文章编号:0258-7106 (2007) 06-0597-12

安徽和县香泉独立铊矿床的地质地球化学特征及成因探讨*

范 裕[1],周涛发[1],袁 峰[1],张千明[2],吴明安[3],侯明金[3],胡清华[2]
(1 合肥工业大学资源与环境工程学院,安徽 合肥 230009; 2 安徽省地矿局 327 地质队,安徽 合肥 230001;
3 安徽省地质调查院,安徽 合肥 230001)

摘 要 安徽和县香泉铊矿床位于长江中下游成矿带北侧的皖东地区,是目前为止发现的罕见独立铊矿床。和县地区位于扬子板块、华北板块和大别造山带之间的过渡带,区内无岩浆岩出露。矿床的赋矿围岩为奥陶系下统仑山组微晶灰岩、泥灰岩和泥岩,主要控矿构造为断裂和褶皱。矿床主要由一个矿体组成,矿体总体上为似层状和透镜状,分布与地层走向大体一致。矿床中铊高度富集,黄铁矿是铊的主要载体矿物,铊主要以类质同象形式替代铁进入黄铁矿晶格,其次以纳米级、次纳米级铊矿物颗粒形式产出。矿床的围岩主要蚀变类型有萤石化、重晶石化、硅化和碳酸盐化等。矿床的地质地球化学特征研究表明,铊矿床的形成经历了两个成矿期,即海底热水沉积成矿期和低温热液改造成矿期。奥陶纪海底热水形成含铊黄铁矿建造,早白垩纪低温成矿流体对黄铁矿建造进行叠加改造,并使铊进一步活化富集。香泉铊矿床的发现和研究表明,分散元素铊不仅可以富集形成伴生型多元素矿床,还可以形成单一元素的独立铊矿床。

关键词 地质学;铊;黄铁矿;独立矿床;分散元素;和县香泉
中图分类号: P618.88 **文献标识码**:

Geological-geochemical features and genesis of Xiangquan independent thallium deposit in Hexian County, Anhui Province

FAN Yu[1], ZHOU TaoFa[1], YUAN Feng[1], ZHANG QianMing[2], WU MingAn[3], HOU MingJin[3] and HU QingHua[2]
(1 School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2 No. 327 Geological Party, Anhui Bureau of Geology and Mineral Resources, Hefei 230001, Anhui, China; 3 Anhui Academy of Geological Survey, Hefei 230001, Anhui, China)

Abstract

This paper deals with geological-geochemical features of the only independent thallium deposit so far discovered in eastern Anhui Province. The Hexian County is located in the transitional area of the Yangtze block, the North China Block and the Dabie Orogenic Belt. The host strata of the Xiangquan thallium deposit are Lower Ordovician Lunshan Formation, and the main ore-control structures are Xiaoshan-Xiaolongshan-Dalongshan anticline and two reversed faults (F_1 and F_2). The thallium deposit consists mainly of one ore body which is generally stratoid and lenticular in form and extends in accord with the strike of the strata. Alteration is on the whole

* 本研究得到国家自然科学基金项目(40672062,40272048)、高等学校博士学科点科研基金项目(20050359013)、国家重点基础研究发展规划 973 项目(2007CB411405)、安徽省优秀青年科技基金和安徽省国土厅地质勘查专项费项目的联合资助
第一作者简介 范 裕,男,1982 年生,讲师,主要从事矿床学和地球化学方面的科研工作。E-mail:Fan_yu9@tom.com
收稿日期 2007-07-31; 改回日期 2007-09-05。李德先、张绮玲编辑。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

weak , and the main alteration types are fluoritization , baritization , quartzification , carbonation and limonitization. Thallium is mainly hosted by pyrite. In pyrite , thallium occurs mainly as tiny individual grains in fractures of pyrite , with the rest in the crystal lattices of pyrite. The deposit was formed during the submarine hydrothermal ore-forming period and the epithermal reformation metallogenic period , with the former being dominant. Studies of the Xiangquan thallium deposit show that thallium , as a disperse element , can form not only polymetallic deposits but also independent thallium deposits.

Key words : geology , thallium , pyrite , independent deposit , disperse element , Xiangquan in Hexian County

铊是一种稀有金属元素,广泛应用于化工、电子、医药、航天、高能物理和超导材料等行业(涂光炽等,2004)。铊作为分散元素通常不形成矿床,而常以伴生元素方式存在于其他元素矿床内(刘英俊等,1984)。研究表明,在特定的地质地球化学条件下,铊可以富集形成矿床(涂光炽等,1998;2004),并以产出独立铊矿物为特征。国外已发现的铊矿床有马其顿共和国的 Allchar 矿床(Jankovic,1989)、瑞士 Wallis 地区的 Lengengbach 矿床(Hofmann et al.,1996)、法国 Huates Alpes 地区的 Jas Roux 矿床(Sobott et al.,1987)和美国内华达州卡林矿床(Cline et al.,2000)等,在中国则以扬子板块西南缘的贵州兴仁滥木厂汞铊矿床(陈代演等,2000)和云南南华砷铊矿床(张忠等,1998)为代表。对上述铊矿床的研究表明,铊矿床主要形成于中生代和新生代,矿床中铊的超常富集与低温热液成矿作用关系密切。矿床以 Tl、As、Sb、Hg、Pb(Zn)、Au 等低温成矿元素组合,并产出铊矿物、雄黄、雌黄、辰砂、辉锑矿和方铅矿等低温矿物组合为特征。矿床中铊主要以红铊矿、斜硫砷汞铊矿、辉铁铊矿等独立铊矿物存在,其次以类质同象形式赋存于硫化物中(陈代演等,1989;1996;2000;张忠等,1995;1998;1999;2000;张宝贵等,1998;2004;Jankovic,1989;Sobott et al.,1987;Hofmann et al.,1996;Cline et al.,2000;Zhou et al.,2005)。

安徽省地矿局 327 地质队近年在皖东地区和县县城北西约 20 km 处,发现了香泉独立铊矿床(吴明安,2006;Zhou et al.,2005)。该矿床位于长江中下游成矿带北侧(图 1a),矿床规模较大,类型独特,铊元素强烈富集,是目前较为罕见的独立铊矿床。对该矿床的深入研究可丰富铊的成矿作用及其地球化学行为,具有重要的理论与实际意义。本文在阐述该矿床的地质地球化学特征基础上,重点探讨香泉铊矿床的成因,为该地区分散元素找矿提供依据。

1 区域地质背景

安徽和县香泉铊矿床位于香泉镇东北约 2 km 的小龙王山,地处郯庐断裂东侧,扬子板块、华北板块和大别造山带之间的过渡带(图 1a)滁州-巢湖褶冲带内,其基底属于扬子型基底(常印佛等,1996)。区内岩浆活动微弱,为沉积岩发育区。滁(州)-巢(湖)褶冲带以滁河断裂为界,分为东、西两部分,西部为滁州褶冲亚带,东部为和(县)含(山)巢(湖)褶冲亚带。和含巢褶冲亚带呈北东向展布,其中发育以下志留统高家边组为底板、上三叠统黄马青组为顶板的逆冲断层以及一系列大型复式褶皱(吴明安,2006;Zhou et al.,2005)。

2 矿床地质特征

2.1 地层

和县香泉地区位于和含巢褶冲亚带的锋带与前陆盆地之间,为沉积岩发育区,除泥盆系缺失外,从奥陶系到三叠系均有出露(图 1b)。与铊矿床有关的地层由古至新主要为:①奥陶系下统仑山组,分布于大龙王山-晓山背斜核部,仅在钻孔中可见,主要为青灰色含硅质条带微晶灰岩、泥灰岩和泥岩,其中夹层纹状和条带状沉积黄铁矿建造,是铊矿床的主要赋矿层位;②奥陶系下统红花园组,分布在大龙王山、眉山、小龙王山和晓山的山脊上,主要为青灰色微晶灰岩和白云岩,岩石多已破碎硅化成灰黄白色硅质岩和硅化角砾岩;③志留系高家边组,在地表零星出露,分布在小龙王山和眉山等硅化角砾岩带两侧,主要为黄白色粉砂质页岩和黑色泥质页岩(Zhou et al.,2005;吴明安,2006)。

2.2 构造

矿床的主要控矿构造为大龙王山-晓山背斜和

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

断裂。大龙王山-拦龙山背斜轴向北东 50～55 °,仅北西翼在地表出露。北西翼地层向北西倾斜,倾角 30～40 °左右,局部 50～60 °,南东翼地层向南东方向倾斜,倾角 60 °左右,局部 80～85 °。背斜核部为奥陶系下统红花园组和仑山组地层,两翼为志留系下统高家边组地层。铊矿体产于该褶皱的核部(图 1b) 。

断裂构造可分为两组: ①北东向逆断层 F_1、F_2 分布在小龙王山和眉山两侧,是区内规模最大的断层,也是主要的控矿断层。断层 F_1、F_2 走向北东 40～45 °,倾向北西 320 °,倾角 75～85 °。断层 F_1、F_2 之间分布有角砾岩带; ②北西向一组平行的正断层 F_3 - F_6,倾向北东,倾角 60 °左右,切割错移断层 F_1、F_2 和矿体。

2.3　岩浆岩

区内未见岩浆岩出露,在香泉镇以东 20 km 的乌江镇,钻探工作揭露该处深部有隐伏闪长岩体(吴明安,2006) ,其岩性和皖东滁州等地出露的燕山期岩浆岩一致。

2.4　矿体特征

矿床主要由一个矿体组成,该矿体赋存于仑山组微晶灰岩、泥灰岩和泥岩的相变部位,矿化比较连续。矿体总体上呈似层状和透镜状,与地层产状大体一致,走向北东,倾向南西。沿走向延伸超过 1 000 m,其西南端至 F_4 断层附近,东北端在眉山东侧仍没有完全尖灭。矿体沿倾向延伸较小,一般为 30～40 m,最大不超过 100 m。矿体沿走向有膨胀和收缩现象,平均厚度约 10～15 m。矿体中段在小龙王山东侧附近厚度最大,品位最高,向北东和南西方向矿体厚度逐渐变薄,品位降低。香泉铊矿床中铊的含量很高,而其他金属元素均未发生有经济价值

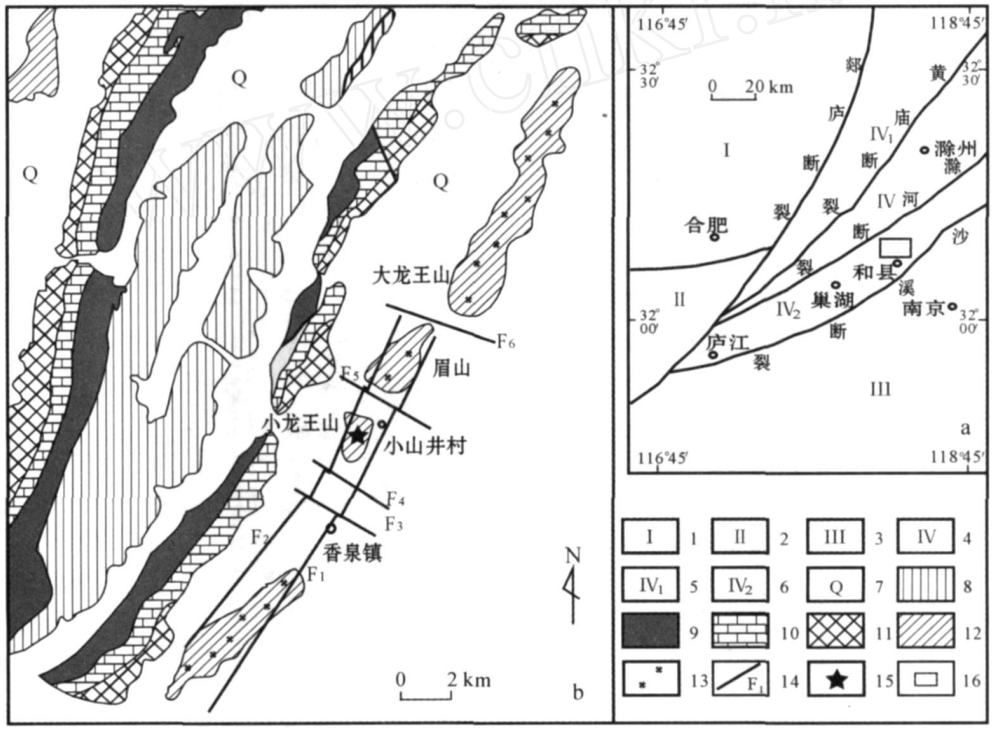


图 1　安徽和县香泉铊矿床所在区域地质略图

1 —华北板块;2 —大别造山带;3 —扬子板块;4 —滁州-巢湖前陆褶冲带;5 —滁州褶冲亚带;6 —和含巢褶冲亚带;7 —第四系;8 —三叠系;9 —二叠系;10 —石炭系;11 —志留系;12 —奥陶系;13 —硅化帽;14 —断裂;15 —香泉铊矿床;16 —图 1b 位置

Fig. 1　Regional geological map of the Xiangquan ore district in Hexian County, Anhui Province

1 —North China Plate;2 —Dabie Orogenic Belt;3 —Yangtze Plate;4 —Chuzhou-Chaohu foreland fold reverse thrust belt;5 —Chuzhou fold reverse thrust subzone;6 —Hehanchao fold reverse thrust subzone;7 —Quaternary;8 —Triassic; 9 —Permian;10 —Carboniferous;11 —Silurian; 12 —Ordovician;13 —Silicified cap;14 —Fault;15 —Xiangquan thallium deposit;16 —Lacation of Fig. 1b

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的富集。以铊含量 0.01 %为铊矿石边界品位,可以圈出铊金属储量约为 250 t 的矿体❶。

2.5 矿石特征

香泉铊矿床中主要矿石矿物为黄铁矿,脉石矿物主要为萤石、石英、重晶石和方解石。根据矿石中黄铁矿的含量,可将香泉铊矿床中的矿石划分为 2 种类型,一种为富铊矿石,黄铁矿含量大于 30 %,铊品位超过 0.1 %;另一种为铊矿石,黄铁矿含量小于 5 %,铊品位小于 0.02 %。

矿石主要有浸染状构造、块状构造、角砾状构造、条带状和细层状构造、胶状和同心圈层状构造、鲕粒(豆状)结构和生物结构等。显微镜下观察和电子探针工作表明(范裕等,2007a),不同结构构造的铊矿石均由胶黄铁矿集合体、硅酸盐矿物、粘土和少量极细颗粒的重晶石和方解石组成,这些胶黄铁矿没有明显差别。

(1)浸染状构造

矿床中大部分贫铊矿石均为浸染状构造,按黄铁矿疏密程度,可分为稠密浸染状和稀疏浸染状(图 2a)。该类矿石在矿床中分布最广,电子探针研究表明(范裕等,2007a),主要为星点状黄铁矿与灰黑色粘土矿物和隐晶质硅酸盐共生。这一构造特征可能反映,当海底热水压力大于静水压力但小于静岩压力时,硫化物沉淀以交代作用为主,而非裂隙充填,从而形成浸染状矿石,这类矿石应主要产于远离热水流体排泄口的近海底处。

(2)块状构造

最富铊的矿石均为块状构造,这类矿石较少,仅见于钻孔 ZK101 中 70～79 m 段。手标本上可见黄铁矿呈块状,与灰黑色粘土矿物和隐晶质硅酸盐共生(图 2b)。镜下观察表明,这些块状黄铁矿是由无数颗粒细小的胶黄铁矿组成,由于胶黄铁矿后期脱水,可见放射状裂纹(图 2c)。这类矿石应为海底热水沉淀的硫化物在海底凹地快速堆积的产物。

(3)条带状和细层状构造

条带状和层状构造矿石主要分布在钻孔 ZK101 中 65～70 m 段,块状矿石的上部。手表本上可见黄铁矿呈条带状、浸染状分布,与粘土矿物、隐晶质硅酸盐构成纹层或条带,局部可见低角度的交错层理(图 2d)。黄铁矿条带的粗细不同,粗条带宽度 > 3 mm,细的仅 0.1 mm 左右,有的微层理和显微交错层理甚至是小于毫米级的。镜下观察表明,这些粗细不同的黄铁矿条带是由无数颗粒细小的胶黄铁矿组成(图 2e)。

条带状构造是典型的海底热水沉积矿石构造,主要产出于海底热液活动相对较平静、海水较深的热泉或喷气孔附近。数量多而规模小的热水沉积作用所形成的硫化物堆积与正常的海底沉积物互层,形成条带状和细层状构造,而发生在喷气孔、热泉口或热液沉积边坡上的小规模涡流或湍流,会使细粒和悬浮的胶体物质发生再沉积作用,从而形成低角度的交错层理。

(4)鲕粒(豆状)结构、胶球体和同心圈层状构造

在矿床中还发现一种特殊结构的矿石,黄铁矿集合体呈鲕粒状和豆状结构(图 2f)。大部分鲕粒尚未发生明显的变形,可以看到有正常鲕、复鲕和偏心鲕等。

一种更为常见的类似结构,是胶黄铁矿同心圈层状结构,它发育于香泉铊矿床的大部分矿体中,这种结构与鲕状黄铁矿相比,每一圈层一般都比较厚,而圈层数较少,每一圈层的界线不像鲕粒黄铁矿那样明显。这种同心圈层状的胶黄铁矿含水量较大,在氧化带很快氧化成灰黑色烟灰状,光片中大部分都见有脱水作用产生的同心圈状或放射状干裂纹(图 2g)。

鲕状、豆状结构的胶黄铁矿是海底热水沉积所形成的,它是富硫化物的热液在海底喷流出后,在排气口或热泉口附近发生的一种胶体硫化物的沉淀作用,具有化学和机械成因的双重特点。胶体状态的硫化物,在通道口附近遭受热液喷流作用引起的水介质搅动,而呈悬浮状态,这种周而复始的搅动,便形成具有一圈圈同心纹包壳的胶黄铁矿鲕粒,当鲕状黄铁矿达到一定大小,其重量超过水搅动的能量,黄铁矿鲕粒便沉淀下来。

(5)生物结构

在铊矿石中,还可以观察到一些类生物结构,可能是管形虫等生物碎屑被黄铁矿交代的结果。部分矿石中可见黄铁矿集合体呈生物碎屑形态产出(图 2h)。

综上所述,香泉铊矿床的矿石组构具有典型的海底热水沉积的特征。浸染状矿石、条代状矿石和块状矿石在空间上从上到下分布,可能反映了其距

❶ 安徽省地勘局 327 地质队. 2006. 安徽和县香泉铊矿床普查报告.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



www.cnki.net

图 2　矿区矿石结构构造特征

a. 浸染状铊矿石（反射光）；b. 块状铊矿石；c. 块状铊矿石（反射光）；d. 条带状、层纹状铊矿石；e. 条带状、层纹状铊矿石（反射光）；f. 鲕粒状铊矿石（反射光）；g. 鲕粒状铊矿石；h. 黄铁矿类生物结构（反射光）；i. 早期萤石呈细脉状穿插黄铁矿建造（单偏光）

Fig. 2 Textural and structural characteristics of ores from the ore district

a. Disseminated thallium ore (reflected polarized light)；b. Massive thallium ore；c. Massive thallium ore (reflected polarized light)；d. Striped or laminated thallium ore；e. Striped or laminated thallium ore (reflected polarized light)；f. Oolitic thallium ore (reflected polarized light)；g. Oolitic thallium ore；h. Biologic texture of pyritoides (reflected polarized light)；i. Early stage fluorite as veinlets cutting pyrite formation (single polar)

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

离热液排泄孔的远近。由于对矿体的控制程度不高,该推断仍需要进一步工作加以验证。

2.6 围岩蚀变特征

矿床围岩蚀变较弱,主要蚀变类型有萤石化、重晶石化、硅化和碳酸盐化等。蚀变可以分为 2 个阶段,早阶段以萤石化为主,晚阶段为萤石化、重晶石化、硅化和碳酸盐化。地表局部可见褐铁矿化和高岭土化。围岩蚀变具一定的垂向分带性,而水平分带不明显,自上而下可划分为 2 个蚀变组合带:a. 萤石化、重晶石化、硅化和碳酸盐化蚀变带;b. 萤石化蚀变带。

(1)萤石化:萤石化可分为 2 个阶段,早阶段形成的萤石为紫色、白色,呈细脉状、团块状穿插地层和黄铁矿建造(图 2i),主要分布在钻孔深部。晚阶段形成的萤石为蜡黄色、白色或无色透明,萤石颗粒粗大,结晶完好,与重晶石共生,主要发育在小龙王山一带的地表和钻孔浅部,局部可见晚世代萤石脉穿切早期萤石。

(2)重晶石化:重晶石化主要分布在小龙王山一带的地表,向深部逐渐减弱。重晶石呈白色,与晚阶段蜡黄色、无色萤石共生。

(3)硅化:硅化主要发育晓山、小龙王山和大龙王山的山脊和钻孔浅部,硅化的原岩为下奥陶统红花园组微晶灰岩和白云岩。硅化岩为青灰色、黄褐色,质地坚硬,并发育不同程度的角砾岩化,在地表形成明显的硅化帽。

(4)碳酸盐化:碳酸盐在近地表和断裂附近破碎较强地段沿裂隙广泛发育。白色脉状方解石穿切、完全或部分交代灰岩或在晶洞中呈无色透明、白色或淡黄色方解石晶体产出。

2.7 铊的赋存状态

根据微量元素、矿相显微镜、电子探针和 X 射线衍射研究(范裕等,2007a),矿床中未产出或尚未发现大于微米级的独立铊矿物,黄铁矿是香泉铊矿床中铊的主要载体矿物。铊以 2 种形态赋存于黄铁矿中,主要以类质同象形式替代铁进入黄铁矿晶格,其次以纳米级、次纳米级铊矿物颗粒形式产出于黄铁矿中。对几十至几百纳米直径大小的铊矿物的研究表明,这类纳米级铊矿物颗粒的铊含量极高,通常大于 10 %,最高可达 22 %,但目前尚无法通过电子探针分析确定其确切化学成分。

黄铁矿的电子探针研究表明,黄铁矿中有明显的富铊条带和微裂隙,显示后期热液改造的信息(范裕等,2007a)。目前的研究表明,铊矿物颗粒均产出于黄铁矿中的这些条带和微裂隙中,表明热液期低温流体对富铊黄铁矿条带进行了改造,使得黄铁矿中分散状态的铊进一步富集,形成纳米级、次纳米级独立铊矿物颗粒。

2.8 成矿期与成矿阶段

由上述矿床地质特征可知,铊矿石的结构构造为典型热水沉积特征,后期热液对黄铁矿进行了改造。因此,香泉矿床的形成可划分为两期,即海底热水沉积成矿期和热液改造成矿期,其中以海底热水沉积成矿期为主。热液改造成矿期又可以进一步划分为早、晚两个成矿阶段,其中以早阶段为主。成矿期和矿物共生次序见表 1。

3 矿床地球化学特征

3.1 微量元素特征

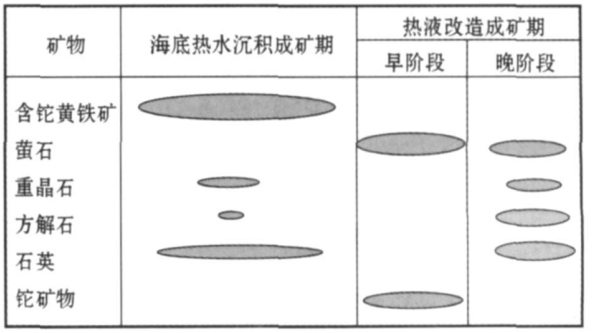
为了确定矿床中铊的分布特征,系统采集了地层、不同类型蚀变岩和不同结构构造矿石的典型样品(表 1),并将矿石样品 ZK101-15、ZK101-29、ZK101-28、ZK202-23、XQ-39、ZK202-45 和 ZK202-46 进行分选,分别得到黄铁矿单矿物样品 HTK-15、HTK-29、HTK-28、HTK-39、HTK-23、HTK-45 和 HTK-46,同时将矿石样品 ZK101-15 中的黄铁矿完全挑出,得到不含黄铁矿的尾砂样品 WS-15。不同类型蚀变岩样品中经分选,得到萤石、重晶石和方解石单矿物样品。对上述样品进行 ICP-MS 分析(ZK202-45 和 ZK202-46 样品未做分析),分析结果见表 2。

(1) 矿床中铊的分布特征

仑山组地层和红花园组地层中铊含量分别为

表 1 成矿期和矿物共生次序表

Table 1 Mineralization epochs and paragenetic sequence



© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　香泉铊矿床地层、矿石、蚀变岩和单矿物微量元素分析结果($w_B/10^{-6}$)

Table 2　Trace element contents of ores, strata, alteration rocks and individual minerals in the Xiangquan thallium deposit ($w_B/10^{-6}$)

样品号	样品类型	As	Tl	Co	Ni	Cu	Pb	Zn	Hf	Ta	Th	U	Cr
ZK101-15	浸染状铊矿石	3.66	249.2	17.579	17.364	82.28	26.61	142.00	0.566	0.195	7.842	13.920	26.72
ZK101-29	浸染状铊矿石	2.25	149.8	3.405	5.842	28.46	9.15	209.36	0.181	0.037	2.412	1.300	11.42
ZK101-28	条带状铊矿石	2.56	1902	0.693	1.250	71.31	3.30	67.83	0.028	0.009	0.350	0.283	4.80
ZK202-23	块状铊矿石	2.43	2210	3.127	7.892	19.34	12.56	59.34	0.162	0.052	2.356	1.235	10.32
XQ-39 *	块状铊矿石	1.74	1155	4.203	6.231	23.45	11.34	55.12	0.172	0.041	2.451	1.421	5.30
ZK901-01	红花园组地层	0.01	0.596	1.575	3.130	14.08	4.87	14.10	0.082	0.049	0.711	1.490	9.59
GG-01	仑山组地层	0.09	3.097	1.782	3.056	23.69	7.64	18.15	0.170	0.066	1.494	0.988	7.00
XLWS-06 *	强烈硅化岩	0.12	4.752	1.222	1.575	47.40	2.14	24.03	0.033	0.019	0.256	1.687	7.16
XQ-28 *	萤石化角砾岩	0.08	6.673	0.466	0.672	14.30	1.25	15.68	0.014	0.012	0.167	2.451	4.24
ZK202-12 *	碳酸盐化灰岩	0.02	1.674	0.781	1.242	10.26	2.47	12.58	0.003	0.011	0.134	2.951	3.47
XQ-14 *	褐铁矿化角砾岩	0.01	27.50	1.112	1.313	8.36	3.56	14.32	0.024	0.016	0.172	2.256	5.35
WS-15	尾砂	0.21	5.212	0.722	2.773	10.21	3.24	14.23	0.014	0.023	0.124	1.147	4.23
HTK-15	黄铁矿	5.12	1968	7.367	17.215	26.59	12.57	74.94	0.252	0.113	2.510	2.326	10.59
HTK-29	黄铁矿	2.64	213.4	1.107	2.416	14.68	3.68	26.21	0.048	0.011	0.684	0.366	5.12
HTK-28	黄铁矿	5.62	1689	1.312	2.572	16.19	4.33	37.27	0.079	0.021	0.722	0.325	16.62
HTK-23	黄铁矿	7.10	5667	0.747	2.404	17.57	4.03	77.89	0.101	0.044	1.019	0.376	15.18
HTK-39	黄铁矿	7.52	7717	0.518	1.440	13.84	2.81	54.92	0.053	0.025	0.527	0.212	6.50
HTK-45	黄铁矿	5.39	1522	1.551	4.592	16.30	3.92	58.33	0.067	0.030	0.520	0.227	10.38
HTK-46	黄铁矿	2.79	132.2	0.413	1.400	16.23	1.32	32.06	0.022	0.008	0.150	0.069	5.65
XQ-15 *	萤石	-	0.704	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FJS-01 *	方解石	-	0.522	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZJS-01 *	重晶石	-	0.825	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

带 * 样品由国家地质实验测试中心韩慧明测试,其他样品由南京大学成岩成矿重点实验室高建军测试。As 单位为 %,“-”代表未检测。

3.097 $\times10^{-6}$和 0.596 $\times10^{-6}$(表 2),结合前人化探工作❶,可知矿床赋矿层位仑山组中铊含量明显偏高,是沉积岩平均值 0.83 $\times10^{-6}$的 3.7 倍。不同类型蚀变岩(如硅化、萤石化和碳酸盐化)中铊含量通常较低,变化范围(1.674～6.673) $\times10^{-6}$,仅褐铁矿化岩石样品铊含量稍高,为 27.50 $\times10^{-6}$。相对于沉积地层,矿石中铊强烈富集,富集系数达 $n\times10^3$～$n\times10^4$,且矿石中铊含量变化范围很大(149.8～2210) $\times10^{-6}$。矿石中砷元素也发生明显富集,变化范围在(1.74～3.36) $\times10^{-2}$之间,而其他微量元素均没有发生明显的富集。

黄铁矿中铊含量变化范围为(132.2～7 717) $\times10^{-6}$,平均 3 129 $\times10^{-6}$,铊在不同黄铁矿样品中的分布极不均匀。黄铁矿中砷含量均较高,含量变化范围(2.64 %～7.52 %),且砷含量与铊含量有一定的正相关关系。其他微量元素除锌含量稍高(26.21～77.89) $\times10^{-6}$,铜、铅、镍、铬和钴的含量都很低(< 20 $\times10^{-6}$),且无明显差别,较铊含量差 2～3 个数量级,表明黄铁矿除了富集铊和砷以外,其他微量元素均不富集,黄铁矿中铊与砷以外的其他微量元素无相关关系。

从表 2 中可见,从星点状铊矿石、条带状铊矿石至块状铊矿石,铊含量逐渐升高。大量钻孔岩芯劈样的铊含量分析结果也表明❶,矿石铊含量与矿石中黄铁矿含量成正比。黄铁矿中铊的含量显著高于相应矿石中铊的含量(除 HTK-28 样品),而不含黄铁矿的尾砂样品 WS-15 中铊含量很低(5.212 $\times10^{-6}$)。萤石、重晶石和方解石中的铊含量极低,为(0.522～0.825) $\times10^{-6}$,因此可以确定矿床中绝大部分铊都赋存在黄铁矿中,黄铁矿是香泉铊矿床中铊的主要载体矿物。

(2) Co/ Ni 比值

黄铁矿的钴含量及 Co/ Ni 比值对其成因具有指示意义(谢桂青等,2002)。热液成因的黄铁矿 Co/ Ni 比值大于 1,或远大于 1,而海底热水成因的黄铁矿 Co/ Ni比值小于1。黄铁矿的形成温度越高,

❶ 安徽省地堪局 327 地质队. 2006. 安徽和县香泉铊矿床普查报告.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

含钴量也越多。由表 2 可见,香泉铊矿床中所有黄铁矿的 Co 含量均小于 10×10^{-6},Co/Ni 比值均小于 1,且较为接近,变化范围为 0.293～0.510,显示黄铁矿为热水沉积成因。黄铁矿中钴含量较低,反映形成黄铁矿的海底热水的温度可能较低。

(3) U、Th 特征值

U、Th 元素对金属沉积物有成因意义,在 lgU-lgTh 的直角图上热水沉积和非热水沉积有各自的分布区域(Bostrom,1983),香泉铊矿床中黄铁矿样品和矿石样品的点均分布于古代石化的热水沉积区(图 3),反映其热水沉积成因特征。

3.2 成矿流体特征

根据黄铁矿建造的地质特征及赋矿围岩奥陶纪仑山组的沉积环境研究(吴明安,2006),推测它们同时形成于半封闭的还原热水环境中。海底热水沉积成矿期的成矿流体可能为富 Tl、Fe、As 等成矿元素的中温低氧逸度海底热卤水。

通过 LINKAM THMS600 型冷热台对早晚两阶段萤石中流体包裹体进行显微测温研究,结果表明,热液改造期早阶段流体的温度变化范围为 120～220 ℃,峰值为 160～180 ℃,流体盐度 $w(NaCl_{eq})$ 为 1.5～6.0 %,峰值为 3.8 %～4.7 %,晚阶段流体的温度变化范围为100～150 ℃,峰值为130～140 ℃,盐度 $w(NaCl_{eq})$ 为 0.8 %～4.5 %,峰值为 2.2 %～3.7 %。因此热液改造期的流体属低温低盐度流体,从早阶段至晚阶段,热液的温度和盐度均逐渐降低。

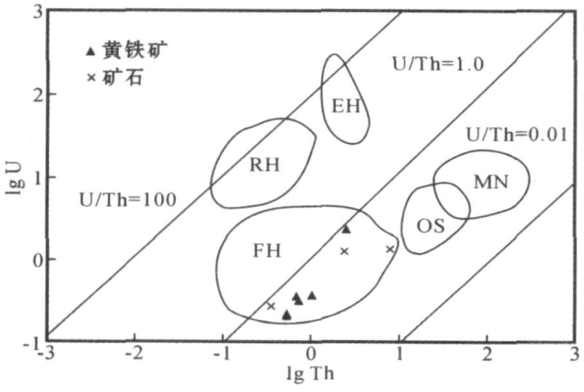


图 3 香泉铊矿床黄铁矿和矿石 lgU-lgTh 成因类型判别图

RH. 红海热水沉积;EH. 东太平洋热水沉积;FH. 石化的热水沉积;OS. 正常海相沉积物;MN. 海相铁锰结核(底图据 Bostrom,1983)

Fig. 3 lgU-lgTh genetic discrimination diagram of pyrite and ore from the Xiangquan thallium deposit

RH. Hydrothermal sedimentation in the Red Sea; EH. Hydrothermal sedimentation in East Pacific Ocean; FH. Fossilized hydrothermal sedimentation; OS. Normal marine sediments; MN. Marine iron-manganese nodule(map base after Bostrom, 1983)

3.3 稳定同位素地球化学

3.3.1 硅同位素

本次工作对铊矿石(ZK101-15 和 ZK101-28)和仑山组地层中的硅质条带(GG-01)进行硅同位素测量。同位素的分析采用 SiF_4 法,质谱计型号为 MAT-251EM,分析精度 ±0.1 ‰。硅同位素测试结果表明(表 3),所有样品均富集较轻的硅同位素,$\delta^{30}Si$ 值明显小于 0 ‰,且变化范围较小($\delta^{30}Si$ = -1.6 ‰～-2.1 ‰)。

前人研究表明(郑永飞等,2000),硅同位素是判别矿床是否为热水沉积成因的有效手段。玄武岩的 $\delta^{30}Si$ 值变化范围在 -0.3 ‰～-1.0 ‰之间(Douthit,1982),花岗岩的 $\delta^{30}Si$ 值范围为 -0.7 ‰～0.4 ‰,热液交代成因硅质岩 $\delta^{30}Si$ 变化范围为 2.4 ‰～3.4 ‰,现代海底热液成矿系统黑烟囱中硅质沉积物的 $\delta^{30}Si$ 变化范围为 -0.4 ‰～-3.1 ‰,而 $\delta^{30}Si$ < -1.5 ‰的样品则只可能是热水沉积的产物。

香泉铊矿床的矿石和围岩中硅质条带的硅同位素值均落入热水沉积物的硅同位素组成范围,具有典型的热水沉积特征。铊矿石与容矿围岩两者的硅同位素十分接近,反映它们具有相同的成因。

3.3.2 氢、氧同位素

香泉铊矿床中早晚两世代萤石中流体包裹体水的氢氧同位素测试结果见表 4。从表中可看出,香泉铊矿床中早世代萤石中流体包裹体水的氢、氧同位素变化范围为 δD ‰= -52.7 ‰～-60.0 ‰,$\delta^{18}O$ = -0.5 ‰～1.99 ‰,晚世代萤石中流体包裹体水的氢、氧同位素变化范围为 δD = -72.6 ‰～-70.3 ‰,$\delta^{18}O$ = -4.45 ‰～-10.24 ‰,投在 δD-$\delta^{18}O$ 坐标图上(图 4),4 个点均落在 Cragia 大气降水线的右侧,处于大气降水成矿热液范围内(张理刚,

表 3 香泉铊矿床硅同位素测试结果

Table 3 Si isotopic composition of ore and silica band from Xiangquan thallium deposit

样品号	样品名称	$\delta^{30}Si$/ ‰
ZK101-15	矿石	-2.0
ZK101-28	矿石	-1.6
GG-01	仑山组硅质岩条带	-2.1

测试单位:中国地质科学院矿产资源研究所。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 4　萤石中流体包裹体氢、氧同位素测试结果

Table 4　H,O isotopic composition of fluid inclusion in fluorite from Xiangquan thallium deposit

样品号	样品名称	$\delta^{18}O$/ ‰	δD/ ‰
XQ-15	早阶段萤石	1.99	- 52.7
XQ-06	早阶段萤石	- 0.50	- 60.0
XLWS-04	晚阶段萤石	- 4.45	- 72.6
XLWS-05	晚阶段萤石	- 10.24	- 70.3

测试单位:宜昌地质矿产研究所。

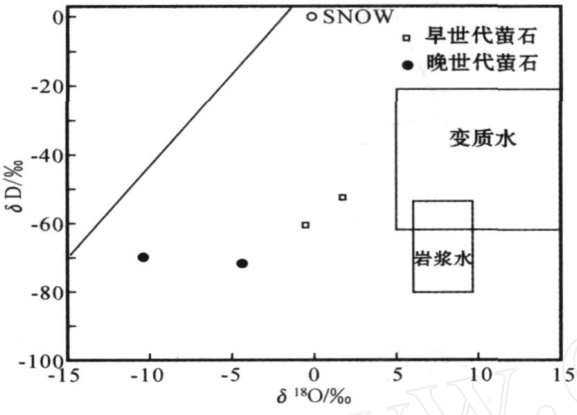


图 4　香泉铊矿床萤石流体包裹体 δD-$\delta^{18}O$ 图

Fig. 4　δD-$\delta^{18}O$ diagram of fluid inclusions in fluorites from the Xiangquan thallium deposit

1989),表明该区萤石矿床成矿溶液主要由大气降水组成。从图 4 中可见,两期萤石的氢氧同位素均有一定差别,晚阶段萤石样品投点较早阶段萤石样品更靠近大气降水线,表明早晚两阶段流体性质稍有不同,可能是两阶段流体在水岩作用时水岩比例和温度不同所致。

4　成矿时代

黄铁矿建造和奥陶纪沉积地层为同时形成,推断海底热水沉积成矿作用发生在早奥陶纪。

对早、晚两阶段萤石样品进行 Sm-Nd 同位素年龄测定,得到早、晚两阶段萤石的等时线年龄分别为(131.9 ±2.6) Ma 和(79 ±11) Ma (范裕等,2007b),表明香泉铊矿床低温热液成矿作用发生在晚燕山期。香泉铊矿床位于香泉-半汤断裂中,沿该断裂有现代温泉活动,说明该断裂晚白垩纪以来仍有活动,因此,香泉铊矿床很可能经历了晚白垩纪热液(泉)活动的叠加。

5　矿床成因

根据上述矿床地质地球化学特征研究,可将香泉铊矿床的形成分为 2 期,即海底热水沉积成矿期和低温热液成矿期(图 5),其中以海底热水沉积成矿期为主。低温热液改造期又分为早、晚 2 个阶段。

海底热水沉积成矿期:扬子板块东北缘在奥陶纪早期出现深海湾,为一封闭的沉积盆地。由于海湾的扩张,洋壳变薄,海底产出一系列海底断裂。海水沿断裂下渗,在洋壳内深循环并演化成中温富铊流体,随着地热梯度升高,富铊流体沿海底断裂喷出海底,中等温度在海底热液喷出海底后,热液对流系统形成。富含铊的海底热水,在深海海底相对封闭还原和水动力条件较弱的环境下与海水发生反应形成了黄铁矿,石英和粘土矿物,在距离热水流体主排泄通道远近不同的位置分别形成浸染状、块状、条带状和角砾状等不同结构构造的含铊黄铁矿建造。海水和海底热水的混和作用可能是导致黄铁矿沉淀的主要原因,其机理主要是凝絮作用。铊在黄铁矿的形成过程中,主要以类质同象形式进入黄铁矿晶格,含铊黄铁矿建造为铊矿床的形成提供了物质基础。

低温热液改造成矿期:在燕山晚期,在太平洋板块的作用下,随着中国东部岩石圈地壳的减薄拆沉,在扬子板块长江中下游地区爆发大规模岩浆活动,该带的北侧-扬子板块东北缘地区的岩浆和成矿活动相对较弱,在成岩成矿活动集中爆发期后一段时间,131.7 Ma 前后,大气降水经地壳浅部循环后形成的早阶段低温、中等盐度流体,沿断裂运移至含铊黄铁矿建造处。由于背斜的圈闭,流体未对铊进行长距离搬运,而主要在原地对黄铁矿建造进行改造,使铊在胶黄铁矿中进一步富集,在黄铁矿裂隙等位置形成纳米和次纳米级铊矿物,并同时在黄铁矿建造附近沉淀形成早世代萤石。在燕山晚期(79.3 ± 9.4) Ma,又发生一次成矿流体活动,流体来源以大气降水为主,较早阶段流体,晚阶段流体的温度盐度更低,在矿床浅部形成碳酸盐化、萤石化、重晶石化。

6　讨　论

香泉铊矿床的地质地球化学特征与目前世界上已知的铊矿床有着明显的不同。该矿床中仅铊一种元素强烈富集,不产出铊矿床中常见的雄黄、雌黄、辉

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

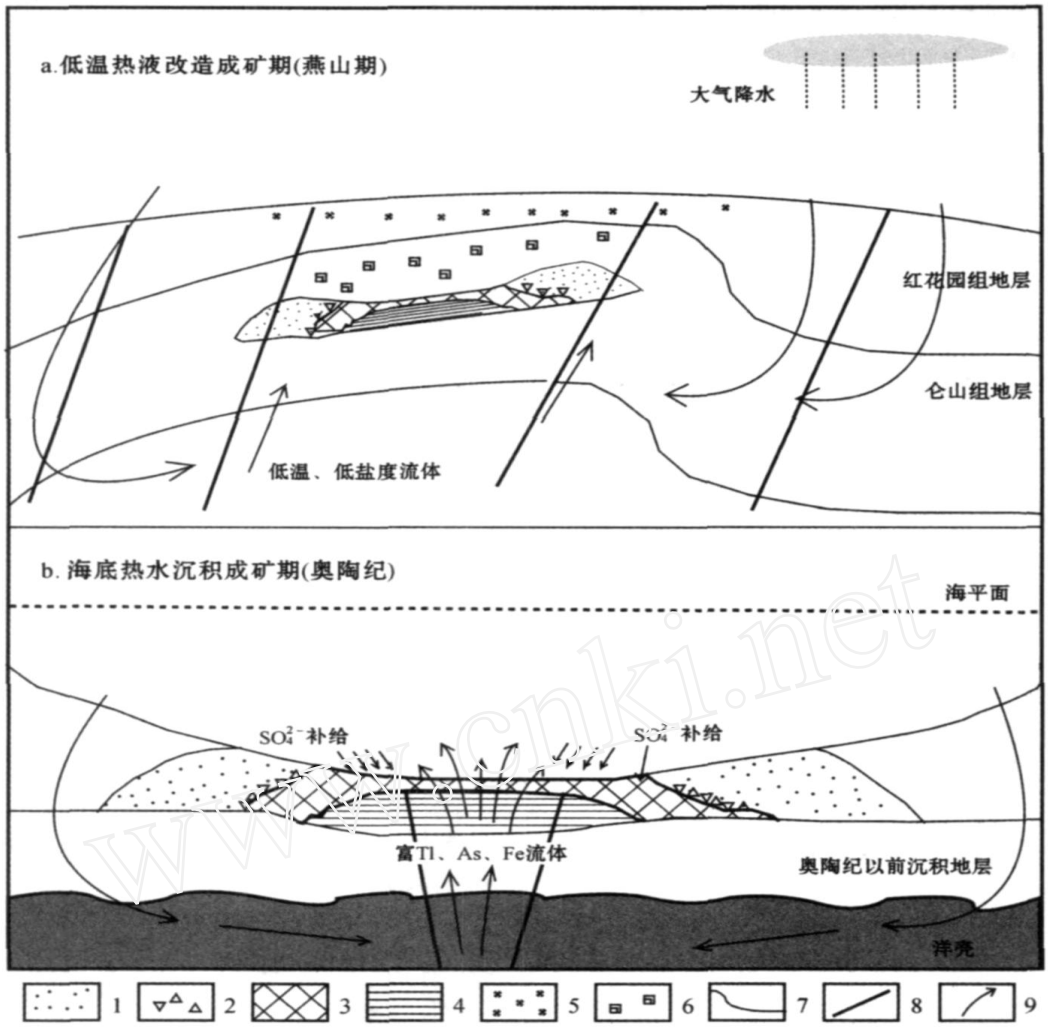


图 5 香泉铊矿床成矿模式图

a. 燕山期低温热液成矿模式图; b. 奥陶纪海底热水沉积成矿模式图

1—浸染状矿石;2—角砾状矿石;3—块状矿石;4—层状矿石;5—硅化;6—萤石化;7—地层界限;8—断层;9—流体运移方向

Fig. 5 Metallogenic model for the Xiangquang thallium deposit

a. Epithermal metallogenic model of Yanshanian period; b. Sea floor hydrothermal sedimentary metallogenic model of Ordovician period

1—Disseminated ore; 2—Breccia ore; 3—Massive ore; 4—Stratiform ore; 5—Silicified cap; 6—Fluoritization; 7—Stratigraphic unit; 8—Fault; 9—Fluid transportation direction

锑矿、辰砂等砷、锑、汞矿物,是迄今为止唯一报道的铊单一元素矿床。该矿床的发现表明,在特殊的地质地球化学条件下,铊可以单独成矿而不和其他任何元素伴生。通过对该矿床的研究,对铊等分散元素成矿作用的认识更加深入,即分散元素铊不仅可以富集成矿,还可以形成单一元素独立矿床。

前人的研究认为(陈代演等,1996;2000;张忠等,1995;1998;1999;涂光炽等,1998;2004;Jankovic,1989;Sobott et al.,1987),大多数铊矿床的形成可以分为 2 个阶段:预富集阶段和热液改造阶段,其中以热液改造阶段为主,其相关研究集中于低温热液改造期铊的富集成矿机理。本次工作研究表明,香泉铊矿床的形成以海底热水沉积成矿期为主,对该期海底热水的性质,物理化学条件,铊在其中的富集迁移沉积机理还有待进一步研究。

热液改造期成矿作用与低温流体系统关系密切。众所周知,长江中下游成矿带的中高温金属成矿作用主要发生在中生代的燕山期(常印佛等,1991;毛景文等,2004;翟裕生等,1992;唐永成等,1998;周涛发等,2000)。香泉铊矿床的发现,指示该地区燕山期除中高温成矿外,还可能存在燕山期的低温热液成矿作用。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

长江中下游北侧的沉积岩发育区,其找矿工作一直没有取得突破,香泉铊矿床的发现为该地区铊及分散元素矿床勘探提供了线索。仑山组地层是铊矿床的赋矿地层,该地层在区域上广泛分布,可以在该地层出露的地区加强铊等分散元素的找矿工作。

7 结 论

(1)香泉铊矿床主要赋矿地层为下奥陶统仑山组,主要控矿构造为背斜和逆断层。矿床中围岩蚀变较弱,主要蚀变类型包括萤石化、重晶石化、硅化和碳酸盐化等。

(2)矿床主要由一个矿体组成,矿体总体上为似层状、透镜状,矿床中主要矿石矿物为黄铁矿,铊主要以类质同象形式替代铁进入黄铁矿晶格,其次以纳米级、次纳米级铊矿物颗粒形式产出于黄铁矿中。

(3)矿床的形成经历的海底热水沉积成矿期和低温热液改造成矿期,其中以海底热水沉积成矿期为主。热液改造成矿期又可以进一步划分为早、晚两个成矿阶段。早奥陶纪富含 Tl、As 和 Fe 的海底热水形成含铊黄铁矿建造,燕山期低温流体活动使铊在黄铁矿中进一步富集,形成纳米和次纳米级铊矿物,并同时沉淀形成萤石等热液矿物。

(4)分散元素铊不仅可以形成伴生型多元素矿床,在特殊的地质地球化学条件下,还可以形成单一元素独立铊矿床。

致 谢 研究工作得到常印佛院士的悉心指导,在此致以衷心的感谢。

References

Bostrom P A. 1983. Genesis of ferromanganese deposits-diagenostic criteria for recent and old deposits[A]. In: Rona P A, et al. eds. Hydrothermal processes at seafloor spreading centres[C]. New York: Plenum Press. 43(2):473～489.

Chang Y F, Liu X P and Wu Y C. 1991. Copper and iron metallogenic belt in Lower Yangtze River[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1～130(in Chinese).

Chang Y F and Dong S W. 1996. On tectonic of "poly basement with one cover" in Middle-Lower Yangtze craton China[J]. Volcanology and Mineral Resources, 70(4):17～25(in Chinese with English abstract).

Chen D Y. 1989. The first discovery and study of lorandite in China [J]. Acta Mineralogical Sinica, 9(3):141～147(in Chinese with English abstract).

Chen D Y, Ren D Y and Wang H. 1996. Some geochemical problems of ore-forming elements in ore-host strata of thallium deposits (prospects) in Southwestern Guizhou[J]. Acta Mineralogical Sinica, 16(3):307～316(in Chinese with English abstract).

Chen D Y and Zhou Z X. 2000. Studying situation about Lanmuchang type thallium (mercury) ore deposits in Southwestern Guizhou[J]. Guizhou Geology, 17(4):236～242(in Chinese with English abstract).

Cline J S and Hofstra A H. 2000. Ore fluid evolution at the Getchell Carlin-type gold deposits, Nevada, USA [J]. European Journal of Mineralogy, 12(1):195～212.

Douthitt C D. 1982. The geochemistry of the stable isotope of silicon [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 46(1):1449～1458.

Fan Y, Zhou T F, Yuan F, Zhang Q M, Wu M A, Hou M J and Hu Q H. 2007a. Samarium-neodymium isotope dating of flourites from the Xiangquan thallium deposit (Anhui, China): The first discovery of Yanshanian period epithermal mineralization in northeast margin of the Yangtze block[J]. Acta Geologica Sinica (in press).

Fan Y, Zhou T F, Yuan F, Wu M A, Zhang Q M, Hu Q H and Hou M J. 2007b. The occurrence of thallium in the Xiangquan thallium independent deposit in He county, Anhui Province[J]. Acta Petrologica Sinica (in press).

Hofmann B A and Knill M D. 1996. Geochemistry and genesis of the Lengenbach Pb-Zn-As-Tl-Ba mineralization, Binn Valley, Switzerland [J]. Mineralium Deposita, 31(2):319～339.

Jankovic S. 1989. Sb-As-Tl mineral association in the Mediterranean region[J]. International Geology Review, 31(2):262～273.

Liu Y J, Cao L M, Li Z L and Wang H N. 1984. Elemental geochemistry[M]. Beijing: Science Press. 1～268(in Chinese).

Mao J W, Stein H, Du A D, Zhou T F, Mei Y X, Li Y F, Zang W S and Li J W. 2004. Molybdenite Re-Os precise dating for molybdente from Cu-Au-Mo deposits in the Middle-Lower Reaches of Yangtze River belt and its implications for mineraliztion[J]. Acta Geologica Sinica, 78(1):121～131(in Chinese with English abstract).

Sobott R J, Klaes R and Moh G H. 1987. Thallium containing Mineral Systems[J]. Chem. Erde., 47:195～218.

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 copper-gold polymetallic deposits in the along Changjiang area of Anhui province [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 310～315(in Chinese).

Tu G C, Gao Z M and Chen J P. 1998. Low Temperature Geochemistry [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1～15(in Chinese).

Tu G C, Gao Z M, Hu R Z, Zhang Q, Li C Y, Zhao Z H and Zhang B G. 2004. Separate Element Geochemistry and Mineralization[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1～49(in Chinese).

Wu M A. 2006. The study of geology character of Xianquan thallium deposit, Anhui Province[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition), 29(12):1570～1576(in Chinese with English abstract).

Xie G Q, Hu R Z, Fang W X and Qi L. 2002. Evidence for geology and geochemistry of hydrothermal exhalative genesis from Mojiang gold deposit, Yunnan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 20(3):387～393 (in Chinese with English abstract).

Zhai Y S, Yao S Z, Lin X D, Zhou X R, Wan N F, Jin F Q and Zhou Z G. 1992. Copper and iron deposits in Lower Yangtze River[M]. Bei-

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

jing: Geol. Pub. House. 40～72(in Chinese).

Zhang B G, Wang S X, Zhang Z and Wang M Z. 1998. A study on thallium pyrite, (Fe, Tl) (S, As): Discovered in Nanhua As-Tl deposit in China[J]. Acta Mineralogical Sinica, 18(2): 174～179(in Chinese with English abstract).

Zhang B G, Zhang Z, Hu J and Tian Y F. 2004. Thallium geochemistry and its ultra-normal enrichment[J]. Guizhou Geology, 21(4): 240～245.

Zhang L G. 1989. Petrogenetic and minerogenetic theories and prospecting-stable isotope geochemistry of main type ore deposits and granitoids of China[M]. Beijing: Press of Beijing University of Technology. 1～200(in Chinese).

Zhang Z, Long J P and Zhang B G. 1995. Mode of occurrence of thallium and its metallogenic model and indicators of prospecting for As-Hg-Sb-Au ore deposits[J]. Geological Review, 41(4): 363～369(in Chinese with English abstract).

Zhang Z, Zhang X M and Zhang B G. 1998. Elemental geochemistry and metallogeic model of Nanhua As-Tl deposit in Yunnan province, China[J]. Geochimica, 20(3): 269～275(in Chinese with English abstract).

Zhang Z, Chen G L, Zhang B G, Chen Y C and Zhang X M. 1999. Lanmuchang thallium deposit and environmental geochemistry research [J]. Science in China (Series D), 29(5): 433～441(in Chinese).

Zhang Z, Chen G L, Zhang B G, Chen Y C and Zhang X M. 2000. The marks for the prospecting of ores and the indices for the identifying of contamination are the high contents of Tl, Hg, As in plants and animals in the Lanmuchang Tl mining district [J]. Geology and Prospecting, 36(5): 27～31(in Chinese with English abstract).

Zheng Y F and Chen J F. 2000. Stable isotope geochemistry[M]. Beijing: Science Press. 260～265(in Chinese).

Zhou T F and Yue S C. 2000. Forming conditions and mechanism for the fluid ore-forming system of the copper, gold deposits in the middle and lower reaches of the Yangtze River area[J]. Acta Scicentiarum Naturalum Universitis Pekinesis, 36(5): 697～707(in Chinese with English abstract).

Zhou T F, Fan F, Yuan F, Wu M A, Hou M J, Voicu G, Hu Q H, Zhang Q M and Yue S C. 2005. A preliminary geological and geochemical study of the Xiangquan thallium deposit, eastern China: the world first thallium-only mine[J]. Mineralogy and Petrology, 85(3): 243～251.

附中文参考文献

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. 1～130.

常印佛, 董树文. 1996. 论中扬子板块长江中下游地区"一盖多底"格局与演化[J]. 火山地质与矿产, 70(4): 17～25.

陈代演. 1989. 红铊矿在我国的发现和研究[J]. 矿物学报, 9(3): 141～147.

陈代演, 任大银, 王 华. 1996. 黔西南铊矿床(点)赋矿地层中成矿元素的若干地球化学问题研究[J]. 矿物学报, 16(3): 307～315.

陈代演, 邹振西. 2000. 贵州西南部滥木厂式铊(汞)矿床研究[J]. 贵州地质, 17(4): 236～242.

范 裕, 周涛发, 袁 峰, 张千明, 吴明安, 侯明金, 胡清华. 2007a. 安徽和县香泉独立铊矿床中铊的赋存状态研究[J]. 岩石学报(出版中).

范 裕, 周涛发, 袁 峰, 吴明安, 张千明, 胡清华, 侯明金. 2007b. 扬子板块长江中下游地区首例低温独立铊矿床的钐-钕同位素定年及其意义[J]. 地质学报(出版中).

刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 1～268.

毛景文, Stein H, 杜安道, 周涛发, 梅燕雄, 李永丰, 藏文栓, 李进文. 2004. 长江中下游地区铜金(铜)矿 Re-Os 年龄测定及其对成矿作用的指示[J]. 地质学报, 78(1): 121～131

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. 310～315.

涂光炽, 高振敏, 陈景平. 1998. 低温地球化学[M]. 北京: 地质出版社. 1～15.

涂光炽, 高振敏, 胡瑞忠, 张 乾, 李朝阳, 赵振华, 张宝贵. 2004. 分散元素地球化学及成矿机制[M]. 北京: 地质出版社. 1～49.

吴明安. 2006. 安徽香泉铊矿床的地质特征研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 29(12): 1570～1576.

谢桂青, 胡瑞忠, 方维萱, 漆 亮. 2002. 云南墨江金矿热水喷流沉积成岩成矿的地质地球化学证据[J]. 沉积学报, 20(3): 387～393.

翟裕生, 姚书振, 林新多, 周珣若, 万年丰, 金福全, 周宗桂. 1992. 长江中下游地区铁铜矿床[M]. 北京: 地质出版社. 40～72.

张宝贵, 王三学, 张 忠, 王明再. 1998. 南华砷铊矿床铊黄铁矿的发现和研究[J]. 矿物学报, 18(2): 174～179.

张宝贵, 张 忠, 胡 静, 田弋夫. 2004. 铊地球化学和铊超常富集[J]. 贵州地质, 21(4): 240～245.

张理刚. 1989. 成岩成矿理论与找矿-中国主要类型矿床及花岗岩类岩石的稳定同位素地质学[M]. 北京: 北京工业大学出版社. 1～200.

张 忠, 龙江平, 张宝贵. 1995. 砷、汞、锑、金矿床铊的赋存状态、成矿模式与找矿标志[J]. 地质论评, 41(4): 363～369.

张 忠, 张兴茂, 张宝贵. 1998. 南华砷铊矿床元素地球化学和成矿模式[J]. 地球化学, 22(3): 269～275.

张 忠, 陈国丽, 张宝贵, 陈业材. 1999. 滥木厂铊矿床及其环境地球化学研究[J]. 中国科学(D 辑), 29(5): 433～441.

张 忠, 陈国丽, 张宝贵, 陈业材, 张兴茂. 2000. 富集铊汞砷的生物是滥木厂铊矿床找矿和铊矿区污染的标志[J]. 地质与勘探, 36(5): 27～31.

郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 260～265.

周涛发, 岳书仓. 2000. 长江中下游铜金矿床成矿流体系统的形成条件及演化机理[J]. 北京大学学报(自然科学版), 36(5): 697～707.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net