

中国东部晚中生代斑岩-浅成热液金(铜)体系及其成矿流体*

华仁民 陆建军 陈培荣 李晓峰 刘晓东 张文兰

南京大学地球科学系, 成矿作用研究国家重点实验室, 南京 210093

摘要 中国东部晚中生代强烈的火山岩类活动伴随着广泛的热液成矿作用, 形成斑岩型、浅成热液型、以及两者之间的中成热液型金铜矿床, 构成“斑岩-浅成热液金铜成矿体系”。由于这几类矿床在形成深度及与浅成侵入岩关系等方面的差异, 因而在地质地球化学特征及成因上存在明显差别, 但是它们的成矿流体都以大气降水为主导, 并且有岩浆挥发组分不同程度的参与。

关键词 成矿流体 斑岩-浅成热液成矿体系 金铜矿床 中国东部

1 中国东部晚中生代斑岩-浅成热液成矿体系

中国东部晚中生代火山活动十分强烈, 且规模巨大, 形成了南起粤闽、北抵黑龙江, 长达4000多km、宽1000多km的火山岩带。王德滋等^[1]根据火山岩的空间展布、岩石组合及其与区域构造的关系, 将中国东部晚中生代火山岩从纵向上划分为3个成分各异的火山岩省, 即南钙碱性火山岩省、北钙碱性火山岩省和夹于两者之间的橄榄安粗岩省。在这一火山岩带中还有相当规模的中酸性(花岗质)侵入岩分布, 它们与火山岩在时代上、空间上、来源上有密切的关系, 组成以中国东南沿海地区为代表的晚中生代火山-侵入杂岩带^[2]。

中国东部晚中生代火山-侵入活动与金、铜等金属成矿作用的关系十分密切, 以金矿为例, 中生代陆相火山作用有关金矿床是中国东部4种最重要的金矿类型之一^[3]。中国东部与火山活动有关金、铜矿化有两个明显的基本特点: 一是其成矿时代较为集中, 主要为晚中生代, 尤其是燕山期, 因而是中国东部燕山期成矿大爆发的重要内容之

一^[4]; 二是火山成矿作用与斑岩成矿作用有密切的成因和时空联系, 而这正是俯冲板块边界岩浆活动-成矿作用的普遍规律。在现今的西南太平洋地区, 由于新生代太平洋板块、菲律宾板块向欧亚板块、澳大利亚板块俯冲而发育着典型的火山岛弧带, 与之相关的是大规模的新生代金、铜成矿作用, 例如日本的 Hishikari、我国台湾的金瓜石、菲律宾的 Acupan、巴布亚新几内亚的 Lihir、新西兰的 Hauraki 等, 它们都是所谓的浅成热液矿床(epithermal^[1] deposits)的典型实例; 同时, 这里也发育相当可观的斑岩型(porphyry)铜、金矿床, 例如菲律宾的 Marian、印度尼西亚的 Grasberg、巴布亚新几内亚的 Panguna 和 Ok Tedi、斐济的 Namosa 等。西南太平洋火山岛弧带新生代金、铜成矿作用的重要特点之一就是火山成矿作用与斑岩成矿作用在成因和时空上有密切的联系, 因此被称之为“斑岩-浅成热液成矿体系”(porphyry-epithermal system)。Corbett 和 Leach 在论述西南太平洋金-铜体系的构造、蚀变和成矿作用时按成矿深度把该体系分为斑岩、中成热液(mesothermal^[2])和浅成热液3种类型^[5]。显然, 此处的“中成热液”是特指斑岩与浅成热液之间的

2001-04-19 收稿, 2001-05-24 收修改稿

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 49733120)和国家重点基础研究发展规划项目(批准号: G1999043209)资助

1) epithermal 一词的中文译名一直是浅成低温热液, 然而, 许多 epithermal 矿床虽然形成深度不大, 但由于处在火山-地热环境, 温度已远远超过了“低温”的范围, 所以称为浅成热液更恰当一些

2) mesothermal 一词在国际矿床学界仍然通用, 中文译名为中温深成热液, 但其本身涵义较广。本文按 Corbett & Leach (1995) 的用法, 暂称之为中成热液

过渡类型,而不包括那些产于克拉通内、形成深度较大的脉状金矿床。

中国东部晚中生代火山-侵入岩带与西南太平洋新生代火山岛弧带分别构成所谓环太平洋带的外带与内带。目前普遍认为,中国东部晚中生代大规模火山活动总体的构造背景是古太平洋板块向欧亚大陆板块的俯冲作用,以及挤压后的伸展和拉分。因此,中国东部晚中生代大规模火山活动与西南太平洋地区新生代大规模火山活动有着可以类比的构造环境。发生在中国东部与晚中生代火山-侵入活动有关的金、铜矿化也可以归入“斑岩-浅成热液成矿体系”。

中国东部晚中生代斑岩-浅成热液金铜成矿体系在整个火山-侵入岩带都有发育,其中的典型矿床已被许多地质工作者所研究,如黑龙江团结沟、吉林东部(小西南岔-闹枝-五凤-刺猬沟)、江西铜厂-银山、浙江八宝山、福建紫金山等。有关它们的地质背景、矿床特征及成因的论述见于大量文献之中,但观点不尽相同。本文以团结沟、银山、紫金山3个矿床为例,讨论这一成矿体系的主要特征,重点探讨成矿流体的性质及其在成矿过程中的作用。

2 黑龙江团结沟金矿床

黑龙江团结沟金矿床位于出露元古界地层的鹤岗隆起之西北、乌拉嘎拗陷的东南边缘,在空间上与成矿关系最密切的是白垩纪的花岗闪长斑岩,前人测定其年龄为 $113 \sim 100 \text{ Ma}$ ^[6]。关于团结沟金矿床的成因,目前主要有两种提法,一种是强调其与花岗闪长斑岩岩浆活动的关系而称其为斑岩型金矿床^[7,8]。另一种观点认为它属于浅成热液矿床^[9~11]。陈振胜等则称它为“中低温斑岩型大气降水热液矿床”^[12]。

笔者认为团结沟金矿床属于浅成热液矿床中的低硫亚类(low sulfidation)或冰长石-绢云母型矿床^[13~15]。实际上,团结沟金矿床主要产在花岗闪长斑岩与变质岩接触带及附近的构造破碎带中,矿床主要不是受斑岩体控制,而是受断裂构造带控制。在斑岩体南侧的接触带中,发育几条北西西走向的断裂,组成了断裂构造带的主体。张贻侠等^[16]分析了该断裂带在团结沟斑岩体固结之后先压(扭)后张的活动特征,认为正是由于“断裂构造带由压性转为张性的多次活动,导致含矿热液、岩金矿化多次叠加,最终沿这些断裂及其复合部位富集成具

工业意义的金矿”。

除了这一基本的控矿因素外,对于团结沟金矿床的成因,笔者认为还应注意以下一些重要特征:

(1) 成矿作用包括早、晚两期而以晚期为主成矿期,该期的成矿温度一般为 230°C 至 90°C ,显然属于较低温的成矿作用所致。

(2) 团结沟金矿床发育石英-冰长石化蚀变,矿体也产在石英-冰长石蚀变带,与金矿伴生的石英主要为低温的玉髓,而这恰是浅成热液矿床中低硫亚类的最典型蚀变类型和矿物组合。

(3) 团结沟金矿床发育大量的热液爆发角砾岩,这是浅成热液成矿作用的显著特点之一。

(4) 与金矿伴生的硫化物尤其是黄铁矿以白铁矿、胶黄铁矿等形式存在;而草莓状黄铁矿、黄铁矿化的藻类化石也相当发育^[7,9],这些都显示团结沟金矿形成于相当低的温度范围和近地表的环境。

上述重要特征均表明,团结沟金矿不属于斑岩型矿床,它虽与岩浆活动有关但不是岩浆热液矿床。

有关团结沟金矿床的成矿流体尚缺乏系统的研究工作及成果报道,但前人在进行矿床地球化学研究时所获得的一些数据已经提供了成矿流体的基本特征,并可揭示其来源。综合前人有关流体包裹体及其氢氧同位素的资料,团结沟金矿床成矿流体的盐度较低(NaCl 的质量分数 $w < 1\% \sim 4.6\%$), $\delta^{18}\text{O}$ 以负值为主 ($-4.4\permil \sim +0.3\permil$), δD 值也较低 ($-85\permil \sim -137\permil$)。这些数据,加上前面所述的较低的均一温度等特征,充分显示团结沟金矿的成矿流体主要来源于大气降水,而岩浆水在主要成矿阶段的参与是较弱的。

由此可以总结团结沟金矿床的形成环境和机制是:在晚白垩世中酸性火山-侵入活动的基础上,由于火山地热和断裂构造的共同作用,加热并驱动大气降水发生大规模流动;花岗闪长斑岩体与黑龙江群变质岩接触带附近的构造破碎带成为流体活动的中心,在这一地带发生了广泛的热液蚀变及金的矿化。

与团结沟金矿床类似的低硫型浅成热液矿床还有吉林延边地区的五凤和刺猬沟金矿床,陈仁义、芮宗瑶等已对它们进行了较详细的研究^[17,18],后者还认为它们与小西南岔斑岩型铜矿床、闹枝金(铜)矿床在时空上、成因上构成一个与中生代火山-次火山-侵入活动有关的斑岩型-浅成热液型成矿系列。

3 江西银山铜金多金属矿床

江西德兴银山铜金多金属矿床是近10多年来受到广泛关注的一个大型矿床。由于它与中生代火山机构、次火山岩有密切的成因联系,加上在它不远处有铜厂超大型斑岩铜矿床,因此不少研究者认为它属于斑岩型矿床的范畴,而更多的人把它称为次火山热液型矿床^[19-23]。

关于银山矿床的成矿流体,一些研究者根据所测定的成矿流体氧同位素组成与岩浆水比较接近,提出银山成矿流体应以岩浆水来源为主^[24-27];而另一些研究者则认为银山成矿流体应以大气降水来源为主^[28,29]。

笔者在研究银山矿床成因与成矿流体时,提出了以下一些问题:

(1) 银山的矿脉基本上都产在围岩(千枚岩)中,而不是次火山岩中。

(2) 无论在地表还是深部,银山次火山岩的规模都很小,其析出的岩浆水的数量和作用范围较为有限。

(3) 银山成矿流体的盐度较低,据目前对银山矿床进行的较系统的气液包裹体研究结果,成矿流体为中、低盐度^[23],与那些以岩浆水为主要来源的高盐度流体不同。

(4) 银山周围地层中存在明显的金的地球化学降低场,在矿床外围200多km²的范围内,地层中金含量从正常的 4×10^{-9} 下降为 $<1 \times 10^{-9}$ ^[30],充分证明了银山成矿过程中流体的大规模运移,而岩浆水的运移不可能形成这种类型的降低场。

(5) 由于成矿过程中水-岩反应的广泛发生,成矿流体的稳定同位素组成特征与其初始状态(岩浆水、大气降水等)的稳定同位素组成特征之间可能会有相当大的差别,因此,在利用氢氧等稳定同位素组成判断成矿流体来源的时候,必须综合地考虑成矿过程的各种因素,尤其是水-岩反应造成的影响。

针对上述问题,笔者等对银山矿床不同蚀变岩石的氧同位素组成特征进行了测定,研究它们在平面上和垂直方向上的变化,根据实测及推测来确定银山矿区各类岩石、流体的氧同位素初始值以及成矿过程各阶段的温度、W/R比值等要素,并根据氢氧同位素水-岩交换的质量平衡方程^[31]进行流体氧同位素变化的反演计算。研究结果表明,银山的

成矿流体主要来自大气降水,是大气降水在较高温度和较低W/R比值条件下与高 $\delta^{18}\text{O}$ 值的千枚岩发生水-岩反应的演化产物^[28]。

虽然银山的成矿流体主要来自大气降水,但是它与团结沟金矿床的形成机制既有相似之处,也有明显的差别。团结沟金矿床除了有典型的冰长石-绢云母蚀变外,还发育大量的低温二氧化硅(玉髓),说明它形成于很浅的位置,这一特征与浅成热液矿床低硫亚类中的“热泉型”矿床颇为类似,如美国加州的McLaughlin金矿床^[32]等,这类矿床的形成深度一般在数百米之内,而银山的成矿深度则稍大于团结沟金矿床。据笔者对银山矿区两个深孔(孔深分别为1510.15和1300.30m)进行系统采样测定的结果,在孔深1500m处的千枚岩样品仍然有矿化,可见银山的成矿深度至少可达1500m。银山的成矿温度和成矿流体的盐度总的来说也高于团结沟。

从本质上来说,银山成矿作用与岩浆活动之间的关系要比团结沟成矿作用与岩浆活动的关系密切得多。团结沟金矿形成于岩体冷却之后的地热活动,成矿作用与岩体侵位之间应有较大的时差;而银山矿床的两期矿化与两期次火山岩的对应关系比较清楚,分别发生在两期次火山岩的侵位之后。因此,银山成矿作用早期确有一定程度的岩浆水参与,而团结沟成矿作用则基本上没有岩浆水的参与。笔者认为,银山铜金多金属矿床的成矿环境应该介于浅成热液型与斑岩型两种成矿作用之间,是两者之间的过渡类型,亦即本文所称的“中成热液”矿床。

4 福建紫金山金-铜矿床

由于福建紫金山金-铜矿床发育有典型的石英-明矾石化蚀变等特征,因而被张德全等称为“我国大陆首例石英明矾石型浅成低温热液铜-金矿床”^[33]。它具有明显的上金下铜分布特征,金矿仅存于最浅部的数百米强硅化带内,其下的铜矿化带以脉状矿体为主,产于石英明矾石化带中。此外,在紫金山金-铜矿床的附近,还有斑岩型的中寮铜矿床,以及介于浅成热液与斑岩型之间的过渡型矿床——五子骑龙。紫金山金-铜矿床具有较典型的高硫亚类浅成热液矿床的特征,例如发育明矾石及高岭石(迪开石)、绢云母、重晶石等蚀变矿物,以及含较多的硫砷铜矿、蓝辉铜矿等^[34]。一般来说,参与

这类矿床的流体包括来源于深处的由岩浆排气作用产生的气体(Cl , CO_2 , H_2S , SO_2 等),以及它们上升至浅部后进入(溶入)的大气降水。正是由于大量的岩浆气体溶于大气降水,使大气降水演变为酸性的流体,并且使围岩发生强烈的酸性蚀变作用,形成以上述矿物为特征的前进泥化蚀变(advanced argillic alteration)。紫金山金-铜矿床的这一特征,与我国台湾省的金瓜石金-铜矿床^[35]及西南太平洋地区许多典型的高硫型浅成热液金-铜矿床十分相似。而这一类浅成热液矿床与斑岩型矿床之间的关系,显然要比团结沟金矿等低硫型浅成热液矿床与斑岩型矿床之间的关系更为密切。

从成矿流体的性质来看,如前所述,高硫型浅成热液金-铜矿床有大量岩浆挥发组分的加入,这也是它与低硫型浅成热液矿床的差别之一。但是,岩浆挥发组分的参与并不意味着高硫型浅成热液矿床的成矿流体来源于岩浆水。相反,大气降水仍应是它们的主要来源。关于紫金山金-铜矿床的成矿流体,张德全等^[34]认为主要是加热的大气降水;石礼炎等^[36]认为是深部岩浆房的岩浆气液与浅部地下水的混合;华仁民等^[37]认为主要是大气降水的环流。

前人与笔者关于紫金山金-铜矿床流体包裹体的研究表明,该矿床成矿流体的温度、盐度变化范围要比团结沟金矿的宽得多,但是其浅部金矿化的流体仍为低温、低盐度的大气降水。例如,张德全等的测定结果显示流体包裹体的盐度在0~21.6%之间,集中于4%~8%^[34],魏家秀等^[38]测定了紫金山铜-金矿床3个成矿阶段的成矿流体盐度,其中与金矿化有关的流体盐度较低(4.1%~0.1%),显示其大气降水来源。华仁民等^[37]测得的包裹体盐度主要在0.2%~12.8%之间。这些数据基本上反映了大气降水的特征。此外,紫金山金-铜矿床流体包裹体还有一些较高的温度和盐度测定值。如笔者等测定的某些蚀变花岗岩中石英脉的流体包裹体均一温度为340~405℃,盐度大多在20%以上。魏家秀等测定的早期铜矿化的流体包裹体均一温度为300~420℃,盐度为8.4%~5.3%,此外还测得一组高盐度(37.9%~28.3%)流体。这些特征都表明了成矿流体中有一定程度的岩浆水参与。

笔者曾对紫金山的两个钻孔岩芯进行系统采样并进行全岩氧同位素测定,其中位于铜矿化区(石英-明矾石蚀变带)ZK312孔的7个样的 $\delta^{18}\text{O}$ 值随深度的变化规律不明显,而位于金矿化区(强硅化带)的

ZK1117孔9个样的 $\delta^{18}\text{O}$ 值随深度的变化规律相当明显,从1268m深的终孔处向上至150m深处, $\delta^{18}\text{O}$ 值基本上逐渐升高,符合环流大气降水由下而上运移时与岩石反应后的氧同位素变化特征^[37]。两个钻孔的这一差异也反映出:铜矿化过程的流体有岩浆水参与,而金矿化过程的流体基本上只有大气降水。

5 结论

(1)从本文列举的若干典型矿床的特征、成因及成矿流体性质可以看出,黑龙江团结沟金矿床属于浅成热液矿床中的低硫型,与它类似的还有吉林五凤、刺猬沟金矿床等;福建紫金山金-铜矿床属于浅成热液矿床中的高硫型,与它同类的有台湾金瓜石金-铜矿床等;江西银山多金属矿床应属于浅成热液矿床与斑岩型矿床之间的过渡类型,与它类似的有闹枝金(铜)矿床、五子骑龙铜矿床等;而吉林的小西南岔、江西银山附近的铜厂、福建紫金山附近的中寮都是斑岩型矿床。它们都是在中国东部晚中生代火山-侵入岩带内发育的、与火山-浅成侵入活动有关的金、铜及多金属成矿作用产物,构成中国东部晚中生代斑岩-浅成热液金铜成矿体系,并成为中国东部成矿带、亦即西太平洋成矿带外带的重要组成部分。

(2)中国东部晚中生代斑岩-浅成热液金铜成矿体系的成矿流体以环流的大气降水为主导,而来自岩浆的、包括 H_2O 在内的挥发组分则不同程度地参与成矿流体。对于形成于地壳最浅部的低硫亚类浅成热液矿床来说,成矿流体基本上是大降水,岩浆挥发组分的参与很少。高硫亚类浅成热液矿床虽有相当多的岩浆挥发组分参与,尤其是硫主要来自岩浆,但成矿流体的主体仍然是大气降水。斑岩型矿床形成深度较大、温度较高、成矿过程的持续时间也较长,岩浆水在其早期热液蚀变中扮演了重要角色(如钾质蚀变),但到了中晚期,大气降水的作用愈来愈重要,而大量研究表明,在斑岩成矿过程中,铜和金的矿化恰恰形成于该过程的较晚阶段和相对较低的温度,也就是以大气降水为主导的环境^[39~42],而银山、闹枝这类介于斑岩矿床与浅成热液矿床之间的过渡类型显然也是以大气降水为主导地位的。

参 考 文 献

- 1 王德滋,等 中国东部橄榄安粗岩省火山岩特征及其成矿作用

- 地质学报, 1996, 70(1): 23
- 2 Wang D Z, et al. The Mesozoic Volcanic-Intrusive Complexes and Their Metallogenic Relation in East China. Beijing: Science Press, 1996
- 3 胡受奚, 等. 中国东部金矿地质地球化学. 北京: 科学出版社, 1999
- 4 华仁民, 等. 试论中国东部中生代成矿大爆发. 矿床地质, 1999, 18(4): 300
- 5 Corbett G J, et al. Pacific Gold-Copper Systems. A Workshop at the Pacrim Conference, New Zealand: Auckland, 1995
- 6 江维新, 等. 团结沟金矿主要地质特征及其成矿作用. 见: 金矿地质论文集. 北京: 地质出版社, 1986. 71~83
- 7 吴尚全. 黑龙江团结沟斑岩金矿中的草莓状白铁矿. 矿物与岩石, 1984, 4(4): 20
- 8 陈毓川, 等. 中国矿床成矿模式. 北京: 地质出版社, 1993. 76~80
- 9 陈诸麒, 等. 团结沟金矿矿石中黄铁矿化藻类化石群的发现及其地质意义. 南京大学学报(地球科学), 1992, 4(2): 77
- 10 Ren Q J, et al. Four types epithermal gold deposits in Mesozoic volcanic areas of eastern China. Resource Geology Special Issue, 1993, 16, 307
- 11 李舒, 等. 中国金矿床工业类型及其特征. 北京: 地震出版社, 1999. 114~134
- 12 陈振胜, 等. 团结沟金矿氧同位素组成特征与成矿关系的研究. 矿床地质, 1993, 12(1): 174
- 13 Hayba D O, et al. Geologic, mineralogic and geochemical characteristics of volcanic hosted epithermal precious metal deposits. In: Berger et al. eds. Geology and Geochemistry of Epithermal Systems, Reviews in Econ Geol, v2, 1985. 129~162
- 14 Heald P, et al. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: Acid-sulfate and adularia-senecite types. Econ Geol, 1987, 82(1): 1
- 15 Hedenquist J W. Mineralisation associated with volcanic related hydrothermal systems in the Circum Pacific Basin. In: Horn ed. Transactions 4th Circum Pacific Conference, Singapore, AAPG, 1987. 513~523
- 16 张脂侠, 等. 佳木斯地块北段岩金成矿条件研究. 见: 沈阳地质矿产研究所编, 中国金矿主要类型找矿方向与找矿方法文集. 第一辑. 北京: 地质出版社, 1994. 167
- 17 陈仁义, 等. 五凤浅成热液型金铜矿床地质特征及成矿机理研究. 矿床地质, 1993, 12(1): 20
- 18 芮宗瑶, 等. 吉林延边地区斑岩-浅成热液型金铜矿床. 矿床地质, 1995, 14(2): 99
- 19 叶庆同. 江西银山铅锌矿床原生矿化分带的初步研究. 中国地质科学院南京矿产地质研究所刊, 1983, 4(1): 1
- 20 李传明. 江西银山铜铅锌矿床特征. 地质与勘探, 1986, 22(6): 3
- 21 华仁民. 江西银山铅锌铜矿化机制的讨论. 矿床地质, 1987, 6(2): 90
- 22 郝正平. 江西银山多金属矿床的矿化分带. 矿床地质, 1988, 7(3): 3
- 23 林德松, 等. 江西银山矿床矿物包裹体研究. 矿产与地质, 1990, 4(3): 50
- 24 叶庆同. 赣东北铅锌矿床成矿系列和成矿机理. 北京: 北京科学技术出版社, 1987
- 25 沈渭洲, 等. 江西银山多金属矿床的稳定同位素研究. 南京大学学报(地球科学), 1991, 3(2): 186
- 26 何国朝, 等. 江西银山矿床的稳定同位素组成特征. 矿产与地质, 1992, 6(5): 406
- 27 吴志军. 江西德兴银山多金属矿床稳定同位素地球化学特征. 矿物岩石地球化学通报, 1998, 17(1): 28
- 28 华仁民, 等. 江西银山外围地层中金元素的地球化学降低场及其成矿意义. 矿床地质, 1993, 12(4): 289
- 29 张理刚, 等. 江西银山(铜)-铅锌-银矿床水岩体系氧同位素研究. 地质学报, 1996, 70(1): 48
- 30 Taylor H P Jr. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition. Econ Geol, 1974, 69: 843
- 31 华仁民, 等. 江西银山多金属矿床水-岩反应及成矿流体来源的讨论. 高校地质学报, 1995, 1(2): 37
- 32 Lehman N J. The McLaughlin Mine, Napa and Yolo Counties, California. In: Tingley, et al eds. Precious metal mineralization in hot spring systems, Nevada-California. NBMG Report 41, 1986. 85
- 33 张德全, 等. 福建紫金山金矿床——我国大陆首例石英脉型浅成低温热液铜-金矿床. 地质论评, 1991, 37(6): 481
- 34 张德全, 等. 紫金山铜金矿床蚀变和矿化分带. 北京: 地质出版社, 1992. 1~79
- 35 Tan L P. The Chinkuashuh gold-copper deposits, Taiwan. Soc Econ Geol Newsltr, 1991, 7: 22
- 36 石礼炎, 等. 福建紫金山次火山斑岩铜矿的成矿系列特征. 见: 中国地质学会矿床地质专业委员会编, 第五届全国矿床会议论文集. 北京: 地质出版社, 1993. 366
- 37 华仁民, 等. 福建紫金山矿床流体运移-反应模式及其氧同位素示踪研究. 地球化学, 1998, 27(2): 187
- 38 魏家秀, 等. 紫金山铜金矿床成矿流体与成矿模式. 矿床地质, 1998, 17(增刊): 1095
- 39 华仁民, 等. 德兴大型铜金矿集区构造环境和成矿流体研究进展. 地球科学进展, 2000, 15(5): 525
- 40 Beane R E. The magmatic-metamorphic transition. Geothermal Resources Council, Special Report, 1983, 13: 145
- 41 Reynolds T J, et al. Evolution of hydrothermal fluid characteristics at the Santa Rita porphyry deposit, New Mexico. Econ Geol, 1985, 80: 1328
- 42 Hedenquist J W, et al. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. Econ Geol, 1998, 93: 373