间, 也是含矿热液理想的通道, 该矿床应该属于与构造有关的热液脉型铜矿床。

6 结论

(1) 科登涧脉状铜矿床主成矿阶段石英脉中包裹体类型较为简单, 主要发育大量水溶液包裹体, 含 CO_2 包裹体极少出现。流体包裹体均一温度集中在 $180\sim 220^{\circ}\text{C}$, 盐度集中在 $4\%\sim 8\%$ 。总体上, 科登涧脉状铜矿床成矿流体以中低温、中高盐度、贫 CO_2 包裹体为特征。晚成矿阶段均一温度和盐度则都明显降低, 显示出大气降水的特征。

(2) 综合流体包裹体地球化学以及 H、O、S 同位素的研究成果, 推测科登涧铜矿床成矿流体主要为源于大气降水或建造水的盆地热卤水, 成矿物质主要来源于盆地地层沉积岩, 成矿与火山岩的关系不大。

致谢 在云南野外地质考察, 得到了兰坪县三江铜业有限责任公司的大力支持, 在此表示衷心感谢。

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.
- Chi Guoxiang and Xue Chunji. 2011. Abundance of CO_2 -rich fluid inclusions in a sedimentary basin-hosted Cu deposit at Jinman, Yunnan, China: Implications for mineralization environment and classification of the deposit[J]. *Mineralium Deposita*, 46: 365~380.
- Dong Fangliu, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, *et al.* 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of Himalayan alkaline rocks in the Lanping basin, Yunnan and their geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(2): 103~109(in Chinese with English abstract).
- Friedman I and O'Neil J R. 1977. Compilation of Stable Isotope Fractionation Factors of Geochemical Interest[M]. US Geol. Survey Prof. Paper, 440 kk.
- He Longqing, Chen Kaixu and Yu Fengming. 2004. Nappe tectonics and their ore-controlling of Lanping basin in Yunnan province[J]. *Geology and Prospecting*, 40 (4): 7~12(in Chinese with English abstract).
- He Longqing, Song Yucai, Chen Kaixu, *et al.* 2009. Thrust-controlled, sediment-hosted, Himalayan Zn-Pb-Cu-Ag deposits in the Lanping foreland fold belt, eastern margin of Tibetan Plateau[J]. *Ore Geology Reviews*, 36: 106~132.
- He Mingqin, Liu Jiajun and Li Chaoyang. 2004. Mechanism of Ore-Forming Fluids of the Lanping Pb-Zn-Cu Polymetallic Mineralized Concentration Area—An Example Study on the Baiyangping Ore District[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Pan Guitang, Wang Anjian, *et al.* 2006. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(5): 521~543(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Song Yucai, Li Zheng, *et al.* 2008. Thrust-controlled, sediments-hosted Pb-Zn-Ag-Cu deposits in eastern and northern margins of Tibetan orogenic belt: Geological features and tectonic model[J]. *Mineral Deposits*, 27(2): 123~144(in Chinese with English abstract).
- Li Feng and Fu Weimin. 2000. Geology of Red Bed Copper Deposits in Western Yunnan[M]. Kunming: Yunnan University Press(in Chinese with English abstract).
- Li Wenchang and Mo Xuanxue. 2001. The Cenozoic tectonics and metallogenesis in "Three-River" area of Southwest China[J]. *Yunnan Geology*, 20 (4): 333~346(in Chinese with English abstract).
- Li Wenchang, Pan Guitang, Hou Zengqian, *et al.* 2010. The Mineralization Theories and Techniques to the Arc-basin System of "Three-River" area of Southwest China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Li Yongsan. 2002. The Geochemical Studies on Copper Polymetallic Deposits of Middle-southern Part of Lanchangjiang[D]. Hefei: Hefei University of Technology(in Chinese with English abstract).
- Liu Jiajun, Li Chaoyang, Pan Jiayong, *et al.* 2000. Isotopic geochemistry of copper deposits from sandstone and shale of Lanping-Simao Basin, western Yunnan[J]. *Mineral Deposits*, 19 (3): 223~234(in Chinese with English abstract).
- Liu Jiajun, Li Chaoyang, Zhang Qian, *et al.* 2001. Wood textures in the Jinman Cu deposit in western Yunnan and their significance for ore genesis[J]. *Sciences China (Series D)*, 31 (2): 89~95(in Chinese with English abstract).
- Liu Jianming. 2000. Dynamics of sedimentary basins and basin-fluid related ore-forming[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 19 (2): 76~84(in Chinese with English abstract).
- Liu Shijun and Zhou Kuiwu. 2014. Kedengian Cu deposit of structure hydrothermal type in Lanping, Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 33 (1): 51~54(in Chinese with English abstract).
- Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, *et al.* 2004. Fluid Inclusions [M]. Beijing: Science Press(in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 67: 551~578.
- Que Meiyang, Cheng Dunmo, Zhang Lisheng, *et al.* 1998. Copper Deposits in Lanping-Simao Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Song Yucai, Hou Zengqian, Yang Tiannan, *et al.* 2011. Sediment hosted Himalayan base metal deposits in Sanjiang region: characteristics and genetic types[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30 (3): 355~380(in Chinese with English abstract).
- Su Wenchao, Heinrich C A, Pettke T, *et al.* 2009. Sediment-hosted gold deposits in Guizhou, China: products of wall-rock sulfidation by deep crustal fluids[J]. *Economic Geology*, 104: 73~93.
- Tian Shihong, Ding Tiping, Mao Jingwen, *et al.* 2006. S, C, O, H isotope data and noble gas studies of the Maoniuping LREE deposit, Sichuan province, China: a mantle connection for mineralization [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80: 540~549.
- Wen Chunqi, Cai Jianming, Liu Wenzhou, *et al.* 1995. Geochemical characteristics of fluid inclusion in the Jinding lead-zinc deposit, Yunnan, China[J]. *Mineral Petrol.*, 15(4): 78~84(in Chinese with English abstract).
- Xu Qidong and Li Jianwei. 2003. Ore-forming fluid migration in relation to mineralization zoning in Cu-polymetallic mineralization district of northern Lanping, Yunnan: Evidence from fluid inclusions and stable isotopes[J]. *Mineral Deposits*, 22 (4): 365~376(in Chinese with English abstract).

- Xu Xiaochun, Xie Qiaolin, Lu Sanming, *et al.* 2005. Fluid inclusion characteristics of copper deposits on the western border of Lanping basin, Yunnan Province[J]. *Acta Mineral Sinica*, 25 (2): 170~176(in Chinese with English abstract).
- Xue Chunji, Chen Yuchuan, Yang Jianmin, *et al.* 2002. Analysis of ore-forming background and tectonic system of Lanping basin, Western Yunnan Province[J]. *Mineral Deposits*, 21 (1): 36~44 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chunji, Chi Guoxiang, Chen Yuchuan, *et al.* 2006. Two fluid systems in the Lanping basin, Yunnan, China-their interaction and implications for mineralization[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 89: 436~439.
- Xue Chunji, Zeng Rong, Liu Shuwen, *et al.* 2007. Geologic, fluid inclusion and isotopic characteristics of the Jinding Zn-Pb deposit, western Yunnan, South China: a review[J]. *Ore Geology Reviews*, 31: 337~359.
- Xue Wei, Xue Chunji, Chi Guoxiang, *et al.* 2010. Study on the fluid inclusions of Baiyangping poly-metallic deposit in Lanping Basin, northwestern Yunnan, China[J]. *Acta Petrol. Sinica*, 26 (6): 1773~1784(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengjiang, Ni Shijun, Teng Yanguo, *et al.* 2000. Relationship between Himalayan tectono-magmatic activity and mineralization in the Lanping Basin[J]. *Mineral Petrol.*, 20 (2): 35~39(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinrang, Wen Hanjie, Qiu Yuzhuo, *et al.* 2015. Characteristics of ore-forming fluids of Cu-Ag ($\pm$ Pb-Zn) polymetallic deposits in western Lanping Basin, Yunnan Province[J]. *Mineral Deposits*, 34 (3): 497~520(in Chinese with English abstract).
- Zhao Haibin. 2006. Study on the Characteristics and Metallogenic Conditions of Copper-polymetallic Deposits in Middle-northern Lanping basin, Western Yunnan[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei and Chen Jiangfeng. 2000. Stable Isotope Geochemistry [M]. Beijing: Science Press(in Chinese with English abstract).
- 董方浏, 莫宣学, 侯增谦, 等. 2005. 云南兰坪盆地喜马拉雅期碱性岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 24(2): 103~109.
- 何龙清, 陈开旭, 余凤鸣. 2004. 云南兰坪盆地推覆构造及其控矿作用[J]. *地质与勘探*, 40(4): 7~12.
- 何明勤, 刘家军, 李朝阳. 2004. 兰坪盆地铅锌铜大型矿集区的流体成矿作用机制——以白秧坪铜钴多金属地区为例[M]. 北京: 地质出版社.
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 等. 2006. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用[J]. *矿床地质*, 25(5): 521~543.
- 侯增谦, 宋玉财, 李政, 等. 2008. 青藏高原碰撞造山带 Pb-Zn-Ag 矿床新类型: 成矿基本特征与构造控矿模型[J]. *矿床地质*, 27 (2): 123~144.
- 李峰, 甫为民. 2000. 滇西红层铜矿地质[M]. 昆明: 云南大学出版社.
- 李文昌, 莫宣学. 2001. 西南“三江”地区新生代构造及其成矿作用[J]. *云南地质*, 20(4): 333~346.
- 李文昌, 潘桂棠, 侯增谦, 等. 2010. 西南三江多岛弧盆-碰撞造山成矿理论与勘查技术[M]. 北京: 地质出版社.
- 李永森. 2002. 云南澜沧江中南段铜多金属矿床地球化学研究[D]. 安徽: 合肥工业大学.
- 刘仕军, 周癸武. 2014. 云南兰坪科登沟构造热液型铜多金属矿[J]. *云南地质*, 33(1): 51~54.
- 刘家军, 李朝阳, 潘家永, 等. 2000. 兰坪-思茅盆地砂页岩中铜矿床同位素地球化学[J]. *矿床地质*, 19(3): 223~234.
- 刘家军, 李朝阳, 张乾, 等. 2001. 滇西金满铜矿床中木质结构及其成因意义[J]. *中国科学(D辑)*, 31(2): 89~95.
- 刘建明. 2000. 沉积盆地动力学与盆地流体成矿[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 19(2): 76~84.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 2004. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社.
- 阙梅英, 程敦揆, 张立生, 等. 1998. 兰坪-思茅盆地铜矿床[M]. 北京: 地质出版社.
- 宋玉财, 侯增谦, 杨天南, 等. 2011. 三江喜马拉雅期沉积岩容矿贱金属矿床基本特征与成因类型[J]. *岩石矿物学杂志*, 30(3): 355~380.
- 温春齐, 蔡建明, 刘文周, 等. 1995. 金顶铅锌矿床流体包裹体地球化学特征[J]. *矿物岩石*, 15(4): 78~84.
- 徐启东, 李建威. 2003. 云南兰坪北部铜多金属矿化区成矿流体与矿化分带——流体包裹体和稳定同位素证据[J]. *矿床地质*, 22 (4): 365~376.
- 徐晓春, 谢巧勤, 陆三明, 等. 2005. 制滇西兰坪盆地西缘铜矿床矿物流体包裹体研究[J]. *矿物学报*, 25(2): 170~176.
- 薛春纪, 陈毓川, 杨建民, 等. 2002. 滇西兰坪盆地构造体制和成矿背景分析[J]. *矿床地质*, 21(1): 36~45.
- 薛伟, 薛春纪, 池国祥, 等. 2010. 滇西北兰坪盆地白秧坪多金属矿床流体包裹体研究[J]. *岩石学报*, 26(6): 1773~1784.
- 张成江, 倪师军, 滕彦国, 等. 2000. 兰坪盆地喜马拉雅期构造-岩浆活动与流体成矿的关系[J]. *矿物岩石*, 20 (2): 35~39.
- 张锦让, 温汉捷, 裘愉卓, 等. 2015. 兰坪盆地西缘沉积岩容矿脉状 Cu-Ag ($\pm$ Pb-Zn) 多金属矿床成矿流体特征[J]. *矿床地质*, 34 (3): 497~520.
- 赵海滨. 2006. 滇西兰坪盆地中北部铜多金属矿床成矿地质特征及地质条件[D]. 北京: 中国地质大学.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.

附中文参考文献