

花岗岩与金铜及钨锡成矿的关系*

张旗¹, 金惟俊¹, 王焰², 李承东³, 王元龙¹

(1 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640;
3 中国地质调查局天津地质矿产研究所, 天津 300170)

摘要 文章从对国内外若干与金铜钨锡矿床有关的花岗岩 Sr、Yb 含量的统计出发, 按照花岗岩新的分类, 归纳了花岗岩与成矿的关系。指出金铜成矿与埃达克型和喜马拉雅型花岗岩有关, 钨锡成矿与南岭型花岗岩有关。其原因主要取决于成岩和成矿的深度以及氧逸度条件。金铜和钨锡成矿的深度不同, 因此, 金铜和钨锡不可能在同时同地出现, 但可以叠加在一起。作者认为, 成岩和成矿是两回事, 成岩基本上是一个物理过程, 而成矿主要体现为化学反应; 成岩需要热, 而成矿需要热、流体以及合适的矿源 3 个条件, 缺一不可。在一个地区, 成岩作用可以很普遍, 但是, 成矿可能很局限。成岩与成矿有关不是成因有关而是时空有关。成矿与成岩同时、或成矿早于成岩、或晚于成岩, 都是合理的, 而区分含矿岩体和不含矿岩体可能是没有意义的。文中还讨论了金能否来源于围岩的问题及找矿思路的问题, 指出就矿找矿仍然是行之有效的找矿方法。

关键词 地质学; 花岗岩; 金矿; 斑岩铜矿; 钨锡矿; 成岩作用; 成矿作用

中图分类号: P618.51; P618.41; P618.67; P618.44

文献标志码: A

Relationship between granitic rocks and Au- Cu- W- Sn mineralization

ZHANG Qi¹, JIN WeiJun¹, WANG Yan², LI ChengDong³ and WANG YuanLong¹

(1 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong; China;

3 Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Tianjin 300170, China)

Abstract

Sr and Yb concentrations of granitic rocks related to Au- Cu- W- Sn mineralization in the world are summarized in this paper. According to the classification of Sr versus Yb for granitic rocks, the authors hold that Au- Cu mineralization may be associated with adakitic type and Himalayan type granitic rocks, whereas W- Sn mineralization may be related to Nanling- type granitic rocks. The crucial factors for different metallic ore deposits hosted in granitic rocks are formation depth and $f(O_2)$. Consequently, Au- Cu mineralization cannot be coexistent with W- Sn mineralization at the same time and in the same locality unless the two kinds of mineralization were superimposed on each other afterwards. It is considered that granitic rocks and related ore deposits might have been formed by two independent processes: the formation of granitic rocks was controlled by heat of source rocks, whereas the formation of ore deposits was controlled by three compulsory factors, i. e., heat, fluid and suitable metal sources. Therefore, ore mineralization is always restricted in certain localities. Au- Cu- W- Sn ore deposits may not have a direct genetic connection with the host granitic rocks. It is probable that ore deposits might have been formed earlier or later than or simultaneously with spatially associated granitic rocks.

Key words: geology, granitic rocks, gold deposit, porphyry Cu deposit, W- Sn deposit, lithogenesis, ore-forming process

* 本文得到中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室和国家自然科学基金重大研究计划(90714011和90714007)资助
第一作者简介 张旗, 男, 1937年生, 研究员, 岩石学和地球化学专业。Email: zq1937@sina.com

收稿日期: 2010-03-10; 改回日期: 2010-07-30, 张绮玲编辑。

花岗岩与成矿的关系是一个老问题,在学术界存在许多争论,虽然近几年有了一些进展,但困惑仍然不少。由于花岗岩与各种金属矿产有关,不同矿产形成条件不同,问题相当复杂。据初步印象,钼矿的成矿条件可能是最宽泛的,几乎与各种类型的花岗岩伴生,似乎无规律可循。相对来说,钨锡和金铜与花岗岩的关系比较明朗,因此,本文仅涉及金、铜、钨、锡4种矿产。而铅锌、REE、Nb、Ta和U矿等的形成条件似乎与钨锡比较接近,本文未予讨论。

花岗岩属于岩石学范畴,有它自己的研究方法和思路;矿床学不同于岩石学,也有它自己的研究方法和思路。花岗岩是各种火成岩中最复杂的,许多最基本的问题还没有搞清楚,矿床比花岗岩更复杂。一个地方得出来的花岗岩的结论,大体可以应用于其他许多地方;而一个地方得出来的成矿规律和模式,则很难一成不变地应用于另外的地方。花岗岩与成矿究竟是什么关系,学术界有不同的见解。本文仅从花岗岩的角度,从元素Sr、Yb统计的若干实例出发,不揣冒昧地谈一点与成矿有关的想法,期盼得到大家的指教。

1 花岗岩与金铜钨锡成矿的关系

本文讨论花岗岩与成矿的关系是从花岗岩新分类出发的,因此,先交代一下花岗岩的分类。

1.1 花岗岩的分类

花岗岩的分类有许多方案,笔者从埃达克岩的研究出发,提出了一个新的分类方案,按照花岗岩Sr和Yb的含量将花岗岩分为埃达克型、喜马拉雅型、浙闽型和南岭型花岗岩4类(张旗等,2006;2008;2010)。埃达克型花岗岩即埃达克岩,是Defant等(1990)提出来的。埃达克岩的提法在国内争论很大,本文将其改称为埃达克型花岗岩,以示其为具有独特地球化学特征的一类花岗岩(张旗等,2010)。最近,笔者统计了6000多个花岗岩数据,得出上述各类花岗岩区分的指标是:埃达克型花岗岩 $w(\text{Sr}) > 300 \times 10^{-6}$, $w(\text{Yb}) < 2.5 \times 10^{-6}$;喜马拉雅型花岗岩 $w(\text{Sr}) < 400 \times 10^{-6}$, $w(\text{Yb}) < 2 \times 10^{-6}$;浙闽型花岗岩 $w(\text{Sr}) < 400 \times 10^{-6}$, $w(\text{Yb}) > 1.5 \times 10^{-6}$ 和南岭型花岗岩 $w(\text{Sr}) < 100 \times 10^{-6}$, $w(\text{Yb}) > 1.5 \times 10^{-6}$ (图1)。从图1看,不同类型的花岗岩局部有重叠,表明不同类型花岗岩之间存在过渡的情况。

上述分类有什么意义?笔者解释其主要受花岗

岩形成压力的制约,依据的是花岗质熔体与残留相平衡的理论。如图2所示,与埃达克质岩浆平衡的是石榴子石,石榴子石出现的最小压力在0.8~1.0 GPa,斜长石消失的最小压力大约在1.2 GPa(图2B),因此,埃达克型花岗岩出现的最小压力应大于1.2 GPa(大多>1.5 GPa,有金红石出现,Xiong et al.,2005)。与喜马拉雅型花岗岩浆平衡的残留相是斜长石+石榴子石(0.8~1.4 GPa),与浙闽型花岗岩浆平衡的残留相主要是斜长石(<0.8~1.0 GPa),与南岭型花岗岩浆平衡的残留相为富钙的斜长石(<0.8 GPa)。不同残留相的出现与各种因素有关,如源区组成、温度、压力、水和挥发分等等,但是,最主要的是压力(张旗等,2008)。因此,该分类的意义和作用主要反映了花岗岩形成时源区所在的深度和压力不同(图2)。

因此,根据上述4类花岗岩的时空分布即可知道一个地区(不论大小)地壳厚度的变化(前提是花岗岩形成于下地壳底部,不包括与板块俯冲有关的花岗岩),从而有助于探寻地质历史上曾经出现过(现已消失)的高原和山脉,对于找矿也有所帮助(张旗等,2008;2009b)。

1.2 埃达克型花岗岩与斑岩铜矿的关系

埃达克型花岗岩与斑岩铜矿有关已经是尽人皆知了。最近,冷成彪等(2007a)统计了中国26个大中型斑岩铜矿,发现其中的25个与埃达克型花岗岩有关,说明埃达克型花岗岩与斑岩铜矿相关的几率可达95%左右。在地质研究领域,如此高的几率罕见,说明这种关系的可靠性不容置疑。图3展示了中国若干斑岩铜矿的斑岩(和花岗岩)的Sr-Yb关系,从图3看,斑岩铜矿的斑岩绝大多数是埃达克型花岗岩,只有少数落入喜马拉雅型范围,如冈底斯(图3的红色实心方块),推测可能是蚀变作用使Sr含量降低导致的(见后面的讨论)。新疆东准最近在斑岩铜矿找矿上取得很大的进展,从图3看,东准的样品大多落入埃达克型范围,部分落入浙闽型范围(图3中的蓝色实心三角),推测有可能包括了与成矿有关和无关的不同时代和不同类型的花岗岩。甘肃北山和镜铁山的斑岩(图3的紫色实心圆)Sr含量普遍偏低,少数落入埃达克型范围,多数位于喜马拉雅型和浙闽型的过渡范围,原因不详。有没有例外的情况呢?有,如余宏全等(2007)报道的青海乌兰乌珠尔斑岩铜矿的例子,样品大多落入浙闽型和南岭型花岗岩范围(图3)。花岗斑岩为印支期的(215

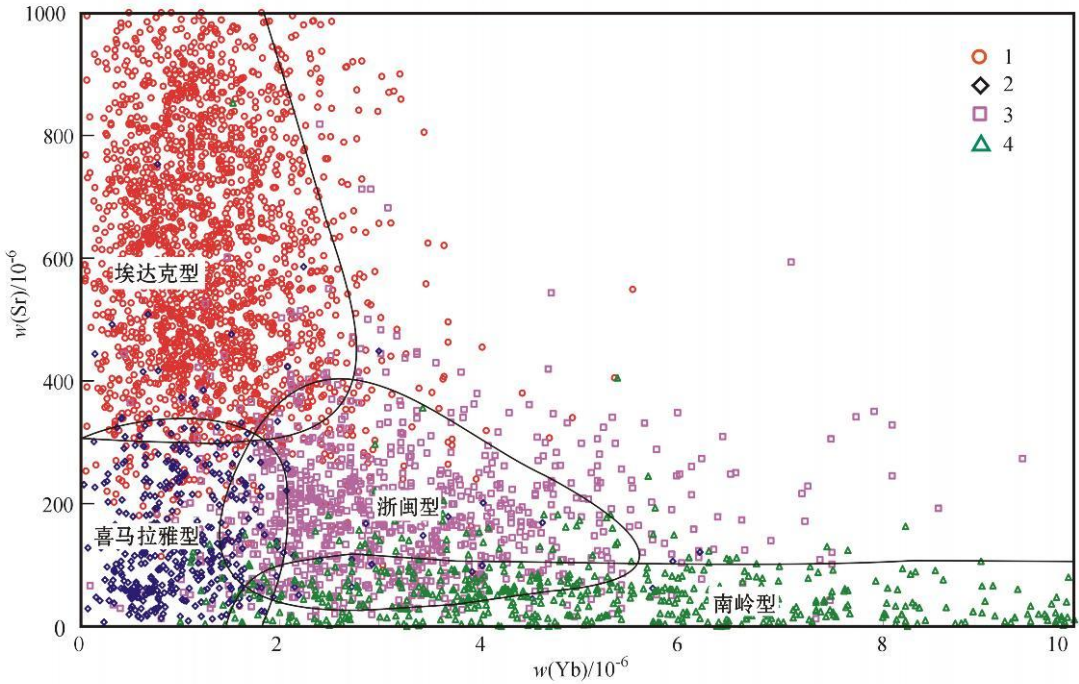


图 1 花岗岩按照 Sr- Yb 含量的分类(张旗等,2010)

1-埃达克型花岗岩; 2-喜马拉雅型花岗岩; 3-浙闽型花岗岩; 4-南岭型花岗岩

Fig. 1 Classification of granitic rocks based on whole- rock Sr and Yb content

1-Aadakite- type granite; 2-Himalayan- type granites; 3-Zhemian- type granite; 4-Nanling- type granite

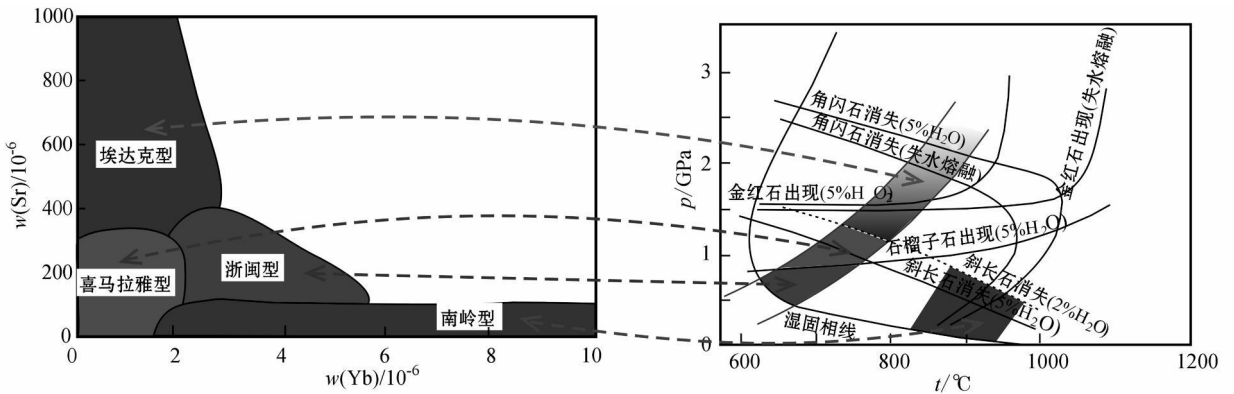


图 2 花岗岩的 Sr- Yb 分类图(A, 据本文)和相应的相图(B, 据 Xiong et al., 2005)

不同类型花岗岩与其在相图中所处的位置分别以虚线连接

Fig. 2 Variation of Sr and Yb content of different granitic rocks (A) and corresponding p- t conditions (B, after Xiong et al., 2005)

Different types of granitic rocks are distributed in different fields of p- t phase diagrams are connected byh dashed lines

M a), 但是, 据该作者报道, 矿区还有锡矿产出, 铜矿和锡矿在该区同时出现, 各自成为独立的矿体, 铜矿和锡矿的时代不清楚, 是否该斑岩与锡矿有关, 需要进一步研究。

1.3 花岗岩与金矿的关系

与金矿有关的花岗岩包括埃达克型和喜马拉雅型两类。中国的许多原生金矿, 不论是蚀变岩型、韧

性剪切带型、破裂带型、石英脉型、低温热液型和卡林型, 大多与岩浆岩有关(包括基性和中酸性的岩浆岩)。如果是中酸性岩浆岩, 大多为埃达克型和喜马拉雅型花岗岩, 例外的情况很少(见后面的讨论)。如胶东、小秦岭、冀北、西秦岭、北祁连、北山、新疆、内蒙古和黑龙江等地的实例(图 4)。

胶东是中国埃达克型花岗岩出露广泛的地区之

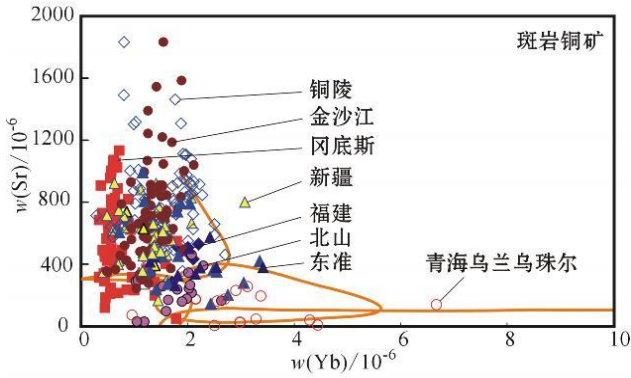


图3 中国若干斑岩铜矿的斑岩的 Sr- Yb 图

蓝色实心菱形—福建紫金山(赵希林, 2007); 红色实心方块—冈底斯及西藏西部(李冰等, 2007; Guo et al., 2007; 曲晓明等, 2006a; 2006b); 黄色实心三角—新疆(Shen et al., 2009; 唐功建等, 2009; 张连昌等, 2006); 蓝色实心三角—东准(冯京等, 2009); 紫色实心圆—北山和镜铁山(游小毛, 1999; 戴霜等, 2002; 张兰英等, 2008); 蓝色空心菱形—铜陵和德兴(Wang et al., 2006a; 2006b; 王云健等, 2007; 王强等, 2002, 2004; 李进文等, 2007; 黄顺生等, 2004); 棕色实心圆—云南和藏东(李立主等, 1995; 冷成彪等, 2007b; Hou et al., 2003; 王治华等, 2009; 徐受民等, 2006; 曹殿华等, 2009; 曾普胜等, 2006); 红色空心方块—青海乌兰乌珠尔斑岩铜(锡)矿(余全等, 2007)

Fig. 3 Sr versus Yb plot of host granitic rocks of porphyry Cu deposits in China

Legends: Blue solid diamond—Zijinshan Mountain of Fujian (Zhao, 2007); Red solid box—Gangdise and west Tibet (Li et al., 2007; Guo et al., 2007; Qu et al., 2006a; 2006b); Yellow solid triangle—Xinjiang (Zhang et al., 2006; Shen et al., 2009; Tang, 2009; Zhang L C et al., 2006); Blue solid triangle—East Junggar of Xinjiang (Feng et al., 2009); Purple solid circle—Beishan and Jingtieshan of Gansu (You, 1999; Dai et al., 2002; Zhang et al., 2008); Blue open diamond—Tongling and Dexing (Wang et al., 2006a; 2006b; Wang Y J et al., 2007; Wang et al., 2003; 2004; Li et al., 2007; Huang et al., 2004); Brown solid circle—Yunnan and east Tibet (Li et al., 1995; Leng et al., 2007b; Hou et al., 2003; Wang et al., 2009; Xu et al., 2006; Cao et al., 2009; Zeng et al., 2006); Red open square—Wulanwuzhu'er porphyry copper (Sn) deposit of Qinghai (She et al., 2007)

一, 时代从 160~ 113 Ma, 大体包括了 3 个时期: 早期为玲珑和昆崙山花岗岩, 160~ 140 Ma 左右; 中期为郭家岭花岗岩(130~ 125 Ma); 晚期为三佛山和伟德山等花岗岩(120~ 113 Ma)。胶东也是中国金矿最大的聚集区, 金矿与埃达克型花岗岩密切伴生, 金矿时代大多集中在 130~ 110 Ma, 与郭家岭和三佛山两期埃达克型花岗岩有关。

小秦岭金矿成因有争论。小秦岭金矿主要是石英脉型的, 几乎统统集中于太华群中。小秦岭有许

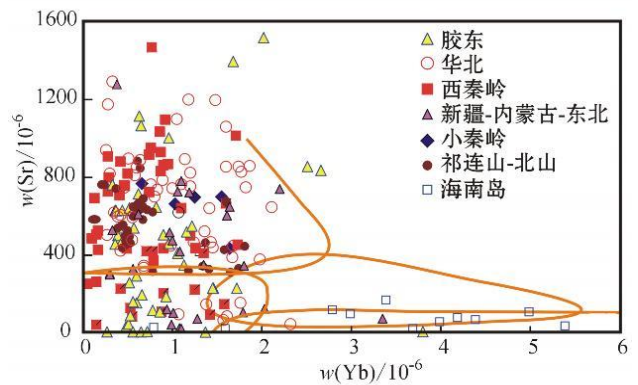


图4 中国若干与金矿有关的花岗岩的 Sr- Yb 图

蓝色实心菱形—小秦岭(罗铭玖等, 2000); 红色实心方块—胶东(张华锋等, 2006; Hou et al., 2007; 凌洪飞等, 2002; 杨进辉等, 2003); 黄色实心三角—西秦岭(朱赖民等, 2009; 吴春俊等, 2009; 王娟等, 2008; 金治鹏等, 2004; 邱庆伦等, 2008); 褐色实心圆—祁连山—北山(王金荣等, 2005; 2006; 刘明强, 2007; 刘志武等, 2007; 黄增保等, 2005); 紫色实心三角—新疆—内蒙古—黑龙江(熊小林等, 2001; 高阳等, 2009; 石玉若等, 2005; 张炯飞等, 2004; 陈斌, 2002); 红色空心圆—华北(Trumbull et al., 1996; 李承东等, 2004; 苗来成等, 2003; 刘文斌等, 2003); 蓝色空心方块—海南岛(谢才富等, 2006)

Fig. 4 Plot of Sr versus Yb for host granitic rocks of gold deposits in China

Legends: Blue solid diamond—Xiaoqinling (Luo et al., 2000); Red solid square—Jiaodong (Zhang H F et al., 2006; Hou et al., 2007; Ling et al., 2002; Yang et al., 2003); Yellow solid triangle—West Qinling (Zhu et al., 2009; Wu et al., 2009; Wang et al., 2008; Jin et al., 2004; Qiu et al., 2008); Brown solid circle—Qilian-Beishan (Wang et al., 2005; 2006; Liu M Q, 2007; Liu Z W et al., 2007; Huang et al., 2005); Purple solid triangle—Xinjiang—Inner Mongolia—Heilongjiang (Xiong et al., 2001; Gao et al., 2009; Shi et al., 2005; Zhang et al., 2004; Chen et al., 2002); Red open circle—North China (Trumbull et al., 1996; Li et al., 2004; Miao et al., 2003; Liu et al., 2003); Blue open square—Hainan Island (Xie et al., 2006)

多埃达克型花岗岩, 如文峪、华山和娘娘山等, 但空间上与金矿是分开的(图 5)。许多人认为金矿处于太华群中, 太华群是金矿的物源区, 金矿与中生代花岗岩无关。但是, 金矿成矿时代集中在 132~ 126 Ma(徐启东等, 1998; 王义天等, 2002), 为早白垩世, 而小秦岭花岗岩的 SHRIMP 年龄在 127~ 157 Ma 之间(如文峪 138 Ma, 娘娘山 142 Ma, 据毛景文等, 2005), 说明小秦岭金矿与上述埃达克型花岗岩的侵位可能是有关的。金通常是深源的, 不大可能源于太华群, 虽然金矿大多产于太华群中(详见后述)。金矿的定位与来源不是一回事, 应当分别考虑。

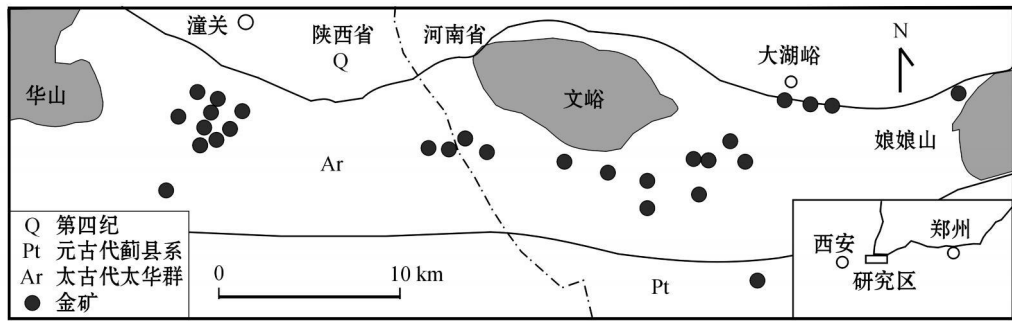


图 5 小秦岭埃达克型花岗岩与金矿分布图(据罗铭玖等, 2000)

实心圆—金矿; Q—第四系; Pt—元古界蓟县系; Ar—太古界太华群

Fig. 5 Distribution of adakites and gold deposits in Xiaoqinling area (modified after Luo et al., 2000)

Solid circle— Gold deposits; Q—Quaternary; Pt—Proterozoic Jixian System; Ar—Archean Taihua Group

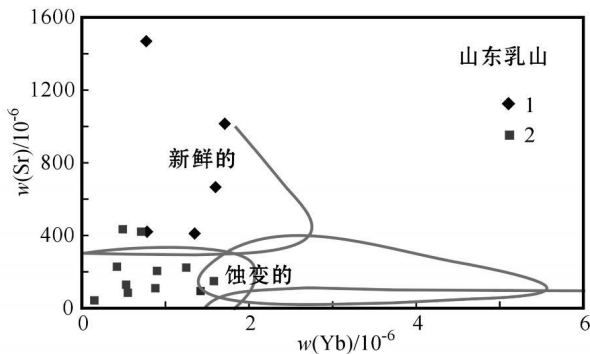


图 6 山东乳山金矿新鲜的和蚀变的花岗岩的 Sr- Yb 图

(资料据凌洪飞等, 2002)

1—新鲜的样品; 2—蚀变的样品

Fig. 6 Plot of Sr versus Yb for fresh and altered granitic rocks from the Rushan gold deposit in Shandong

(after Ling et al., 2002)

1—Fresh samples; 2—Altered samples

笔者说小秦岭金矿与埃达克型花岗岩有关是从金的来源角度考虑的。

喜马拉雅型花岗岩与金矿有关是从冀北的实例中最早发现的(李承东等, 2004)。从图 4 看, 大多数与金矿有关的花岗岩都是埃达克型的, 部分为喜马拉雅型, 这可以分 2 种情况: ①金矿与喜马拉雅型花岗岩有关, 这样的实例不少, 如冀北的峪耳崖、青山口和牛心山花岗岩(李承东等, 2004)、甘肃阳山斜长花岗岩(吴春俊等, 2009)、甘肃夏河花岗岩(邱庆伦等, 2008)和黑龙江宝山花岗岩(高阳等, 2009)等。②金矿与埃达克型花岗岩有关, 部分样品落入喜马拉雅型范围可能是蚀变作用所致, 如胶东金青顶和大尹格庄金矿花岗岩(凌洪飞等, 2002, 图 6)。研究

表明, 蚀变作用对花岗岩 Sr 和 Yb 的含量有明显的影响。例如, 强烈的钾化、绢英岩化、硅化会降低花岗岩中斜长石的牌号, 暗色矿物流失, 从而使花岗岩中 Sr 和 Yb 含量不同程度地降低。在山东乳山, 新鲜花岗岩的 $w(\text{Sr})$ 很高, 在 $411 \times 10^{-6} \sim 1469 \times 10^{-6}$ 范围, 为埃达克型的; 而蚀变花岗岩的 $w(\text{Sr})$ 急剧下降, 为 $49 \times 10^{-6} \sim 223 \times 10^{-6}$ (凌洪飞等, 2002), 落入喜马拉雅型范围(图 6)。

此外, 还有一类与金矿有关的花岗岩落入浙闽型和南岭型范围, 如海南岛印支期的尖峰岭黑云母正长花岗岩(谢才富等, 2006), 为典型的 A 型花岗岩(图 4 的蓝色空心方块, 南岭型)。抱伦金矿位于尖峰岭岩体外接触带, 属热液石英脉型金矿, 过去一直认为金矿与尖峰岭岩体有关, 张小文等(2009)最近的研究得出了抱伦金矿热液锆石的年龄为 112 Ma, 是早白垩世成矿的。看来, 抱伦金矿未必与南岭型的尖峰岭花岗岩有关(详见后述)。

本文还收集了一些国外金矿的实例(如墨西哥、菲律宾、加拿大、西班牙、印度、保加利亚和巴西等), 与国内的实例类似, 金矿均与埃达克型和喜马拉雅型花岗岩有关(图 7A)。其中, 巴西的实例很有意思。巴西 Amazon 克拉通有一个著名的 Tapajos 金矿省(Tapajos Gold Province), 近 45 年已采金逾 600 吨(Lamarao et al., 2002)。图 7B 展示了该区花岗岩和火山岩在 Sr- Yb 图上的分布, 资料来自两篇文章, 研究的是同一地区, 但是, 不同作者得出的结论完全不同。按照 Lamarao 等(2002)的研究, 该区花岗岩和火山岩分为 2 组: 早期的年龄在 2000~1981 Ma 之间, 从图中看, 大多数落入埃达克型和喜马拉雅型花岗岩范围; 晚期的年龄在 1890~1875 Ma 之

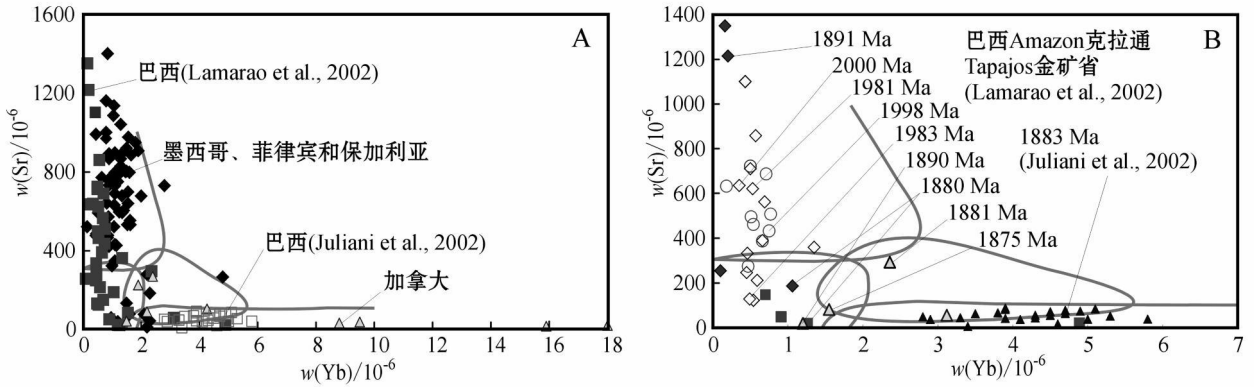


图7 国外与金和金铜矿床有关的花岗岩的Sr-Yb图(A)和巴西Tapajos金矿省花岗岩和火山岩的Sr-Yb图(B)

A. 实心菱形—墨西哥、菲律宾和保加利亚的花岗岩 (Meza et al., 2003; Gonzalez et al., 2003; Bellon et al., 2001; Chambefort et al., 2007); 实心方块—巴西Tapajos金矿省的花岗岩 (Lamarao et al., 2002); 空心方块—巴西Tapajos金矿省的花岗岩 (Juliani et al., 2002); 实心三角—加拿大的花岗岩 (Yang et al., 2008)。B. 巴西Tapajos金矿省的资料。空心菱形—时代较早的花岗岩(1 981~ 1 983 Ma); 实心三角—时代较晚的花岗岩(1 890~ 1 875 Ma); 空心圆—时代较早的火山岩(2 000~ 1 998 Ma); 实心方块—时代较晚的火山岩(1 880 Ma); 实心菱形—巴西Tapajos金矿省与金矿有关的花岗岩(以上据Lamarao et al., 2002)。实心三角—Batalha花岗岩(据Juliani et al., 2002)

Fig. 7 Plot of Sr versus Yb for granitic rocks in the world (A) and granitic rocks and lava flows in the Tapajos Gold Province, Brazil (B)

A. Solid diamond—Granites from Mexico, Philippines and Bulgaria (Meza et al., 2003; Gonzalez et al., 2003; Bellon et al., 2001; Chambefort et al., 2007); Solid square—Granite of Tapajos Gold Province, Brazil (Lamarao et al., 2002); Open square—Granite of Tapajos Gold Province, Brazil (Juliani et al., 2002); Solid triangle—Granites from Canada (Yang et al., 2008). B. Data of Tapajos Gold Province in Brazil. Open diamond—Earlier granites (1 981~ 1 983 Ma); Solid triangle—Late granite (1 890~ 1 875 Ma); Open circle—Earlier volcanic rock (2 000~ 1 998 Ma); Solid square—Late volcanic rocks (1 880 Ma); Solid diamond—Granitoids related to gold mineralization in Tapajos Gold Province, Brazil (after Lamarao et al., 2002); Solid triangle—Batalha granites (after Juliani et al., 2002)

间,样品数量较少,主要是南岭型或浙闽型的。与金矿有关的是Sao Jorge和Jardim do Ouro花岗岩,Sao Jorge花岗岩分为早、晚2期,金矿与晚期的Sao Jorge花岗岩有关,SHRIMP年龄为1 891 Ma,在图7B落入埃达克型和喜马拉雅型区域(实心菱形)。Juliani等(2002)研究了同一个地区,认为与金矿有关的是Batalha花岗岩,落入南岭型范围,时代为1 883 Ma。Lamarao等(2002)的结论与本文的认识符合,而Juliani等(2002)的结论与本文不合。看来,该区还需更加仔细地研究。按照Lamarao等(2002)的资料,该区绝大多数中酸性火山岩和花岗岩属于埃达克型和喜马拉雅型花岗岩,代表加厚的地壳〔全岩样品K与Na(质量分数)相当或 $K > Na$,属于高钾钙碱性和钾玄岩系列,是下地壳底部形成的〕,只有1 883~ 1 875 Ma(均为SHRIMP年龄)的火山岩具有南岭型花岗岩的特征,表明在该区岩浆活动即将结束时地壳减薄了。与金矿有关的Sao Jorge花岗岩是1 891 Ma侵入的埃达克型花岗岩(图7B),代表了地壳加厚晚期的事件。

Yang等(2008)最近报道了加拿大一个与金矿有关的花岗岩的资料,该文的结论与本文完全不同。

按照该文作者的描述,在加拿大阿帕拉契亚造山带西南的New Brunswick存在2类花岗岩:一类是晚志留世—早泥盆世的(423~ 396 Ma),为花岗闪长岩和二长花岗岩组合(GMS),另一类为晚泥盆世的(370~ 360 Ma)花岗岩组合(GS)。按照本文的分类,前者属于浙闽型(部分样品落入喜马拉雅型,其是否有意义不清楚),后者属于南岭型(图8)。该文作者认为两类花岗岩均与金矿成矿有关。该区金矿属于斑岩型,该文未提供金矿的年龄资料,想必认为金矿成矿与侵入岩同时。笔者认为有2种可能:①作者的结论是对的,该结论恰恰与本文的结论相反,说明金矿成矿的复杂性,也许在特定的情况下金铜与浙闽型和南岭型花岗岩有关,可以产于减薄的地壳。这也许是一个特例,需要进行更深入的研究。②该区花岗岩与成矿的关系可能还没有搞清楚,需要查明时代跨越近60 Ma的两个阶段的花岗岩中究竟哪个时代的花岗岩是与金矿成矿有关的,需要精确测定花岗岩的时代和金矿成矿的时代。如果金矿时代与上述花岗岩时代接近,作者的结论是对的;如果金矿时代不同于花岗岩,则需另外考虑金矿的成因及其与花岗岩的关系。

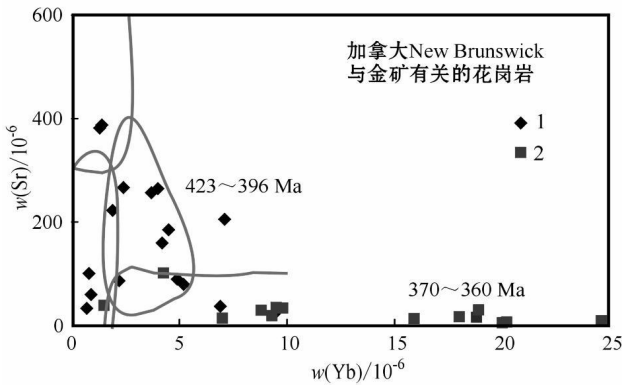


图 8 加拿大 New Brunswick 与金矿有关的花岗岩的 Sr-Yb 图(资料据 Yang et al., 2008)

1—晚志留世—早泥盆世花岗岩闪长岩—二长花岗岩组合;
2—晚泥盆世花岗岩组合

Fig. 8 Plot of Sr versus Yb for host granitic rocks of gold deposits in New Brunswick, Canada(data from Yang et al., 2008)

1—Late Silurian— Early Devonian granodiorite— monzogranite;
2—Late Devonian granites

1.4 花岗岩与卡林型金矿的关系

卡林型金矿与花岗岩是否有关存在争论, 中国学者大多主张两者无关, 而国外(如美国)多数学者认为卡林型金矿与中酸性岩浆岩有关。如著名的美国内华达州卡林型金矿, 除常见脉岩外还有侵入岩和火山岩发育。美国的卡林型金矿是始新世的(42~36 Ma), 与始新世的火山岩和浅成侵入岩有关。非常有趣的是, 这些侵入岩和火山岩大多具有埃达克型花岗岩的特征, 少数是喜马拉雅型的(图 9, $w(\text{Sr}) 55 \times 10^{-6} \sim 892 \times 10^{-6}$, $w(\text{Yb}) 0.9 \times 10^{-6} \sim 2.2 \times 10^{-6}$, 据 Ressel et al., 2006)。有些矿区未见浅成侵入体, 推测深部有隐伏岩体, 如图 10 所示(Ressel et al., 2006)。说卡林型金矿与岩浆岩有关的最简单的理由是, 岩浆可以提供中低温金矿(160~300℃)的热源。

卡林型金矿与埃达克型花岗岩和喜马拉雅型花岗岩有关是一个很有意思的发现, 国外并不了解这一点。它说明, 内华达卡林型金矿形成的始新世期间地壳较厚, 处于挤压造山阶段, 而中新世的流纹岩为南岭型(图 9), 表明地壳减薄了。金矿与加厚的地壳有关, 与本文的认识一致。

在中国, 西秦岭的许多印支期金矿是卡林型的(如大型和特大型的甘肅阳山、大水、陕西双王和八卦庙金矿等), 它们与岩浆岩是否有关有争论, 中国

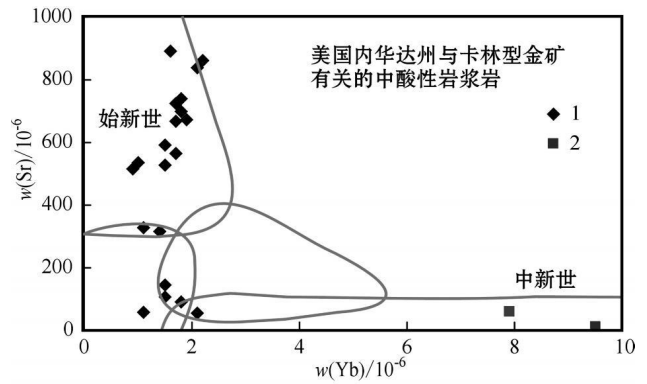


图 9 美国内华达州与卡林型金矿有关的中酸性火山岩和侵入岩的 Sr-Yb 图(Ressel et al., 2006)

1—始新世中酸性火山岩和侵入岩; 2—中新世流纹岩

Fig. 9 Plot of Sr versus Yb for intermediate to felsic intrusive and volcanic rocks related to Carlin-type gold deposits in Nevada, USA (after Ressel et al., 2006)

1—Eocene intermediate-acidic volcanic rocks and intrusive rocks; 2—Miocene rhyolites

学者大多主张与岩浆活动无关, 但资料表明, 它们与侵入岩是密切相关的(张旗等, 2009a)。西秦岭与金矿有关的印支期花岗岩大多具有埃达克型和喜马拉雅型花岗岩的特征(图 11), 其中陕南的印支期花岗岩大多为埃达克型, 除了姜家坪和曹坪的部分样品外(图 11B)。

强调这些卡林型金矿与埃达克型和喜马拉雅型花岗岩有关, 是从矿床与岩浆岩的时空分布得出来的, 但是, 笔者更强调矿液来源。就金的地球化学属性而言, 它主要源于地幔和玄武岩, 因此, 金主要是深源的。卡林型金矿不论与岩浆岩距离远近, 说它们总是与岩浆岩有关是从金的来源说起的, 而这个岩浆岩应当是埃达克型或喜马拉雅型花岗岩。因为, 埃达克型和喜马拉雅型花岗岩与金一样, 需要高温、高压和高氧逸度条件。有人认为卡林型金矿的金是源于围岩碳酸盐岩或硅质沉积岩, 这种说法是靠不住的(罗照华等, 2009)。

陕甘川卡林型金矿如此, 滇黔桂卡林型金矿呢? 是否也与花岗岩有关? 金是深源还是浅源的? 葛良胜等(2009)有很好的归纳, 有兴趣的读者可以参考。

那么, 金是否都是深源的, 全球金矿是否都与埃达克型和喜马拉雅型花岗岩有关? 答案是: 有可能。因为, 金如果是一次来源的, 必定与深源有关, 与深源有关不一定非得埃达克型和喜马拉雅型花岗岩, 玄武岩和煌斑岩也是深源的, 有些金矿与玄武岩和煌

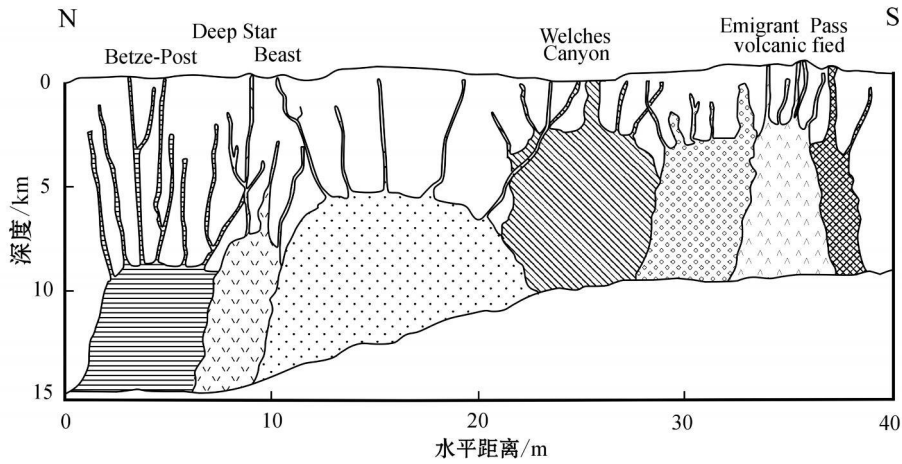


图 10 美国内华达州卡林矿带北-中部剖面示意图,地质和航磁异常表明,北部始新世侵入体埋藏比南部更深,卡林矿区内的岩墙源于深部的侵入体(据 Ressel et al., 2006)

Fig. 10 Schematic (not vertically exaggerated) cross section of interpreted Eocene plutons beneath the northern and central Carlin trend. The cross section runs approximately from north to south. Geological and aeromagnetic data suggest that plutons in the north lie at greater depths than plutons in the south. Dikes of the Carlin trend are apophyses from these plutons (after Ressel et al., 2006)

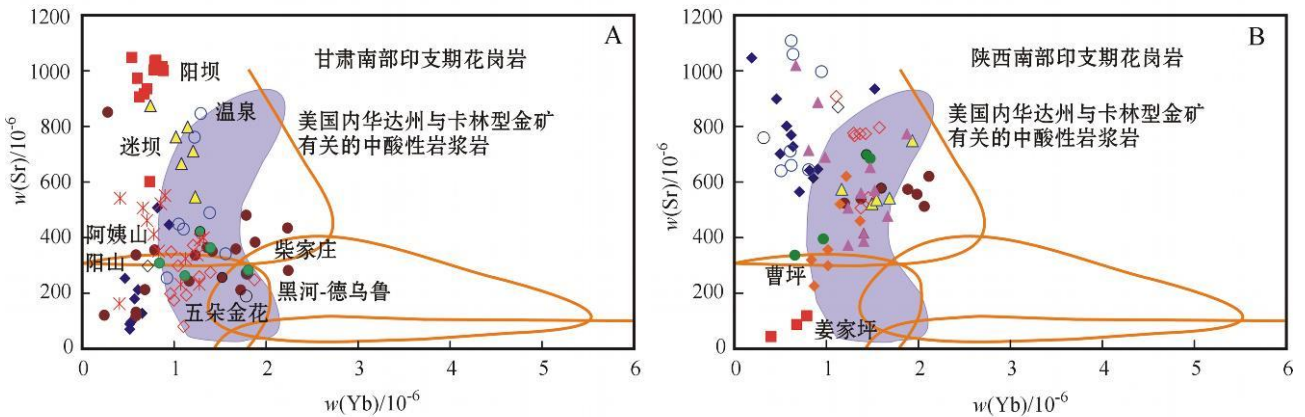


图 11 甘肃南部(A)和陕西南部(B)印支期花岗岩 Sr- Yb 图

A. 蓝色实心菱形—阳山; 红色实心方块—阳坝; 黄色实心三角—迷坝; 橙色实心圆—柴家庄; 红色空心菱形—五朵金花; 蓝色空心圆—温泉; 绿色实心圆—黑河-德乌鲁; 红色星号—阿姨山(资料引自张旗等, 2009)。紫色区域示美国内华达州与卡林型金矿有关的中酸性火山岩和侵入岩的范围(据 Ressel et al., 2006)。B. 蓝色实心菱形—光头山; 红色实心方块—姜家坪; 黄色实心三角—新院; 绿色实心圆—东河台子; 紫色实心圆—张家坝; 红色空心菱形—沙河湾; 蓝色空心圆—五龙; 棕色实心菱形—曹坪; 紫色实心三角—西坝(资料据张成立, 个人通讯)。紫色区域示美国内华达州与卡林型金矿有关的中酸性火山岩和侵入岩的范围(据 Ressel et al., 2006)

Fig. 11 Plot of Sr versus Yb for granitic rocks related to gold deposits in southern Gansu (A) and Shaanxi Provinces (B)
A. Blue solid diamond—Yangshan; Red solid square—Yangba; Yellow solid triangle—Miba; Orange solid circle—Caijiazhuang; Red open diamond—Wudujinhua; Blue open circle—Wenquan; Green solid circle—Heihe—Dewulu area; Red asterisk—Ayishan (after Zhang et al., 2009). B. Blue solid diamond—Guantoushan; Red solid square—Jiangjiaping; Yellow solid triangle—Xingyuan; Green solid circle—Donghetaizi; Purple solid circle—Zhangjiaba; Red open diamond—Shahewan; Blue open circle—Wulong; Brown solid diamond—Caoping; Purple solid triangle—Xiba (after Zhang, personal communication). Purple regions both A and B indicate the range of Carlin-type gold deposits related to intermediate-acid volcanic rocks and intrusive rocks in Nevada, west America (after Ressel et al., 2006)

斑岩有关也是合理的。金有二次来源,即次生金矿,如砂金和含金砾岩。可可西里上个世纪末曾经发生过疯狂的淘金热,数万人集中在高寒不毛之地,当然淘的是砂金。砂金源于何处?后来发现可可西里存在许多埃达克型斑岩和火山岩,才明白原来根源在此。砂金由于长时间的风蚀水浸,地幔和深源信息早已消失殆尽,留下的只是浅源的信息。现代有砂矿,古代也有砂矿,古代的砂矿不就是沉积型金矿

吗?那的确确实是没有任何深源信息的。因此,现在所见到的金矿是否有深源信息不是关键,如果金矿没有,追根溯源,也不能说它原来没有。

1.5 花岗岩与钨锡成矿的关系

很早就知道,钨锡与 A 型花岗岩关系密切,如中国南方的许多实例(图 12)。从图 12 看,绝大部分与钨锡有关的花岗岩均具有南岭型花岗岩的特点,说明成矿与地壳减薄事件有关。例外的实例

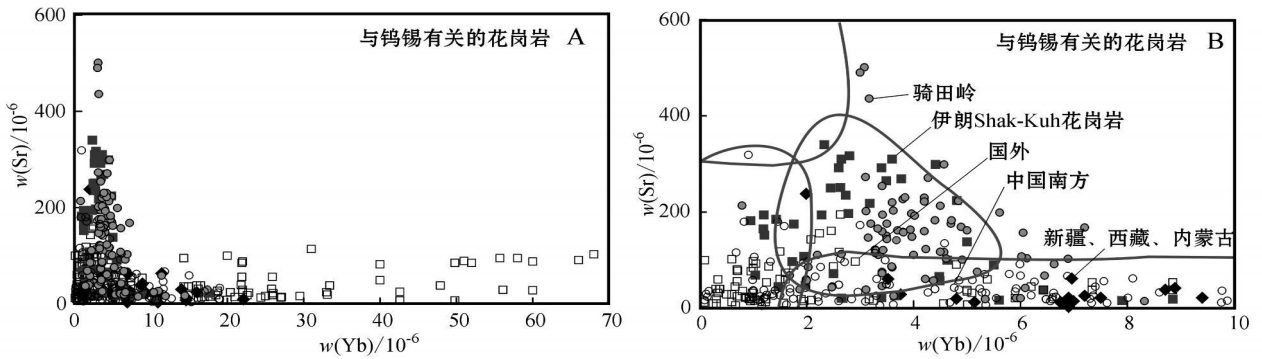


图 12 与钨锡成矿有关的花岗岩的 Sr- Yb 图

A. 所收集的全部数据, B. 仅截取 $w(Yb) < 10 \times 10^{-6}$ 的数据

图例: 空心圆—中国南方(包括大厂、芒厂、锡田、黄沙坪、王仙岭、大义山、骑田岭、花山、姑婆山、个旧、赣东北灵山、赣南天门山、大吉山、漂塘等;资料来源:陈富文等,2005;马铁球等,2004;余阳春等,2006;蔡明海等,2004a;2004b;姚军明等,2005;柏道远等,2007;汪雄武等,2004;付建明等,2006;邓希光等,2005;Li Z L et al., 2007;顾昆彦等,2006;朱金初等,2006;王永磊等,2007;程彦博等,2008;章平等,2005;华仁民等,2003;丰成友等,2007;陈文伦等,1999;戴传国等,2000;梁国宝,2008;伍光英等,2005); 实心圆—骑田岭(汪雄武等,2004;付建明等,2006;邓希光等,2005;Li Z L et al., 2007;顾昆彦等,2006;朱金初等,2006); 实心菱形—新疆、内蒙古、西藏(王治华等,2006;唐红峰等,2007;赵东林等,1997;吴宏恩等,2008;李永军等,2009); 空心方块—国外含锡或钨锡花岗岩(如吉尔吉斯斯坦南天山,据 Konopelko et al., 2009; 伊朗 Shak-Kuhn, 据 Esmaily et al., 2005; 西班牙伊比利亚中带的 Jalama 岩基,据 Ruiza et al., 2008; 葡萄牙中部 Gouveia 花岗岩,据 Neiva et al., 2009; 巴西 Amazonas 地区 Pitinga 锡矿,据 Lenharo et al., 2002; Costil et al., 2002; 纳米比亚 Spitzkoppe 和 Klein Spitzkoppe 花岗岩,据 Haapala et al., 2007; 加拿大 Nova Scotia 省 Davis 湖花岗岩,据 Dostal et al., 1995; 泰国北部 Muang Yao 花岗岩, Yokart et al., 2003; Raith, 1995; 葡萄牙北部 Ervedosa 花岗岩,据 Gomes et al., 2002; 巴西 Pitinga 和 Goias 奥长环斑花岗岩,据 Lenharo et al., 2002); 实心方块—伊朗 Shak-Kuhn 花岗岩(Esmaily et al., 2005)

Fig. 12 Plot of Sr versus Yb related to W-Sn ore deposits

A. All data collected; B. Only data of $w(Yb) < 10 \times 10^{-6}$ collected

Legends: Open circle—South China (including Dachang, Mangchang, Xitian, Huangshaping, Wangxianling, Dayishan, Qitianling, Huashan, Guposhan, Gejiu, Linshan of northeast Jiangxi, Tianmenshan, Dajishan, Piaotang of south Jiangxi; Data source: Chen F et al., 2005; Ma et al., 2004; Yu et al., 2006; Cai et al., 2004a; 2004b; Yao et al., 2005; Bo et al., 2007; Wang et al., 2004; Fu et al., 2006; Deng et al., 2005; Li ZL et al., 2007; Gu et al., 2006; Zhu et al., 2006; Wang Y et al., 2007; Cheng et al., 2008; Zhang et al., 2005; Hua et al., 2003; Feng et al., 2007; Chen W et al., 1999; Dai et al., 2000; Lian, 2008; Wu et al., 2005); Solid circle—Qitianling (Wang et al., 2004; Fu et al., 2006; Deng et al., 2005; Li ZL et al., 2007; Gu et al., 2006; Zhu et al., 2006); Solid diamond—Xinjiang, Inner Mongolia, Tibet (Wang et al., 2006; Tang et al., 2007; Zhao et al., 1997; Wu et al., 2008; Li Y J et al., 2009); Open square—Sn or W-Sn bearing granites in the world (such as south Tianshan in Kyrgyz, after Konopelko et al., 2009; Shak-Kuhn of Iran, after Esmaily et al., 2005; Jalama batholith in central Iberia belt of Spain, after Ruiza et al., 2008; Central Gouveia granite of Portugal, after Neiva et al., 2009; Pitinga Sn mine of Amazonas area in Brazil, after Lenharo et al., 2002; Costil et al., 2002; Spitzkoppe and Klein Spitzkoppe granite of Namibia, after Haapala et al., 2007; Davis Lake granite in Nova Scotia Province of Canada, after Dostal and Chatterjee, 1995; Muang Yao granite in northern Thailand, after Yokart et al., 2003; Raith, 1995; Ervedosa granite in northern Portugal, after Gomes and Neiva, 2002; Pitinga and rapakivi granites in Brazil, after Lenharo et al., 2002); Solid square—Shak-Kuhn Granite in Iran (Esmaily et al., 2005)

有2个,一个是骑田岭花岗岩,在图12中(实心圆)落入浙闽型花岗岩范围。据陈富文等(2005)研究,骑田岭花岗岩的主体Sr含量较高[10个样品平均的 $w(\text{Sr}) = 141 \times 10^{-6}$, $w(\text{Yb}) = 3.68 \times 10^{-6}$, $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.42$],而4个补体花岗岩Sr含量较低[平均 $w(\text{Sr}) = 43 \times 10^{-6}$, $w(\text{Yb}) = 4.76 \times 10^{-6}$, $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.19$],显然,前者是浙闽型的,后者是南岭型的。他们认为成矿与补体花岗岩关系密切。邓希光等(2005)给出的骑田岭花岗岩REE资料中也有明显的负铕异常,看来,骑田岭的钨锡成矿作用主要仍然是与南岭型花岗岩有关。国外与钨锡有关的花岗岩也是与南岭型花岗岩关系密切,从图12看,国外的花岗岩Yb含量特别高,说明有相当数量的花岗岩是含副长石的碱性花岗岩。但是,在伊朗有一个例外,即Shak-Kuhn花岗岩,也是浙闽型的(图12B中的实心方块)。据Esmaily等(2005)的研究,侏罗纪的Shak-Kuh花岗岩由2个单元组成,一个是花岗闪长岩[165 Ma, $w(\text{SiO}_2) = 63\% \sim 71\%$],另一个是正长花岗岩[161 Ma, $w(\text{SiO}_2) = 73\% \sim 77\%$]。前者为浙闽型,后者Sr含量也普遍较高($194 \times 10^{-6} \sim 48 \times 10^{-6}$),但有比较明显的负铕异常(Eu/Eu^* 介于0.05~0.65之间, Esmaily et al., 2005),介于浙闽型和南岭型之间(图12)。该文作者认为锡矿(158 Ma)与165 Ma的花岗闪长岩关系密切(锡矿脉位于花岗闪长岩内)。这个实例很有意思,但是,锡矿与花岗闪长岩空间上密切共生并不一定表明两者是有关的,理由见后面对山东乳山金矿和海南抱伦金矿的讨论。

图12还有一个现象,即有相当一部分数据落入喜马拉雅型花岗岩范围,这引起笔者的注意,推测可能是受蚀变作用的影响,个旧花岗岩的实例可以说明这个问题。个旧花岗岩最近报道了很好的地球化学和同位素年龄资料(王永磊等,2007;程彦博等,2008)。王永磊等(2007)发现,老厂花岗岩的稀土元素具有2种不同的配分模式:第一组呈右倾型,轻稀土元素富集,轻、重稀土元素之间的分馏较为明显, La_N/Yb_N 比值高(20~34),发育中等负Eu异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.38 \sim 0.46$),相当于本文的喜马拉雅型花岗岩;第二组近似于“海鸥”型,轻、重稀土元素的分馏程度较低, La_N/Yb_N 比值为2~3,具有强烈的负Eu异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.08 \sim 0.14$),相当于南岭型花岗岩,但是,有少数样品落入喜马拉雅型与浙闽型的过渡区域(图13),推测可能与蚀变有关。研究表

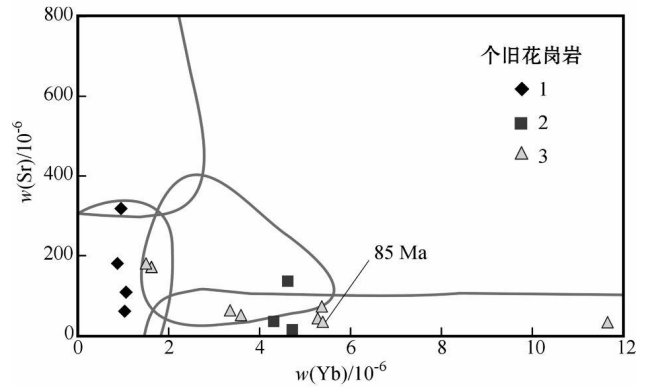


图13 个旧花岗岩Sr-Yb图

1—第一组花岗岩(王永磊等,2007); 2—第二组花岗岩(王永磊等,2007); 3—个旧花岗岩未分(程彦博等,2008); 年龄据程彦博等(2008)

Fig. 13 Plot of Sr versus Yb of the Gejiu granitic rocks 1—The first group of granite (Wang et al., 2007); 2—The second group of granites (Wang et al., 2007); 3—Granite (Cheng et al., 2008); Age data from Cheng et al (2008)

明,第二组花岗岩与成矿作用关系密切。程彦博等(2008)的后续研究也证实老厂花岗岩有上述两种类型(图13),他们对其中的中粒-细中粒黑云母花岗岩进行了锆石U-Pb LA-ICP-MS定年,得出的结果为(85±0.85) Ma,该年龄样品(D008-1)的 $w(\text{Sr})$ 为 33×10^{-6} , $w(\text{Yb})$ 为 5.35×10^{-6} ,为南岭型的(图13),故与个旧锡矿有关的花岗岩是晚白垩世的,与锡矿无关的喜马拉雅型花岗岩的时代不清楚。个旧的发现非常有意义,它说明:一个岩基(或复式岩体)可能由不同的侵入体组成,发育不同时期不同类型的花岗岩,而成矿可能只与其中的某一类花岗岩有关。因此,我们的研究应当更加仔细,不能满足于泛泛的研究,应当努力区分不同岩性、不同类型、不同时代的花岗岩,查明哪些与成矿有关,哪些与成矿无关,从而避免张冠李戴,搞错了找矿方向,贻误了找矿时机。

泰国也有一个与蚀变有关的实例。泰国北部有一个Khuntan岩基,是东南亚锡成矿带的一部分,该成矿带是晚三叠世—早侏罗世的(资料大多来源于上个世纪70~80年代,并不可靠,据Yokart et al., 2003)。其中的Huai Mae San岩基为S型花岗岩,由粗粒、斑状至巨斑状的二云母花岗岩组成,不含矿, $w(\text{Sr})$ 为 $85 \times 10^{-6} \sim 143 \times 10^{-6}$, $w(\text{Y})$ 为 $36 \times 10^{-6} \sim 41 \times 10^{-6}$,属于浙闽型花岗岩(图14A);而位于岩基南端的Muang Yao花岗岩由粗粒-中粒的白云母

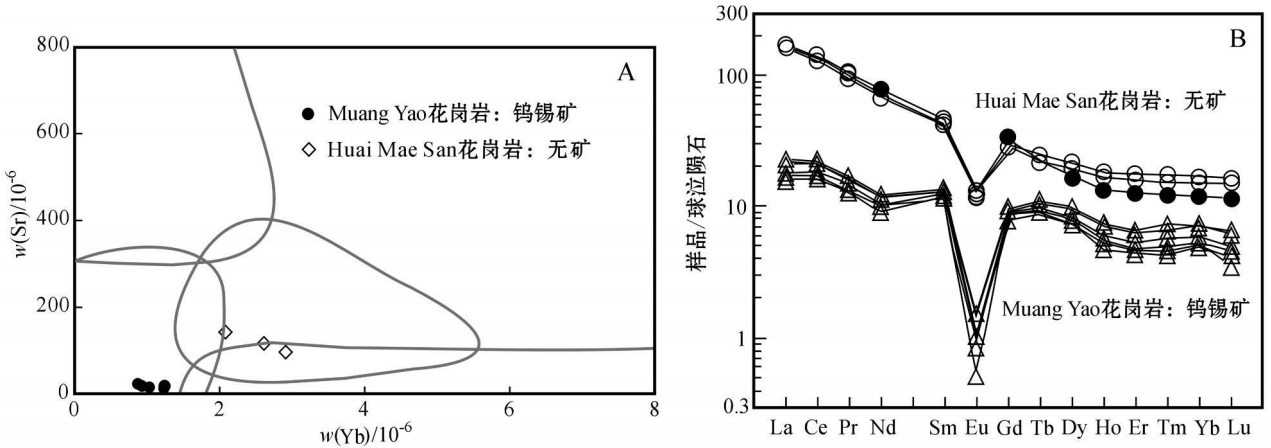


图 14 泰国 Khuntan 岩基的 Sr-Yb 图(A) 和 REE 分布图(B) (Yokart et al., 2003)

球粒陨石标准化值引自 Sun 等, 1989

Fig. 14 Sr versus Yb diagram (A) and REE distribution (B) for granites from the Huai Mae San and Muang Yao units of the Khuntan Batholith, Thailand(Yokart et al., 2003)

Chondrite-normalizing values from Sun et al., 1989

花岗岩和白云母-电气石花岗岩组成, 伴生钨锡矿, $w(\text{Sr})$ 为 $13 \times 10^{-6} \sim 40 \times 10^{-6}$, $w(\text{Y})$ 为 $31 \times 10^{-6} \sim 56 \times 10^{-6}$, 为南岭型的。Muang Yao 花岗岩的 $w(\text{Yb})$ 很低 ($0.87 \times 10^{-6} \sim 1.24 \times 10^{-6}$), 落入喜马拉雅型范围(图 14A), 推测是蚀变作用造成的, 因为虽然落入喜马拉雅型范围, 但是, 花岗岩的负钕异常非常低, Eu/Eu^* 在 0.14~0.05 之间(图 14B, 据 Yokart et al., 2003), 喜马拉雅型花岗岩很少有如此大的负钕异常(张旗等, 2008), 故应当是南岭型的。

巴西北部 Amazonas 州有一个著名的 Carajas 古元古代锡成矿省, 那里有许多古元古代(约 1.8 Ga)的花岗岩, 按照本文的分类大多是南岭型的, 部分为浙闽型, 如 Dall' Agnol 等(2005)报道的几个花岗岩, 并认为是 A 型花岗岩。实际上有浙闽型与南岭型花岗岩之分(图 15), 按照上述作者的结论, 在上述花岗岩中, 与锡矿有关的是负钕异常最明显的 Velho Guilherme 岩套和 Serra dos Carajas 岩套的浅色花岗岩(如 Pojuca 花岗岩), Velho Guilherme 岩套是南岭型的(图 15), Pojuca 花岗岩没有资料。而且, Velho Guilherme 花岗岩是还原型的, 其氧同位素是最低的, 相当于美国中西部的钛铁矿系列(Anderson et al., 2003)。与此相反, Jamon and Serra dos Carajas 岩套的副矿物中磁铁矿较多, 类似于美国中西部的磁铁矿系列花岗岩。巴西的实例说明, 与锡矿有关的花岗岩绝大多数都是南岭型的, 因为, 它需要低氧逸度及浅的岩浆源深度。

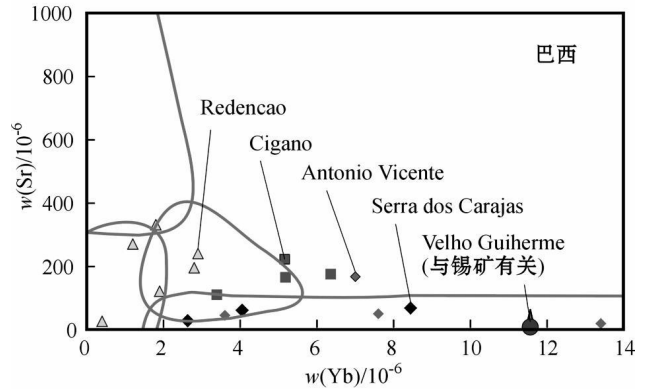


图 15 巴西古元古代花岗岩的 Sr-Yb 图

从图中看出, Redencao 和 Cigano 岩套属于浙闽型, 其余为南岭型。其中与锡矿有关的 Velho Guilherme 岩套为南岭型的(资料据

Dall' Agnol et al., 2005)

Fig. 15 Sr versus Yb diagram of Early Proterozoic granite in Brazil

As shown by the figure, Redencao and Cigano granites belong to Zheming-type, the rest to Nanling type. The Velho Guilherme granite belongs to Nanling type related to Sn-mineralization (after Dall' Agnol et al., 2005)

2 成岩与成矿的关系

2.1 成岩与成矿的区别

成岩是一个物理过程, 主要受温度的控制, 当岩浆的温度低于固相线温度时即固结为岩体。而成矿(主要指金属矿床)主要是一种化学反应, 是由于化学变化从液相转变为固相才成为矿床的。成岩有自

己独立的过程,成矿也有自己独立的体系(罗照华等,2009)。岩浆是熔体,黏性大,尤其花岗质岩浆,很难对流和交换;而矿液是流体,黏性极低,极易与周围物质发生交换。假如一个矿床是酸性的,有可能矿液原先是碱性的;如果矿床具有低氧逸度的特点,也许矿液早先是高氧逸度的,这叫相反相成。我们知道,酸碱反应可以产生中性的沉淀物,成矿大体也是这个道理。成矿在很多情况下是由于温度、压力、溶解度、饱和度、酸碱度、氧逸度等发生变化时发生的。因此,不能因为我们现在测定的矿床的大气水多、沉积物组成丰富、气液包裹体温度低,就认定矿床是沉积型的,成矿与天水有关。这时,我们更应当关注那些微弱的、矛盾的甚至被淹没的信息,如少量的岩浆水、少量的幔源物质等等,而可能正是这些微弱的信息提供了源区来源的资料。

2.2 成岩与成矿有成因联系吗?

我们搞研究喜欢探究成因,如花岗岩成因、玄武岩成因、矿床成因等。“成因”是什么含义? 百度词条的答案是:“造成某种局面或结果的原因”,指的是因果关系。实际上得到的答案有些并非因果关系。要查明一件事情的因果关系谈何容易。某个花岗岩,其源岩究竟是什么? 依靠人们目前的认识往往具有多解性。因为,我们对壳幔边界究竟发生了什么根本不清楚。两个东西总是形影相随并不表明两者具有亲缘关系或成因关系。就以斑岩铜矿与埃达克型花岗岩来说,埃达克型花岗岩形成于加厚下地壳的底部,是各种源岩(玄武岩、年轻的或古老的变质岩、TTG等)在高压下部分熔融形成的;金铜等也来源于下地壳底部,由于流体的作用被从玄武质岩浆和地幔中萃取出来。埃达克型花岗岩的形成需要高温、高压,流体可有可无,有流体更好;而金铜被萃取除了需要高温、高压外,还需要丰富的流体和高氧逸度条件以及合适的金铜源岩。高温和高压在下地壳底部处处存在,而流体和合适的氧逸度并非到处都有,因此,在下地壳底部成矿比成岩的条件苛刻得多。成岩可以很普遍,对于埃达克型花岗岩,只要存在加厚的地壳(足够的压力),有足够的温度,不同性质的源岩均可部分熔融形成埃达克质熔体。如果有流体的参与,部分熔融的条件更加容易达到。而成矿却很不容易,首先需要矿源:对于金铜来说,它主要源于玄武质岩浆和地幔岩,只要有玄武岩底侵或软流圈地幔上涌,即可带来金和铜;对于钨锡来说,主要源于下地壳,由于元素分布不均匀,在下地

壳底部不是任何地方都有适量的钨锡成矿元素分布。为什么有些地方钨富集(如赣南)? 有些地方锡丰富(如广西大厂和云南个旧)? 为什么东南亚锡矿资源丰富而钨很少? 可能主要受源区组分的控制。由陆壳组成的下地壳是钨锡的重要来源,而由洋壳组成的下地壳贫钨锡,即使其他条件统统具备也不能成矿,例如中亚造山带。其次,有了金铜的源岩还不行,还需要有流体循环,有合适的氧逸度条件,足以把金铜从源岩中萃取出来,溶解在溶液中被转移出来。如果源区既有铜也有金,且各种条件均允许两者被转移到流体中,则最终形成的矿床可能同时富集金和铜;如果各种条件只允许金或只允许铜被萃取,则最终形成的矿床要么是铜矿,要么是金矿,或铜矿含少量金,或金矿含少量铜。

因此,成岩和成矿有不同的要求:成岩只需要热这一个条件;而成矿则需要满足热、流体和矿源三个条件。如果只有热,可以形成花岗岩但不成矿;如果有热和流体,更加有利于形成花岗岩但也不一定成矿;如果有热、流体和合适的矿源,则既有利于成岩也有利于成矿。热来自地幔。对于金铜成矿来说,地幔和玄武岩也是金铜的主要来源,因此,如果有软流圈地幔上涌或玄武岩底侵,还有从地幔和玄武岩带来的流体,有合适的氧逸度,有足够的压力,即有利于金铜的萃取和成矿。对于钨锡来说,既需要有从地幔或玄武岩底侵带来的热和流体,还需要合适的下地壳钨锡来源,三个条件缺一不可。

因此,成岩相对于成矿是比较容易满足的,因为,有利于成矿的条件必定有利于成岩,故地表花岗岩多,矿床少。一个地区可以有花岗岩大量出露而无矿,但是,不可能有大量矿床出现而没有花岗岩(仅就与岩浆岩有关的矿床而言)。成矿,成什么矿,关键取决于源区条件和萃取条件,这就是成矿的局限性和特殊性。在华北,埃达克型花岗岩广泛出现,可以是深成岩基(如八达岭、滦源花岗岩基),也可以是浅成侵入体(如长江中下游),甚至喷出地表(如髻髻山组、兰旗组火山岩)。但是,成矿却是局部的,仅集中在长江中下游、胶东、冀北和小秦岭等地。长江中下游以铜为主,金次之;其余地方金为主,铜很少。之所以如此,是由下地壳底部成矿和成岩条件和矿床保存条件决定的。

笔者认为,成矿与成岩有关,指的不是成因关系而是时空关系。空间上,成矿并不严格限于岩体内部和边部,有些可与岩体相距甚远甚至“无关”(在远

离岩体的沉积岩中或裂隙中); 时间上, 成矿可与成岩同时, 也可以略早于或略晚于成岩。以铜陵为例, 与铜矿有关的埃达克型花岗岩的时代在 133~ 151 Ma 之间(最大 151 Ma, 沙滩角, 以上均为 SHRIMP 或 LA-ICP-MS 方法); 而成矿集中在 137~ 141 Ma (Re-Os 法)。小秦岭金矿大多产于太华群中, 但是, 越来越多的资料表明, 小秦岭金矿的成矿时代与附近的埃达克型花岗岩(华山、文峪、娘娘山等) 是同期的。因此, 小秦岭金矿与埃达克型花岗岩有关。虽然金矿就位于太华群, 并不与花岗岩接触, 但是, 太华群只是金矿赖以沉淀的载体(围岩), 太华群不是金的源岩, 与金矿的成因无关。

为了说明成岩和成矿的关系, 可以用下面的图(图 16) 来示意: 在图 16A 中, 假定埃达克质岩浆和金矿皆起源于加厚下地壳的底部。下地壳由于有来自地幔的玄武质岩浆底侵或软流圈上涌提供的热而熔融, 形成埃达克型花岗岩, 理论上岩浆上升可以定位在地壳的任何部位直至地表, 而岩浆成分不会发生明显的变化, 即使与围岩或其他岩浆发生少量的混染或混合作用, 初始部分熔融形成的岩浆成分如果具有埃达克型花岗岩的特征, 那么, 最终固结的岩浆成分仍然是埃达克型花岗岩, 且不论其是岩基、岩株、岩墙、岩脉或火山岩。

矿床则不同, 矿床的形成除了需要热之外还需要流体和相应的物源(如金铜等)。由于金主要来源于地幔和玄武质岩浆, 因此, 含金矿液聚集的最佳位置也在下地壳底部。如果既有流体又有金的来源, 则可形成含金的矿液, 矿液由于是流体, 黏性极低, 比岩浆的性质更活泼, 更有利于向上移动。但是, 正由于其为流体, 与围岩的交换作用也更加容易。因此, 在矿液上升期间可能与周围物质发生交代从而频繁改变自身的性质。矿床和矿液不同, 固体的矿床是矿液沉淀的产物。矿液沉淀不是简单的降温过程, 而是复杂的化学反应的结果。如图 16A 所示, 矿液在从下地壳底部上升的过程中, 可能发生过不止一次的化学性质的改变, 可能从矿液 I 变化为矿液 II、矿液 III 等等, 最终沉淀于地壳的浅部才成为矿床。如果矿床是由矿液 III 转变来的, 那么, 矿床的性质必定不同于矿液 III, 更不同于矿液 II 和矿液 I。前面说了, 岩浆可以固结在地壳的任何部位, 矿床只能形成在地壳的浅部, 例如中上地壳, 而不可能形成在下地壳。这是由于地壳越深温度越高, 不利于矿床的沉淀。如果剥蚀较浅, 出露的是上地壳, 则花岗

岩的存在形式以小岩体、斑岩居多, 矿床则为卡林型、斑岩型、矽卡岩型或沉积型, 如西秦岭和长江中下游的例子(图 16B); 如果剥蚀程度中等, 出露的是上地壳下部或中地壳的变质岩, 埃达克型花岗岩多呈大岩体或岩基, 金矿只见沉积型而很少有斑岩型的, 如小秦岭和胶东的实例(图 16C); 如果剥蚀深达下地壳, 岩浆仍然是埃达克型花岗岩, 矿床则没有了, 因为, 矿床不能在高温高压环境下沉淀, 能够存在的只是矿液的通道的残迹(图 16D), 如大别的例子。大别的埃达克型花岗岩不是不利于成矿, 而是矿液不能够沉淀下来。

因此, 如果一个地方花岗岩很多却无矿床分布, 并不是该区的花岗岩不含矿(如果该区不是下地壳层位), 也不是这种花岗岩不利于成矿, 而是该地该时可能没有地幔流体的供给, 或是虽有流体但无合适的矿源的缘故。对于找矿来说, 这是非常重要的。如果一个地区既有花岗岩又有矿(不论矿床规模大小), 表明该区该时地幔有热和流体的供给, 下地壳底部有合适的源岩, 该区就有成矿的可能性, 就可以在该区开展进一步的找矿工作。因此, 在现阶段, “就矿找矿” 仍然是一个行之有效的找矿方法和原则, 因为, 它有理论依据。

总之, 一个地区, 可以有花岗岩广泛出现、金铜矿却很少的现象, 但是, 不可能有金铜矿床密集而岩浆岩不发育的情况。当然, 这是从区域规模上说的, 不是指的矿区尺度上的情况。如小秦岭, 与成矿有关的埃达克型花岗岩均不在矿区范围内(图 5), 又如西秦岭, 金矿周围几公里或十几公里无花岗岩分布。以中国东部高原为例, 高原处处可见埃达克型花岗岩, 但与埃达克型花岗岩有关的矿产却只集中在局部地区。这是因为成岩需要的条件相对简单(有足够的热即可), 而成矿除了热, 还需要流体和源岩, 三者缺一不可。

2.3 含矿岩体与不含矿岩体问题

花岗岩与成矿关系的研究已经有上百年的历史, 但是, 困扰我们的是, 花岗岩与矿有关, 但并非每一个花岗岩体均与矿伴生, 于是, 人们就问: 为什么有些岩体有矿? 有些岩体无矿? 埃达克型花岗岩不是与斑岩铜矿有关吗, 为什么有的斑岩有矿, 有的斑岩无矿? 于是, 就分出含矿岩体和不含矿岩体, 就有人孜孜不倦地企图找出两者之间的区别, 以应用于未知区的找矿。实际上, 既然成矿与成岩是两回事, 它们之间并无因果关系, 因此, 就不存在“为什么有

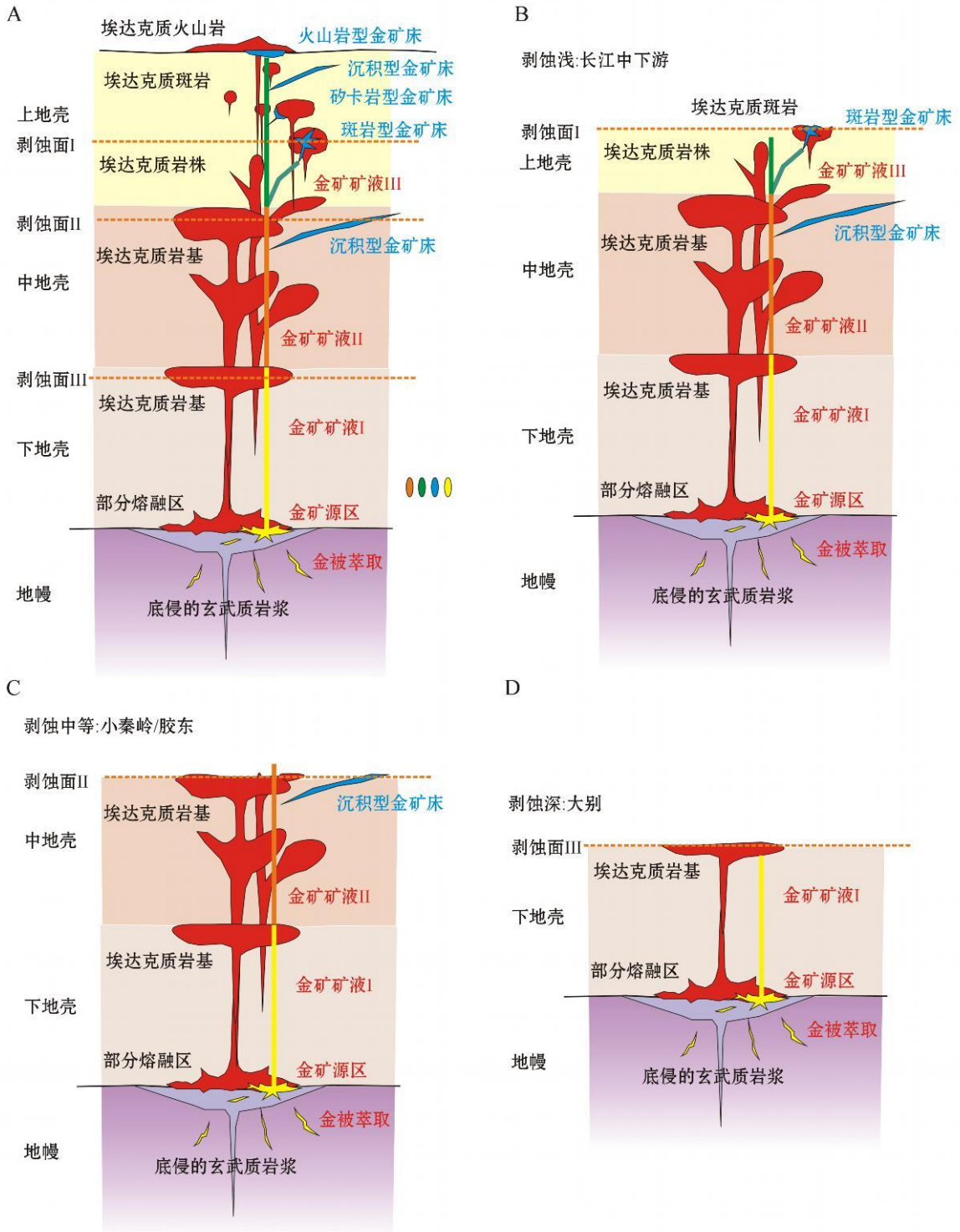


图 16 成岩与成矿各自具有不同过程的示意图

A. 成岩和成矿全过程图; B. 剥蚀浅, 如长江中下游; C. 剥蚀中等, 如小秦岭和胶东; D. 剥蚀深, 如大别

Fig. 16 Schematic models showing different processes of formation of granitic rocks and gold deposits

A. A complete process showing the formation of granitic rocks and ore deposits; B. Weak erosion, such as the Yangtze River;

C. Moderate erosion, such as Xiaoqinling and Jiaodong; D. Deep erosion, such as Dabie

些岩体有矿?有些岩体无矿?”的问题,也无所谓“含矿岩体”和“不含矿岩体”,企图找出它们两者的区别也就是徒劳的了。“含矿岩体”的说法具有成因联系的含义,是不符合地质实际的。理由如下:

(1)成岩作用包括岩浆从熔融到固结的过程,岩浆是高黏性的熔体;成矿是从流体(矿液)转变为固体(矿床)的过程,矿液是黏性极低的流体。熔体和流体是两种物理化学性质完全不同的物质,两者可以发生物质交换,但是,两者没有成因联系。

(2)成岩与成矿来源不同。以金铜与花岗岩的关系为例,花岗岩源于硅铝质下地壳的部分熔融,花岗岩与下地壳具成因联系;金铜源于地幔或底侵的玄武质岩浆,金铜与地幔和玄武质岩浆有成因联系;花岗岩与金铜无成因关系。如果花岗岩源于底侵的玄武岩(硅镁质),金铜也源于底侵的玄武岩,则花岗岩与底侵的玄武岩为成因关系,金铜与底侵的玄武岩也是成因关系,花岗岩与金铜同源,两者为兄弟关系,也非成因关系。在这种情况下,地幔和底侵的玄武质岩浆是金铜的母岩,玄武质岩浆是花岗岩的母岩,花岗岩不是金铜的母岩。以钨锡与花岗岩的关系为例,花岗岩源于下地壳的部分熔融,花岗岩与下地壳具成因联系;钨锡也源于下地壳,钨锡与下地壳也是成因关系。花岗岩与钨锡同源,两者也为兄弟关系而非成因关系。因此,下地壳是钨锡的母岩,也是花岗岩的母岩,而花岗岩不是钨锡的母岩。

在一个矿区(如铜陵),可以有許多花岗岩,有的与矿伴生,有的与矿无关,矿体可以产于岩体内部(斑岩型)、边部(矽卡岩型)、外部(层控型)。它们是一种什么关系呢?只是时空分布上的关系,也非成因关系。花岗岩为什么出现在该区?一是由于该时该地之下的地幔有热的供给,下地壳得以熔融;二是由于构造作用有利于岩浆上升并固结在地壳的一定层位。铜矿为什么出现在该区?一则因为该时该地之下的地幔有热和流体的供给;二是源区有铜的源岩,流体有合适的条件可以将铜从源岩中萃取出来;三是构造作用有利于矿液上升并固结在地壳的浅部层位。铜与花岗岩不期相遇,可能与共用一个通道有关。铜矿沉淀在浅部或在花岗岩内部、或在花岗岩边部、或远离花岗岩,主要取决于铜矿沉淀的条件,与花岗岩自身性质关系不大,花岗岩只是扮演了铜矿赖以沉淀的围岩的角色。铜从液相变为固相,对花岗岩地球化学性质并无选择,两者无必然的因果关系,只是时空上相关而已。如刘国仁(2009)所

归纳的情况:与花岗闪长岩有关的铜金矿床可因岩浆侵入就位的地层和构造条件不同而产出多种类型的矿床:在围岩为碳酸盐岩时易产生矽卡岩型矿床,在硅铝质围岩中易形成斑岩型矿床,在含沉积黄铁矿层的碳酸盐岩建造中形成层控矽卡岩型矿床,在超浅成部位形成角砾岩筒型和热液脉型矿床,在火山岩中还可以生成海相喷流型和陆相火山岩型的铜金多金属硫化物矿床等(刘国仁,2009)。铜陵有70多个岩体,成矿的只有十几个岩体,大多数岩体无矿,我们怎样去区分成矿与无矿岩体各有什么特征呢?有些铜矿在岩体内,为斑岩型的;有些在接触带,为矽卡岩型的;有些在远离岩体的围岩中,为外接触带型的。如何研究它们何以在岩体内、岩体边或岩体外?铜陵岩体非常复杂,一个是岩体自身的变化,一个是不同岩体之间的变化,如何区分哪些变化与矿有关?哪些与矿无关?而且我们现在研究的对象都是经历过各种变化以后留下的最终结果,含矿岩体必定经历了更加明显的各种矿化和蚀变作用的改造,如果加进矿化和蚀变的因素来区分含矿和不含矿岩体是不科学的。铜陵的花岗岩源于下地壳榴辉岩相的中基性变质岩,金铜源于地幔或玄武质岩浆(如图16所示),于是,花岗岩与金铜是“邻居关系”;如果一部分花岗岩也来源于底侵的玄武岩,则花岗岩与金铜为“兄弟关系”。但是,无论哪种情况,金铜与花岗岩不具有成因联系,不是“母子关系”,花岗岩不是“母”,金铜也不是“子”。对于斑岩锡矿来说,斑岩是下地壳来源的,锡也是下地壳来源的,两者同源,为兄弟关系,也非母子关系。

为什么说斑岩铜矿的斑岩不可能是铜矿的成矿母岩?得从斑岩何以为斑岩说起。斑岩是侵位到地壳浅部的花岗质岩浆快速降温的产物,不是在下地壳底部就有的。在下地壳底部只能形成花岗质岩浆,随着岩浆的上升,在地壳不同的部位和深度,由于温度变化的不同及空间的限制,可以形成岩基、岩体、岩株、岩瘤、岩床、岩脉、岩枝、岩管、岩墙甚至喷出地表形成火山岩,如图16A所示。而含铜的矿液来自下地壳底部,矿液与岩浆可以同时也可以不同时出现,但是,岩浆和矿液可能拥有共同的通道或后者借用前者的通道。含铜矿液在斑岩中沉淀或不在斑岩中沉淀,完全取决于含铜矿液沉淀的条件是否能够满足。含铜矿液沉淀在斑岩中,为斑岩铜矿。铜矿可以与斑岩同时,也可晚于斑岩。铜和斑岩均源于下地壳底部的壳幔过渡带,对于斑岩来说,其

“母”原先是花岗质岩浆,来自下地壳的部分熔融,岩浆侵位到地壳浅部才成为斑岩;对于铜矿来说,其“母”来自地幔或玄武质岩浆,矿液上升到浅部富集在斑岩中。因此,斑岩铜矿的斑岩和铜矿两者并非同源,不具有成因联系,斑岩为铜矿的成矿母岩的提法是不对的。

2.4 成岩和成矿时代问题

早先认为成矿与成岩有成因关系,于是认为成矿时代必然受制于成岩时代,成矿一般与成岩同时或稍晚,不大可能早于成岩。这种见解不一定有道理。因为,精确的年代学研究表明,实际上存在许多成矿年龄大于成岩年龄的例子(见陈衍景等, 2009, 表 1)。如何解释成矿年龄早于成岩年龄呢?笔者认为,在一个矿区范围内,成岩可以有一个时间间段,成矿也可以有一个时间间段,两者可能大致重叠,成矿可能略晚于成岩。如图 17 所示,图中数字代表侵位的顺序,1 最早,7 最晚。成矿(4、5)时代晚于岩体 1、2、3,早于岩体 6 和 7。就一个成矿带或成矿区范围来说,如果成岩在 250~ 200 Ma 之间,成矿在 240~ 190 Ma 之间,对于一个矿区或矿床来说,如果成岩在 230 Ma,成矿在 240 Ma,是合理的。因为花岗岩和金矿都与地幔带来的热有关,岩浆岩总体的时代与成矿的总体时代应当大体一致。但是,

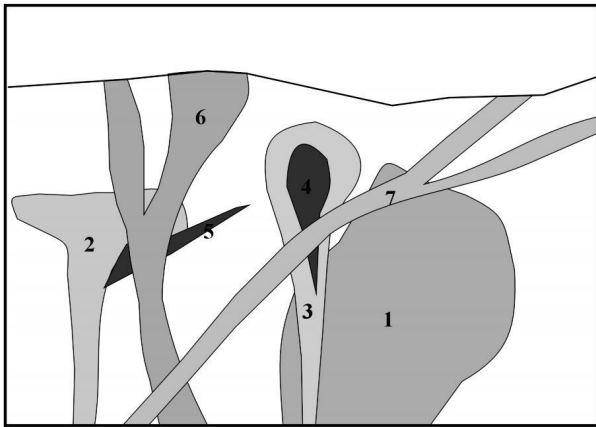


图 17 成岩时代与成矿时代关系示意图

图中数字代表侵位的时间,1 最早,7 最晚,4 和 5 代表矿床,其余为花岗岩体,均属于埃达克型

Fig. 17 A schematic model showing the relationship of time difference between petrogenesis and ore-forming process. Numbers in the diagram represent time of emplacement, 1 for the earliest emplacement and 7 for the latest emplacement, 4 and 5 for the formation of ore deposits, the others for the formation of adakite-type granitic rocks

对于具体的矿床和矿体来说,成岩时代和成矿时代可以有差异,成矿可以略晚于或略早于岩浆岩,成矿早于岩浆岩并不说明成矿与岩浆岩无关。学术界有一种见解,认为成矿后的岩浆活动是与成矿无关的,这种见解依然是受了成岩与成矿具有因果关系的认识的束缚。

以胶东金矿为例,胶东埃达克型花岗岩非常发育,时代跨度大,从 160~ 113 Ma。胶东金矿成矿时代主要集中在 130~ 110 Ma,是否 160 Ma 的埃达克型花岗岩就不利于成矿呢?非也。我们怎样解释胶东埃达克型花岗岩与成矿的关系呢?

(1) 胶东埃达克型花岗岩的时代限制了胶东地壳加厚的时代即高原的时代,中国东部高原在胶东地区是 160 Ma 前开始抬升的,在 113 Ma 后垮塌。垮塌分两步:胶东的西部先垮塌(大约在 125 Ma 之后),胶东的东部(威海-乳山一带)后垮塌。

(2) 大规模岩浆活动集中在 160~ 125 Ma 之间,表明此时地幔活动性强,有软流圈地幔大规模上涌,故造成了大规模的岩浆活动。

(3) 在 160~ 130 Ma 期间有大量的埃达克型花岗岩出露而无矿,说明此时地幔有大量的热而无(或很少)流体,故不利于成矿;而在 130~ 110 Ma 期间,地幔不仅很热,还带来了大量的流体,既有利于花岗岩的熔融,也有利于金矿的萃取,故出现了大量的金矿。

以乳山金矿为例,金矿主要位于昆嵛山花岗岩内,部分在鹤山和三佛山花岗岩内(图 18)。昆嵛山花岗岩年龄是 142~ 160 Ma 的(胡芳芳等, 2006; 张田等, 2008),鹤山花岗岩年龄是 154~ 156 Ma 的(张田等, 2008),均早于成矿时代(117 Ma, 据胡芳芳等, 2006),该区存在 113 Ma 的三佛山花岗岩,但是,并不与主要的金矿接触。昆嵛山、鹤山和三佛山花岗岩都是埃达克型花岗岩,但是,昆嵛山和鹤山花岗岩与成矿无关,虽然金矿在昆嵛山和鹤山花岗岩内,但昆嵛山和鹤山花岗岩只是金矿的围岩。金矿与三佛山花岗岩有关,尽管三佛山花岗岩与金矿在空间上并不接触。因此,不是昆嵛山和鹤山花岗岩不利于成矿,而是在昆嵛山和鹤山花岗岩形成时地幔只提供了热而没有提供流体之故。

3 讨论

3.1 金铜和钨锡是相悖的

金铜与埃达克型和喜马拉雅型花岗岩有关,形

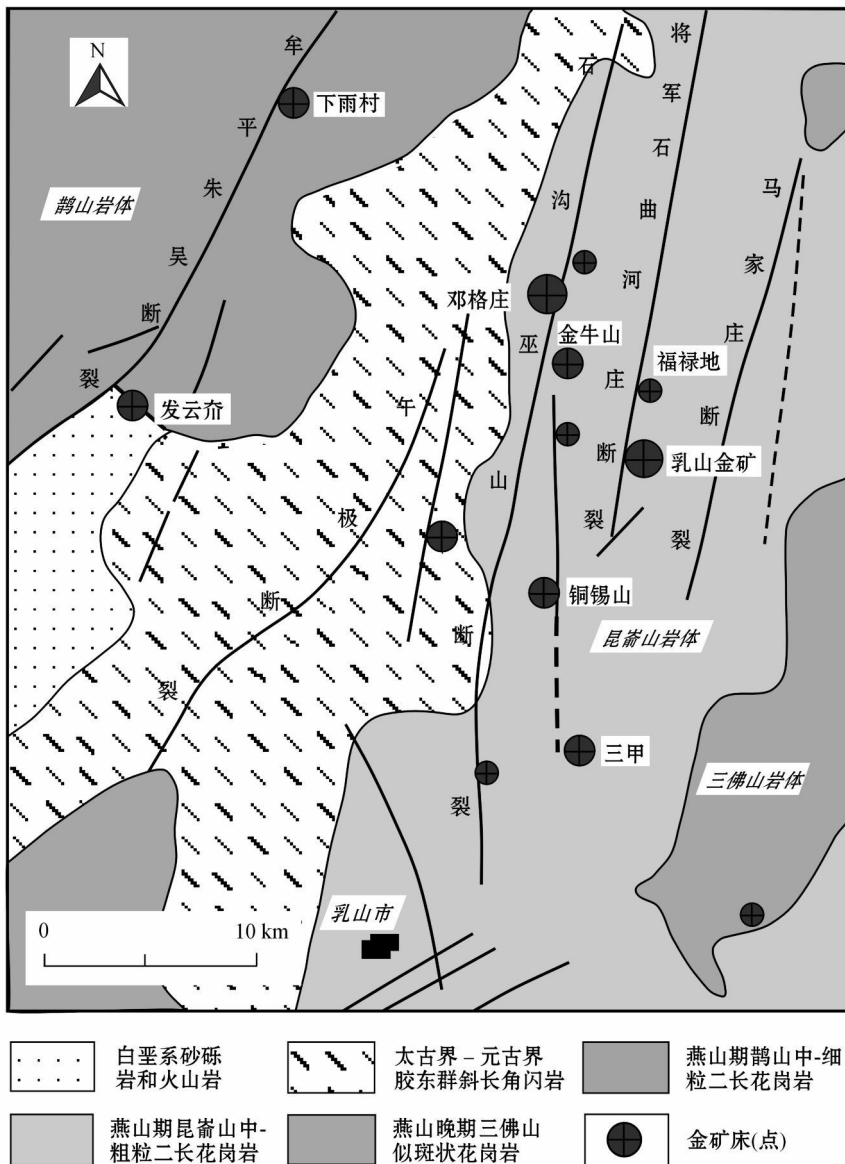


图 18 胶东牟平-乳山金矿区地质略图(据胡芳芳等, 2006)

Fig. 18 Simplified geological map of the Muping-Rushan gold belt in Jiaodong peninsula (after Hu et al., 2006)

成于加厚地壳; 钨锡与南岭型(少数情况下与浙闽型)花岗岩有关, 形成于减薄地壳。因此, 金铜和钨锡是相悖的, 不可能同时同地出现。但是, 有些文献描述一个成矿带有金、铜、钨、锡、铅、锌、银等矿产产出, 如何理解呢? 笔者认为, 如果金、铜、钨、锡同时出现, 可能有以下 2 种情况:

(1) 金铜成矿时代不同于钨锡, 或早于或晚于钨锡, 在金铜成矿时代地壳较厚; 在钨锡成矿时代地壳较薄。金铜和钨锡可以叠加在一起, 如福建西部有一个金铜成矿带, 时代大致在 110~ 100 Ma 范围, 可向北进入浙江, 直抵绍兴。该带南部有大型的紫金

山斑岩铜矿, 沿该带有许多小的金矿床、矿点。福建西部有一个大型的行洛坑钨矿, 恰位于该成矿带内, 行洛坑钨矿是福建最大的斑岩型钨矿, Re-Os 年龄为 156 Ma(张家箐等, 2008), 是晚侏罗世的, 虽然在空间位置上它处于该金铜成矿带内, 实际上从时间上来说, 它与早白垩世晚期的金铜成矿没有关系。因此, 该带的钨矿形成时间早, 形成于地壳减薄的时期。至 110 Ma 以后, 该带地壳加厚, 遂不利于钨锡成矿而有利于金铜成矿(张旗等, 2008)。金铜成矿与钨锡成矿是叠置关系, 两者虽同地但不同时。

(2) 金铜和钨锡同时成矿, 但地壳厚度不同, 恰

位于地壳厚度明显变化的位置。虽然金铜、钨锡可能处于一个成矿带(实际上是两个不同的成矿带),金铜在成矿带的一侧,而钨锡在另一侧。成矿时金铜一侧地壳较厚,钨锡一侧地壳较薄。

3.2 金、铜成矿深度的差别

金、铜伴生,但是,金、铜成矿深度可能是不同的。斑岩铜矿是一个常见的术语,暗含的意思是:铜矿与斑岩如影相随。斑岩就位的深度浅,在上地壳的浅部。金矿产出的深度比铜矿宽得多,金可以与斑岩铜矿在一起(斑岩金矿或斑岩铜金矿),也可以单独出现。以中国东部为例,长江中下游是中国著名的铜矿集区,那里的侵入岩大多是中性的石英闪长岩类,铜矿的主要类型是斑岩型和矽卡岩型,伴生金,成矿与埃达克型花岗岩密切相关(如铜陵、月山、沙溪、滁州、安基山、城门山、武山、铜山口、丰山洞等)。该区花岗岩以小岩体和斑岩为主,出露的地层有零星分布的前震旦纪变质基底和震旦纪地层,广泛发育寒武纪—三叠纪的碳酸盐岩沉积和侏罗纪—白垩纪火山岩沉积,明显具上地壳的特征。西秦岭卡林型金矿,少数与花岗岩或斑岩伴生,部分有花岗岩脉产出,许多金矿矿区内甚至无花岗岩出露,表明金矿成矿的深度很浅。胶东和小秦岭则是另外一个极端。胶东金矿的围岩为太古宙的胶东群、TTG片麻岩和古元古代的荆山群和粉子山群。小秦岭金矿大多呈石英脉和细脉浸染状产于太华群中,矿床类型有破碎蚀变岩型、石英脉型和微细浸染型等(罗铭玖等,2000)。小秦岭与胶东金矿的地质背景大体类似:围岩为角闪岩相—绿片岩相的太古代—元古代变质岩,部分达麻粒岩相,大体相当于中地壳层位。上述实例说明,铜矿产出的部位较浅,位于上地壳的浅部,与斑岩密切伴生;金矿产出的范围较宽,可深达中地壳(金单独出现),也可浅到上地壳的上部(比斑岩侵位的深度还要浅)。

大别地区有很多埃达克岩,其研究程度是中国东部最高的,但是,大别的埃达克岩干干净净,没有任何具经济价值的金或铜矿。这是为什么?难道是大别的埃达克岩不利于成矿?大别之所以没有矿,可能有以下2个原因:①大别之下的地幔只提供了热而没有提供足够的流体,只形成岩体而不成矿;②大别也有金铜成矿,由于地壳强烈的抬升作用,出露的为下地壳层位,金铜已被剥蚀殆尽。大别埃达克型花岗岩规模一般较大,有的呈岩基产出,如主薄源、天堂寨、天柱山等。花岗岩的围岩大别群变质程

度高,达角闪岩相—麻粒岩相—榴辉岩相,说明大别经历了强烈的剥蚀作用,出露的埃达克岩可能属于岩浆根部的岩石。究竟哪种可能性大?可能需要到北淮阳盆地去找证据。金被剥蚀一般搬运不会很远,大别周边如果保存有沉积型金矿,则第二种可能性大,否则就是第一种可能性。

3.3 如何理解矿源层问题?

许多人认为金可以源于金矿就位的围岩,例如,胶东蚀变岩型金矿的金源于胶东群,小秦岭的石英脉型金源于太华群,西秦岭卡林型的金源于古生代碳酸盐岩。围岩变质岩能否作为金矿的矿源层,视变质岩成分大体可分为2种情况:

(1)太古代绿岩带 太古代绿岩带是由玄武质岩石变质来的,玄武岩是富金的,因此,太古代绿岩带可以作为太古代绿岩型金矿的矿源层,前提是金矿时代与绿岩一致。如果绿岩带中的金矿时代与绿岩不同,则需另行考虑。如许多绿岩带中的金矿是中生代的,与周边中生代花岗岩关系更密切,绿岩带可能就不一定是金的矿源层了,虽然其金的背景值很高,判断方法见图19(详见后述)。

(2)非玄武质原岩为主的古老变质岩系 一套成分复杂的变质岩系或长英质占重要比例的变质岩系,则很难成为金矿的矿源层,如果金矿时代不同于变质岩系,则更加不可能。

但是,学术界似乎相当垂青于金源于围岩的说法。例如对小秦岭、胶东以及西秦岭卡林型金矿成因的认识。笔者在这里强调,如果认为金是从围岩来的,那么,不仅矿区内的围岩(碳酸盐岩、太华群、胶东群)金背景值高,而且,矿区外围岩的(碳酸盐岩、太华群、胶东群)金背景值也应当高,而且,西秦岭全区的围岩(碳酸盐岩)、小秦岭全区的太华群、胶东全区的胶东群金的背景值也应当高。如果满足上述条件,才能说金源于围岩。矿区外和大区域(西秦岭、小秦岭、胶东)显然没有这样的情况。因此,碳酸盐岩和古老的变质岩围岩不可能是金的源岩。相反,为什么说金铜源于玄武岩和地幔岩?因为玄武岩和地幔岩的金、铜背景值高是全球性的,是不分时代和地域的。

为了解决这个问题,有一个鉴别方法,即穿过矿体作一个大剖面,长度至少几公里,连续取化探样,如果金异常是远离矿体高而近矿低(图19上图),则金源于围岩,解释是金矿脉汲取了围岩的金,而使近矿的围岩金丰度明显降低而远离矿体的围岩的金变

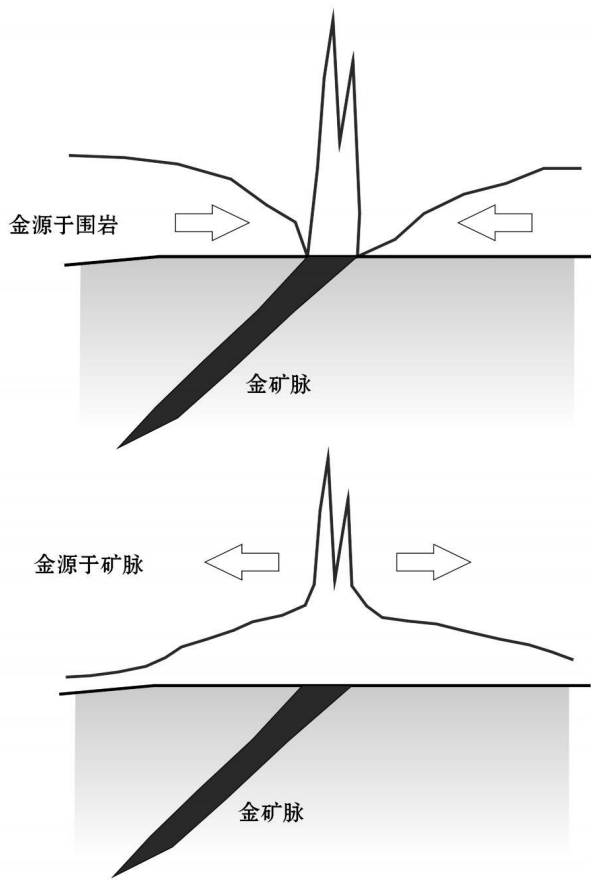


图 19 两种可能的 Au 异常剖面图

上图: 远离矿体的围岩 Au 背景值高, 近矿围岩 Au 背景值降低, 则金源于围岩; 下图: 金矿脉 Au 含量最高, 近矿围岩 Au 背景值高, 远离矿体 Au 背景值降低, 则金源于矿脉

Fig. 19 Two possible profiles of Au anomalies

Upper: Au background values decrease from host rocks to gold vein, indicating that gold was derived from host rocks; Lower: Au background values increase from host rocks to gold vein, indicating that gold was derived from the vein

化较小。如果金异常是近矿围岩高而远离矿体降低(图 19 下图), 其解释是金源于矿体, 近矿围岩接受了从矿体扩散出来的金而含量高, 远离矿体接受的金少所以金背景值低。

4 关于找矿思路

4.1 埃达克型花岗岩是金铜找矿的前提而不是找矿标志

鉴于埃达克型花岗岩与金铜成矿作用的密切关系, 有人曾提出埃达克岩可以作为找矿的标志来使用(Defant et al., 2002; 张旗等, 2002; 2004a; 2004b)。

这种说法引发了不小的争论, 不少人对此提出异议(如芮宗瑶等, 2006; 冷成彪等, 2007a)。笔者在检讨上述说法时认识到, 埃达克型花岗岩作为找矿标志的提法不恰当。找矿标志者, 应当可以循此标志找矿。例如, 在一个地区如果发现了埃达克型花岗岩, 表明具备了寻找金铜矿床的前提, 可以考虑在该埃达克型花岗岩及其附近找矿。但是, 矿体在哪里? 怎么延伸? 就不能靠埃达克岩来解决问题, 而要借助其他标志, 如蚀变、构造、矿化以及各种物化探异常等。埃达克岩更重要的是作为找矿的前提, 而不是找矿的标志。例如在东昆仑已经发现了一些印支期的埃达克型花岗岩, 说明该时期东昆仑有一个加厚地壳, 为一个山脉, 于是在山脉范围内就有找到金铜的可能性, 就应当在山脉范围内布置进一步的找矿工作。而南北两侧的区域, 没有该时期的埃达克型花岗岩, 就不需要布置找矿工作(只对金铜而言)。又如在大兴安岭北部已经圈出一个侏罗纪—早白垩世的鄂霍茨克山脉范围, 在这个范围内找金铜是可行的。

4.2 先找埃达克型花岗岩再找矿

笔者曾提出“先找埃达克岩再找矿”的说法(张旗等, 2004a; 2004b), 其本意是将埃达克岩作为找矿的前提来看待: 有埃达克岩, 可以尝试找(金铜)矿; 无埃达克岩, 不去找(金铜)矿。这个说法仍然是可行的, 它不仅适合找与 O 型埃达克型花岗岩有关的斑岩铜矿, 也适合找与 C 型埃达克型花岗岩有关的金铜矿床。O 型埃达克型花岗岩产于岛弧区, 岛弧区以岛弧岩浆活动为主, 占优势的花岗岩类(包括侵入岩和喷出岩)不是埃达克型花岗岩, 而是安山岩—英安岩—流纹岩组合(Defant et al., 1990; Martin, 1999), 该组合的特征是贫 Sr 富 Y 和 Yb, 相当于浙闽型花岗岩(张旗等, 2006)。国外认为埃达克型花岗岩是一种少见的岩石, 道理即在此。由于金铜成矿与埃达克型花岗岩关系密切, 与岛弧岩浆组合不那么密切, 而埃达克型花岗岩又少见, 因此, 找矿应当先找埃达克型花岗岩, 然后围绕埃达克型花岗岩来找矿。

埃达克型花岗岩与金铜成矿有关是根据许许多多的现象归纳出来的。当然, 以后或许可以找到斑岩铜矿与埃达克型花岗岩无关的实例, 但是, 这否定不了埃达克型花岗岩与斑岩铜矿有关的结论。地质现象是异常复杂的, 尤其矿床学领域, 什么情况都是可能的, 需要我们仔细去研究和探索。但是, 个别的

现象不能否定普遍的现象,个别的具有偶然性,而普遍的现象中蕴含着某种规律性的东西。

4.3 “上山”找金铜,“下山”找钨锡

笔者还提出“上山”找金铜,“下山”找钨锡的说法,是根据金、铜、钨、锡与不同类型花岗岩的时空关系得出来的(这里的“山”指的是成矿时期地壳加厚所围限的范围,非指现今的“山”,例如南岭现在是山而在侏罗纪时为盆或低地,据张旗等,2008;2009b)。“上山”找金铜与“先找埃达克岩再找矿”的说法有否矛盾?其实并不矛盾,“先找埃达克岩再找矿”,是说明埃达克型花岗岩与金铜有密切的时空联系,埃达克型花岗岩可以作为找矿的前提来使用。“上山”找金铜是“先找埃达克岩再找矿”说法的更进一步的概括和延伸。“上山”找金铜的说法仅适合产于陆内的C型埃达克岩而不适合产于岛弧的O型埃达克岩,其思路是:埃达克型花岗岩与加厚的地壳有关,地壳加厚必然形成高山(高原或山脉),埃达克型花岗岩出露在山上。“上山”找金铜包括3方面的内容:①找矿的岩石多了,既包括埃达克型花岗岩,也包括喜马拉雅型花岗岩;②找矿的地域扩大了,扩大到(由埃达克型和喜马拉雅型花岗岩及其他标志圈定的)高山的全部范围;③找矿不局限于埃达克型和喜马拉雅型花岗岩自身及周边,还包括更大的范围(如远离岩体的深度更浅的卡林型金矿)。

一般来说,在一个地区,埃达克型和喜马拉雅型花岗岩的分布总是不均匀的,有的地方岩体多,有的地方岩体少。此外,由于剥蚀程度的不同,岩体大小不同,火山岩多寡不同,有些甚至被掩盖。但是,只要是在高山的范围内,就具备找(金铜)矿的条件。因为,如果地壳因构造作用加厚了,就不是一个孤立的事件,不是局部的现象,它所引发的地表抬升应当具有一定的规模和范围,如果是高原,长宽至少几百公里,如果是山脉,延伸至少几百公里至上千公里。从理论上说,在这个高原和山脉上都有找到矿的可能性。鉴于成矿与成岩作用之间存在的差异,金铜可能分布在岩体内、岩体附件或远离岩体(如小秦岭和西秦岭的情况)。在考察物化探异常是否有利于成矿时,只需考虑异常本身及其他找矿标志,至于附近是否有埃达克型或喜马拉雅型花岗岩出露并不重要。因此,“上山”找金铜主要是从宏观控制和战略布局的角度出发的,仍然是将埃达克型(加上喜马拉雅型花岗岩)作为找矿的前提来考虑,它大大拓展了找矿的思路和空间,有利于用更短的时间,更小的代

价,找到更多的金铜资源。

4.4 “就矿找矿”的思路仍然适用

就一个地区而言,可能出现2种情况:①埃达克型和喜马拉雅型花岗岩分布很广,也有金铜矿产出,说明该区地壳厚,有地幔热的供给,有流体的带入,该区就具备了成矿的良好条件,可以在该区扩大找矿;②埃达克型和喜马拉雅型花岗岩很发育,但是无矿点和矿化现象,不适合在该区找矿,例如大别。这就是“就矿找矿”的原则。在这里,关键还是有否成矿的苗头。如果经过研究,认为成矿条件很好,但是没有矿点和矿化现象,找矿仍然是一筹莫展。一个地方如果有了成矿的苗头,进一步扩展就有了目标和方向。

5 几个实例的再认识

花岗岩与成矿关系的研究向我们提出了新的要求,即要求我们做研究要更加仔细一些,考虑问题要更加周详一些,数据要更加精确一些。下面举几个实例:

实例1 小秦岭金矿

小秦岭金矿究竟与什么有关?金源于何处?是研究小秦岭金矿必须回答的问题。大概有2种可能:①金与太华群有关;②金与燕山期花岗岩有关。从空间分布上看,金与太华群关系更加密切,因此,多数人倾向于金与太华群有关。如果是这样,那么,首先,我们需要了解太华群整体上金的分布情况,太华群金背景值高,是在矿体附近高?还是矿区范围内高?还是小秦岭全区范围都高?即小秦岭属于图19上图的情况还是下图的情况?如果太华群金的背景值是全区范围普遍高,而矿体附近金背景值低,说明石英脉的金源于围岩太华群(图19上图)。相反,如果金背景值仅仅是矿体附近或矿区范围内高,而小秦岭全区太华群金背景值并不高,说明金并非源于太华群。矿体附近和矿区内金背景值之所以高,是矿体带来的,是金从矿体向围岩扩散形成的(图19下图)。其次,需要从理论上比较太华群与花岗岩两类地质体赋存金矿的可能性。如果金源于太华群,必须查明太华群的成分,金与什么矿物相关以及赋存状态如何。③我们还必须回答:太华群何以富金?原因是什么?上述3个问题有了圆满的答案,才能确认金是否与太华群有关。

实例2 山东乳山金矿

乳山金矿是石英脉型金矿,围岩主要是昆崙山花岗岩(图18)。如果金矿与花岗岩有关,首先其考虑的必定是昆崙山花岗岩而不会考虑与金矿空间上无关的三佛山花岗岩。如果昆崙山花岗岩不是埃达克型花岗岩,是否会得出金矿与埃达克型花岗岩无关的结论呢?幸亏昆崙山是埃达克型的,才没有误导我们。仔细研究了乳山金矿的成岩与成矿时代后,发现金矿时代晚于昆崙山花岗岩约30~50 Ma,而与三佛山花岗岩时代接近(胡芳芳等,2006),于是得出结论:乳山金矿与昆崙山花岗岩无关,与三佛山花岗岩有关。那么,是否可以进一步推理认为昆崙山这类埃达克型花岗岩不利于成矿,而三佛山类型的花岗岩才有利于成矿呢?笔者不这样认为,理由如前所述。按照本文的认识,在胶东应当围绕郭家岭和三佛山这两期花岗岩去找矿,矿体可以在昆崙山和玲珑花岗岩内部、边部和外部,也可以在变质岩胶东群、粉子山群内或剪切带内,但是,不会离郭家岭和三佛山两期花岗岩很远。

实例3 海南岛抱伦金矿

抱伦金矿是一个特殊的实例,现有认识及资料说明,抱伦金矿与尖峰岭花岗岩有关,而尖峰岭花岗岩是典型南岭型的,与本文的结论相反。我们怎样考虑这个问题呢?抱伦金矿是海南最大的金矿,位于尖峰岭岩体外接触带,属热液石英脉型金矿。尖峰岭超单元是一个复式岩体,由尖峰岭单元中粗粒似斑状黑云母正长花岗岩、黑岭单元细粒似斑状黑云母正长花岗岩、金鸡岭单元粗中粒黑云母正长花岗岩、瘦岭单元(中)细粒黑云母正长花岗岩构成(图20)。过去一直认为金矿与尖峰岭岩体有关,十几年来进行了不少同位素定年研究,得出的岩体年龄在236~249 Ma之间,金矿时代在210~220 Ma左右。于是认为尖峰岭花岗岩和抱伦金矿都是印支期的,虽然年龄相差了16~30 Ma(引自谢才富等,2006)。而根据张小文等(2009)最新发表的资料,尖峰岭花岗岩时代为240 Ma,是印支期的;而抱伦金矿中热液锆石的年龄是112 Ma,是燕山晚期的,说明抱伦金矿与尖峰岭花岗岩无关。

张小文等(2009)的研究很有意义,其意义之一在于它推翻了早先的认识。早先为什么认为抱伦金矿与尖峰岭花岗岩有关呢?可能有两个原因:①空间上尖峰岭岩体与金矿伴生;②不准确的年代学资料得出的。意义之二在于它解除了我们的疑惑。因为,按照本文的认识,尖峰岭花岗岩是南岭型的,不

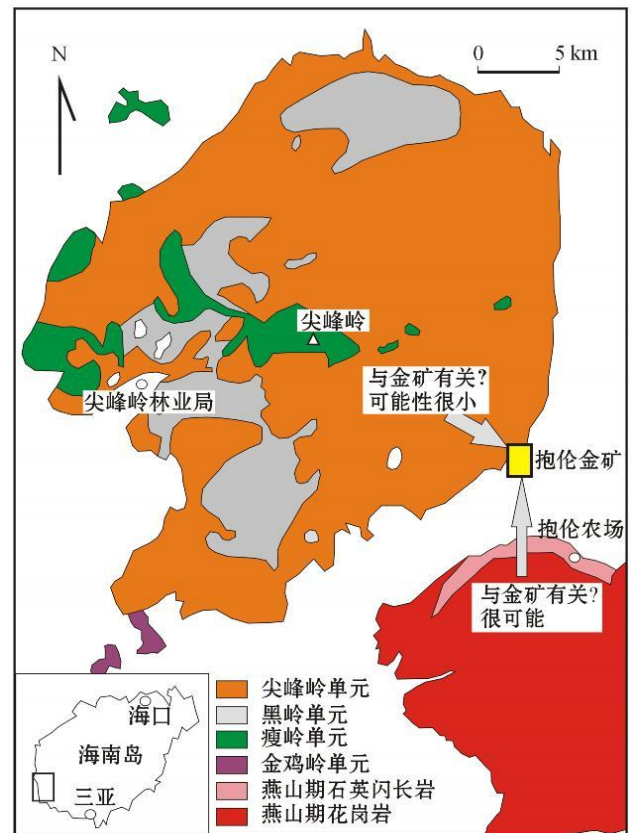


图20 海南尖峰岭花岗岩和抱伦金矿地质图
(据张小文等,2009简化)

Fig. 20 Geological sketch map of Jianfengling batholith and Baolun gold deposit (simplified from Zhang X W et al., 2009)

应当与金矿有关,而应当与钨锡成矿有关。实际上,在尖峰岭花岗岩已经发现了几个钨锡矿点(谢才富等,2006)。抱伦金矿既然是早白垩世晚期的,应当与该区早白垩世晚期的岩浆活动有关。因此,下一步的研究应当在该区寻找与金矿同期的花岗岩,并查明它是否为埃达克型或喜马拉雅型的。

非常有意思的是,据谢才富等(2006)和张小文等(2009)报道,海南有燕山期的岩浆活动,如位于矿区东南侧面积达数百平方千米的千家岩体,尖峰岭岩体内部也有早白垩世石英闪长岩出露,如抱伦农场南的花岗岩(角闪石 K-Ar 稀释法年龄为113~97 Ma,刘玉琳等,2002),与抱伦金矿早白垩世热液活动年龄大体一致。张小文等(2009)推测,该区不但发育大规模早白垩世的岩浆活动,而且可能还有大量该时期的岩体埋藏在尖峰岭花岗岩以及该区地层之下未被剥露,该期岩浆活动为同时期的热液活

动提供了热源。笔者预测,尖峰岭花岗岩与金矿无关,抱伦农场花岗岩可能与金矿有关,虽然后者与金矿空间上并不伴生(图20)。

上述实例告诉我们:金矿与围岩的空间关系固然重要,但是,更重要的是时间关系。时空有关并非两者必须形影相随,时空有关的关键是“时”,其次是“空”。如果将两者颠倒过来,重视“空”而忽略“时”,将把我们的研究引入歧途。小秦岭金矿在太华群中,金却与空间上无关的埃达克型花岗岩有关。乳山金矿在昆崙山花岗岩中,成矿却与空间上无关的三佛山花岗岩有关,虽然它们都是埃达克型的。抱伦金矿位于尖峰岭花岗岩边部,成矿却与尖峰岭花岗岩无关。金矿与埃达克型和喜马拉雅型花岗岩有关而不是与南岭型花岗岩有关可能是有道理的,至少众多的实例不会错。

抱伦金矿的实例还告诉我们:成岩与成矿的关系需要过细的研究,需要精确的地球化学和同位素定年资料。就抱伦金矿与花岗岩的关系来说,现在下结论还为时过早,需要再研究,以便得出新的准确的结论。

6 几点启示

本文关于成岩与成矿关系的讨论有如下一些启示:

(1) 成矿与成岩究竟是成因有关还是时空有关? 早先大多认为是前者,本文认为是后者。成岩与成矿不是一回事,它们的源区不同,岩浆和矿液性质不同,成岩和成矿过程不同。成岩与成矿有关主要表现在2个方面:即源区深度和形成时空上。

(2) 含矿岩体和成矿母岩的说法是否正确? 早先大多认为是这样,本文否定了这一说法。例如斑岩铜矿的斑岩与铜矿如影相随,但是,在一个矿区,为什么有的斑岩有矿,有的斑岩无矿? 仔细分析才知:斑岩源于下地壳,铜矿源于地幔或底侵的玄武岩,两者不同源。因此,斑岩不是铜矿的母岩,含矿岩体和无矿岩体的说法不成立。

(3) 金铜与埃达克型和喜马拉雅型花岗岩有关,钨锡与南岭型花岗岩有关,指的是什么含义? 答案仍然是与源区有关和时空有关,而非与成因有关。源区有关指示钨锡在减薄的伸展背景下成矿,金铜在地壳加厚的挤压背景下成矿,即所谓:“上山”找金铜,“下山”找钨锡。

(4) 花岗岩与成矿有关对于找矿有什么用处呢? 早先非常重视两者关系的研究,倾注了极大的精力去识别含矿岩体和无矿岩体,去找成矿母岩或在成矿母岩中找矿。本文则淡化这一认识,认为花岗岩只是找矿的前提,不能把它作为找矿标志使用。例如,要找金铜,则应当到古代的山脉中去找;要找钨锡,则去古代的盆地中去找。反之,如果证明某处存在某个地质时期的山脉或高原,则有希望在该处寻找该时期的金铜;如果鉴别出某地保存一个地质时期的盆地,则有望在该地寻找该时期的钨锡。

(5) 正因为成岩与成矿如此的不同,研究它们的方法和思路也应当不同。对花岗岩应着重详细和精确的地球化学和同位素年代学研究,查明其形成的深度及源区特征;对金铜钨锡则应着重矿液形成和矿床沉淀过程中的化学变化及矿床形成条件的研究。找矿则是利用各种技术手段探寻矿床沉淀的位置。

7 结论

(1) 金铜成矿与埃达克型和喜马拉雅型花岗岩有关,钨锡成矿与南岭型花岗岩有关,其原因主要取决于成岩和成矿的深度,其次还可能取决于氧逸度。深度大,压力大,氧逸度高,有利于金铜的萃取;相反,深度浅,压力低,还原环境,有利于钨锡被萃取。因此,金铜和钨锡成矿是相悖的,它们不可能同时同地出现,但是,可以叠加或相邻在一起。

(2) 中酸性岩浆岩与成矿作用的关系大体可以这样表述:埃达克型花岗岩与斑岩铜矿有关,虽然不是每一个埃达克质斑岩都有矿,但是,凡是斑岩型铜矿的斑岩,90%以上可能是埃达克型花岗岩;埃达克型和喜马拉雅型花岗岩与金矿有关,同样,不是每一个埃达克型和喜马拉雅型花岗岩都有矿,但可以反过来说,凡是与金铜矿有关的花岗岩,绝大多数可能是埃达克型或喜马拉雅型花岗岩;钨锡与南岭型花岗岩有关,同样,并非每个南岭型花岗岩都有钨锡矿,但是,凡是与钨锡矿有关的花岗岩,绝大多数可能是南岭型花岗岩。

(3) 为什么有的埃达克型花岗岩与铜矿有关,有的与金矿有关? 原因不清楚。推测可能与源岩中金铜被萃取的条件以及金铜最终沉淀的条件有关。金铜皆源于地幔和玄武质岩浆,如果金比铜更容易被萃取,则有利于金的成矿,反之则有利于铜的成矿。

分别富含金铜的矿液在地表浅部何者能够富集成矿,就成何矿,此其一;其二,还与剥蚀程度有关,如果剥蚀很浅,则有利于寻找金矿(卡林型),此时岩浆岩很少,多以很小的岩株或岩脉出现;如果剥蚀较浅,以斑岩为主,则出现斑岩型和矽卡岩型铜矿或金铜矿;如果剥蚀较深,则以金矿为主(蚀变岩型、剪切破裂带型、石英脉型)。

(4)卡林型金矿与花岗岩成矿的关系表明,卡林型金矿也与埃达克型或喜马拉雅型花岗岩有关,包括美国著名的卡林型金矿的发源地内华达州。研究表明,内华达州卡林型金矿成矿时该区地壳很厚,可能为一始新世的山脉,查明该山脉的范围和时限,对于该区找矿是有益的。此外,不但要注意该带的金矿,可能还有发现斑岩铜矿的可能性。

(5)成岩和成矿是不同的两回事,有各自独立的不同过程。成岩基本上是一个物理过程,而成矿主要表现为化学过程。岩浆不同于矿液,尤其是花岗质岩浆,具有很大的黏性,很难发生对流、结晶分离、混合和混染;而矿液是流体,极易发生变化,极易与其他物质混合,发生各种化学反应。成岩需要热,这是最基本的条件;成矿需要热、流体以及合适的矿源,三个条件缺一不可。因此,成矿比成岩复杂得多,也苛刻得多。在一个地区,成岩作用可以很普遍,但是,成矿可能很局限。

(6)花岗岩与成矿有关不是指的成因有关。花岗岩源于下地壳,金铜源于地幔或玄武岩,两者不同源,花岗岩与金铜既不是“母子关系”,也非“兄弟关系”,只是“邻居关系”。如果花岗岩和金铜均源于底侵的玄武岩,则花岗岩与金铜同源,玄武岩是“母”,花岗岩和金铜是玄武岩的“子”,花岗岩与金铜是“兄弟关系”。对于钨锡来说,与花岗岩一样,也源于下地壳,则下地壳是花岗岩和钨锡共同的“母”,花岗岩和钨锡是“子”,花岗岩和钨锡也是“兄弟关系”。在任何情况下,花岗岩都不是金铜或钨锡的“母岩”,花岗岩与成矿无成因关系。因此,区分含矿岩体和无矿岩体没有意义,成矿岩体的说法也是不对的。

(7)花岗岩与成矿有关主要指的是时空有关。本文更强调时空有关中的时间:成矿大体与成岩同时,可略早于或晚于成岩;而空间上则可以是变化的,可以在一起,也可以不在一起(在岩体内部、岩体边部甚至远离岩体)。矿体的围岩未必与成矿有关(如小秦岭金矿的太华群、胶东金矿的胶东群、西秦岭卡林型金矿的围岩碳酸盐岩以及抱伦金矿的尖峰

岭花岗岩),远离矿体的花岗岩未必与成矿无关。因此,时空有关的关键是“时”,其次才是“空”。如果将两者颠倒过来,重视“空”而忽略“时”,将把我们的研究引入歧途。

(8)总之,花岗岩与成矿的关系,不论金铜、钨锡,花岗岩都是找矿的前提而非找矿的标志。找矿之前需要查明成矿与花岗岩是否有关和如何有关,发现矿以后继续找矿和扩大找矿,就应当致力于成矿条件和找矿标志的研究了。在这个阶段如果还需要研究花岗岩,则着力于花岗岩与成矿的时空联系,仍然不能把花岗岩当成找矿标志来使用。

花岗岩是岩浆岩中最复杂的,许多基本的问题都还没有搞明白(张旗等,2008),而成矿比花岗岩更复杂。一个地区总结出来的花岗岩理论可以应用于其他地区,不分地域,不论国内国外;而一个地区总结出来的成矿规律或成矿模式则很难一成不变地应用于其他地区。原因即在于成岩大体上是一个物理过程而成矿是一个化学过程,我们现在观察到的成矿现象可能并非原来意义上的、本质的现象。岩石学从实践到理论相对比较容易,而矿床学从实践到理论非常艰难。从矿液转变为矿床的过程(矿液沉淀的过程)是最难琢磨也是目前矿床学研究中最薄弱的环节。矿床学研究有不同于岩浆岩的思路、手段和方法,矿床学研究要更上一层楼,需要在化学和实验研究上下更大的功夫。

志 谢 本文的想法曾经在中国科学院地质与地球物理研究所展示过,并与张连昌和秦克章研究员进行过讨论,桂林有色矿产地质研究院姚金炎教授级高工对本文的评论以及审稿人对本文的评述对本文的修改有益,在此谨致以衷心的感谢。

References

- Anderson J L and Morrison J. 2003. Ilmenite, magnetite and Mesoproterozoic granites of Laurentia[A]. In: Ramo O T, Kosunen P J, Lauri L S, Karhu J A, eds. Granitic systems: State of the art and future avenues an international symposium in honor of professor Ilmari Haapala[C]. January 12– 14, Abstract volume. Helsinki University Press. 7– 12.
- Bai D Y, Jia B H, Li J D, Wang X H, Ma T Q, Zhang X Y and Chen B H. 2007. Important significance of regional tectonic regime to metallogenic capacity of Indosinian and Early Yanshanian granites in southeastern Hunan: A case study of Qianlishan and Wangxianling plutons[J]. Mineral Deposits, 26: 487– 500 (in Chinese with English abstract).

- lish abstract).
- Bellon H and Yumul Jr G P. 2001. Miocene to Quaternary adakites and related rocks in Western Philippine arc sequences [J]. *Earth and Planetary Sciences*, 333: 343– 350.
- Cai M H, Liang T, Wu D C and Huang H M. 2004a. Geochemical characteristics of granites and their tectonic setting of Dachang ore field in Guangxi [J]. *Geological Science and Technology Information*, 23: 57– 62 (in Chinese with English abstract).
- Cai M H, Liang T, Wu D C and Huang H M. 2004b. Geochemical characteristics of granites and its structural genetic environment in the Nandan– Hechi metallogenic belt, northwest Guangxi [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 28: 306– 313 (in Chinese with English abstract).
- Cao D H, Wang A J, Li W C, Wang G S, Li W P and Li Y K. 2009. Magma mixing in the Pulang porphyry copper deposit: Evidence from petrology and element geochemistry [J]. *Acta Geologica Sinica*, 83: 166– 175 (in Chinese with English abstract).
- Chambefort I, Moritz R and von Quadt A. 2007. Petrology, geochemistry and U– Pb geochronology of magmatic rocks from the high– sulfidation epithermal Au – Cu Chelopech deposit, Srednogie zone, Bulgaria [J]. *Miner. Deposita*, 42: 665– 690.
- Chen B. 2002. Characteristics and genesis of the Bayan Bold Pluton in southern Sonid Zuoqi, Inner Mongolia: Typical island arc magmatic rocks instead of adakitic rocks [J]. *Geological Review*, 48: 261– 266 (in Chinese with English abstract).
- Chen F W and Fu J M. 2005. Geological and petrochemical characteristics of main Mesozoic tin– mineralized granitoids and regional metallogenic regularities in Nanling region [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (2): 12– 21 (in Chinese with English abstract).
- Chen W L and Liao Z Z. 1999. The characteristics and ore– bearing properties of granitic mass in Haiyangshan Mountain, Guangxi [J]. *Guangxi Geology*, 12 (3): 7– 12 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y J and Li N. 2009. Nature of ore– fluids of intracontinental intrusion– related hypothermal deposits and its difference from those in island arcs [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25: 2477– 2508 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Pirajno F, Lai Y and Li C. 2004. Metallogenic time and tectonic setting of the Jiaodong gold province, eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 907– 922 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Y B, Mao J W, Xie G Q, Chen M H, Zhao C S, Yang Z X, Zhao H J and Li X Q. 2008. Petrogenesis of the Laochang – Kafang granite in the Gejiu area, Yunnan Province: Constraints from geochemistry and zircon U – Pb dating [J]. *Acta Geologica Sinica*, 82: 1476– 1493 (in Chinese with English abstract).
- Costil H T, Dall Agnol R, Borges R M K, Minuzzi O R R and Teixeira J T. 2002. Tin– bearing sodic episyenites associated with the Proterozoic, A– type Agua Boa granite, Pitinga mine, Amazonian craton, Brazil [J]. *Gondwana Research*, 5: 435– 451.
- Dai C G and Yang D H. 2000. A characteristic of Nanjia granite rocks and relationship with ore– forming process in Guizhou [J]. *Guizhou Geology*, 17 (3): 160– 165, 175 (in Chinese with English abstract).
- Dai S, Ren Y Z, Ceng Y, Gao Z K, Zhang X and Wang F C. 2002. The ore– bearing porphyry at island– arc in the Gongpoquan copper deposit: Its geology and geochemistry [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 38(5): 100– 107 (in Chinese with English abstract).
- Dall Agnol R, Teixeira N P, Ramo O T, Moura C A V, Macambira M J B and De Oliveira D C. 2005. Petrogenesis of the Paleoproterozoic rapakivi A– type granites of the Archean Carajás metallogenic province, Brazil [J]. *Lithos*, 80: 101– 129.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere [J]. *Nature*, 347: 662– 665.
- Defant M J, Xu J F, Kepezhinskas P, Wang Q, Zhang Q and Xiao L. 2002. Adakites: Some variations on a theme [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 129– 142.
- Deng X G, Li X H, Liu Y M, Huang G F and Hou M S. 2005. Geochemical characteristics of Qitianling granites and their implications for mineralization [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24: 93– 102 (in Chinese with English abstract).
- Dostal J and Chatterjee A K. 1995. Origin of topaz– bearing and related peraluminous granites of the Late Devonian Davis Lake pluton, Nova Scotia, Canada: Crystal versus fluid fractionation [J]. *Chemical Geology*, 123: 67– 88.
- Esmaily D, Nedelec A, Valizadeh M V, Moore F and Cotton J. 2005. Petrology of the Jurassic Shah– Kuh granite (eastern Iran), with reference to tin mineralization [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25: 961– 980.
- Feng C Y, Xu J X, Zeng Z L, Zhang D Q, Qu W J, She H Q, Li J W, Li D X, Du A D and Dong Y J. 2007. Zircon SHRIMP U– Pb and molybdenite Re– Os dating in Tianmenshan– Hongtaoling tungsten – tin orefield, southern Jiangxi Province, China, and its geological implication [J]. *Acta Geologica Sinica*, 81: 952– 963 (in Chinese with English abstract).
- Feng J and Zhang Z C. 2009. Geochemistry of the intermediate– acid porphyries on southern margin of the Altay mountains and its implications for petrogenesis [J]. *Geology Review*, 55: 58– 72 (in Chinese with English abstract).
- Fu J M, Xie C F, Peng S B, Yang X J and Mei Y P. 2006. Geochemistry and crust– mantle magmatic mixing of the Qitianling granites and their dark microgranular enclaves in Hunan Province [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 27: 557– 569 (in Chinese with English abstract).
- Gao Y, Zhang Z C and Yang T Z. 2009. Geology– geochemistry and petrogenesis of late Hercynian granites in Baoshan area, Heilongjiang Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28: 433– 449 (in Chinese with English abstract).
- Ge L S, Deng J, Zhang W Z, Lei S B, Qing M, Guo X D and Zhang Y C. 2009. Gold deposits of China (II): New breakthrough of geological exploration of the gold deposits [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 24(1): 1– 10 (in Chinese with English abstract).

English abstract).

- Gomes M E P and Neiva A M R. 2002. Petrogenesis of tin-bearing granites from Ervedosa, Northern Portugal: The importance of magmatic processes[J]. *Chem. Erde*, 62: 47–72.
- Gonzalez P E, Levrèsse G, Carrillo C A, Cheilletz A, Gasquet D and Jones D. 2003. Paleocene adakite Au–Fe bearing rocks, Mezcala, Mexico: evidence from geochemical characteristics[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 80: 25–40.
- Gu S Y, Hua R M and Qi H W. 2006. Geochemistry and petrogenesis of the Yanshanian Huashan–Guposhan granites in Guangxi[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25: 97–108 (in Chinese with English abstract).
- Guo Z F, Wilson M and Liu J Q. 2007. Post-collisional adakites in south Tibet: Products of partial melting of subduction-modified lower crust[J]. *Lithos*, 96: 205–224.
- Haapala I, Frindt G and Kandara J. 2007. Cretaceous Gross Spitzkoppe and Klein Spitzkoppe stocks in Namibia: Topaz-bearing A-type granites related to continental rifting and mantle plume[J]. *Lithos*, 97: 174–192.
- Hou M L, Jiang Y H, Jiang S Y, Ling H F and Zhao K D. 2007. Contrasting origins of late Mesozoic adakitic granitoids from the northwestern Jiaodong Peninsula, east China: Implications for crustal thickening to delamination[J]. *Geol. Mag.*, 144: 619–631.
- Hou Z Q, Ma H W, Khin Z, Zhang Y Q, Wang M J, Wang Z, Pan G T and Tang R L. 2003. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: Product of large-scale strike-slip faulting in Eastern Tibet[J]. *Econ. Geol.*, 98: 125–145.
- Hu F F, Fan H R, Yang J H, Wang F and Zhai M G. 2006. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating age of sericite from altered rocks in the Rushan bode gold deposit, Jiaodong peninsula and its constraints on the gold mineralization[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 25: 109–114 (in Chinese with English abstract).
- Hua R M, Zhang W L, Chen P R and Wang R C. 2003. Comparison in the characteristics, origin and related metallogeny between granites in Dajiling and Piaotang, southern Jiangxi, China[J]. *Geological Journal of China University*, 9: 609–619 (in Chinese with English abstract).
- Huang S S, Xu Z W, Gu L X, Hua M, Lu X C, Lu J J, Nie G P and Zhu S P. 2004. A discussion on geochemical characteristics and genesis of intrusions in Shizishan orefield, Tongling area, Anhui Province[J]. *Geological Journal of China University*, 10: 217–226 (in Chinese with English abstract).
- Huang Z B, Wei Z J and Jin X. 2005. The geochemical characteristics of mine adakitic quartz-diorite complexes from the Beishan area, Gansu Province and its geological significance[J]. *Acta Geologica Gansu*, 14(2): 30–34 (in Chinese with English abstract).
- Jin Z P, Li Y J, Huang W T, Li Z C and Fu G M. 2004. The geological features and its mineralizing information of the Pingdao granite in Tianshu[J]. *Acta Geologica Gansu*, 13(2): 24–30 (in Chinese with English abstract).
- Juliani C, Correa-Silva R H, Monteiro L V S, Bettencourt J S and Nunes C M D. 2002. The Batalha Au–granite system – Tapajós Gold Province, Amazonian craton, Brazil: Hydrothermal alteration and regional implications[J]. *Precambrian Research*, 119: 225–256.
- Konopelko D, Seltmann R, Biske G, Lepekhina E and Sergeev S. 2009. Possible source dichotomy of contemporaneous post-collisional barren I-type versus tin-bearing A-type granites, lying on opposite sides of the South Tien Shan suture[J]. *Ore Geology Reviews*, 35: 206–216.
- Lamarao C N, Dall'agnol R, Lafon J M and Lima E F. 2002. Geology, geochemistry, and Pb/Pb zircon geochronology of the Paleoproterozoic magmatism of Vila Riozinho, Tapajós Gold Province, Amazonian craton, Brazil[J]. *Precambrian Research*, 119: 189–223.
- Leng C B, Zhang X C, Chen Y J, Wang S X, Gou T Z and Chen W. 2007a. Discussion on the relationship between Chinese porphyry copper deposits and adakitic rocks[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 199–210 (in Chinese with English abstract).
- Leng C B, Zhang X C, Wang S X, Qin C J and Gou T Z. 2007b. Geochemical characteristics of porphyry copper deposits in the Zhongdi area, Yunnan as exemplified by the Xuejiping and Pulang porphyry copper deposits[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 27: 414–422 (in Chinese with English abstract).
- Lenharo S L R, Moura M A and Botelho N F. 2002. Petrogenetic and mineralization processes in Paleoproterozoic rapakivi granites: Examples from Pitinga and Goias, Brazil[J]. *Precambrian Research*, 119: 277–299.
- Li B, Zhao Z D, Wang L L, Dong G C and Dong X. 2007. Geochemistry of the ore-bearing porphyry of the Qulong Cu (Mo) deposit in the Gendese belt, Tibet[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 29(Supp.): 195–201 (in Chinese with English abstract).
- Li C D, Zhang Q, Miao L C and Meng X F. 2004. Mesozoic high-Sr, low-Y and low-Sr, low-Y types granitoids in the northern Hebei Province: Geochemistry and petrogenesis and its relation to mineralization of gold deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 269–284 (in Chinese with English abstract).
- Li J W, Pei R F, Zhang D Q, Mei Y X, Zang W S, Meng G X, Zeng P S, Li T J and Di Y J. 2007. Geochemical characteristics of the Yanshanian intermediate-acid intrusive rocks in the Tongling mineralization concentration area, Anhui Province, and their geological implications[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 28: 11–22 (in Chinese with English abstract).
- Li L Z, Yang S C and Kang B H. 1995. Geologic features and ore content of porphyry group in the Himalayan epoch in Xifanping–Mofancun, Yanyuan[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 15: 283–293 (in Chinese with English abstract).
- Li Y J, Yang G X, Wu H E, Si G H, Jin Z and Zhang Y Z. 2009. The determination of Beilekuduke aluminous A-type granites in east Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28: 17–25 (in Chinese with English abstract).
- Li Z L, Hu R Z, Yang J S, Peng J T, Li X M and Bi X W. 2007. He, Pb and S isotopic constraints on the relationship between the A-

- type Qitianling granite and the Furong tin deposit, Hunan Province, China[J]. *Lithos*, 97: 161– 173.
- Liang G B. 2008. Geochemical characteristics of the Motianling composite granitoid and mineralization in north Guangxi[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 28(1): 8– 14(in Chinese with English abstract).
- Ling H F, Hu S X, Sun J G, Ni P and Shen K. 2002. Geochemical study of granitic wall- rock alteration in Dayingezhuang gold deposit of alteration rock type and Jinqingding gold deposit of quartz- vein type[J]. *Mineral Deposits*, 21: 187– 199(in Chinese with English abstract).
- Liu M Q. 2007. Geochemical characteristics and geological significance of adakitic granitoids in Hongshishan area of the Beishan orogenic belt, Gansu Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26: 232– 238(in Chinese with English abstract).
- Liu W B, Liu Z H and Zhang S J. 2003. Geological and geochemical features of Shangcheng granite body and its genetic implication, Henan[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (4): 17– 23(in Chinese with English abstract).
- Liu Y L, Ding S J, Zhang X W, et al. 2002. Ore- forming age of the Baolun gold deposit, Ledong County, Hainan[J]. *Geological Review*, 48(Supp.): 84– 87(in Chinese with English abstract).
- Liu Z W and Wang C L. 2007. Granitoid geochemistry and gold- copper mineralization in the Danghenanshan area, southern Qilian Mountains[J]. *Geology and Prospecting*, 43: 64– 73(in Chinese with English abstract).
- Luo M J, Li S M, Lu X X, Zheng D Q and Su Z B. 2000. Metallogenesis and deposit series of main mineral resources of Henan Province[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 355p(in Chinese with English abstract).
- Luo Z H, Lu X X, Chen B H, et al. 2009. Introduction to the metallogenic theory on the transmagmatic fluids[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 177p(in Chinese with English abstract).
- Ma T Q, Wang X H and Bai D Y. 2004. Geochemical characteristics and its tectonic setting of the Xitian tungsten- tin- bearing granite pluton[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (1): 11– 16(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, Li X F, Wang Y T, Zhang C Q and Li Y F. 2005. Mesozoic large scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 169– 188(in Chinese with English abstract).
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archean granitoids[J]. *Lithos*, 46: 411– 429.
- Martin- Izard A, Fuentes- Fuente M, Cepedal A, Moreiras D, Nieto J G, Maldonado C and Pevida C R. 2000. The Rio Narcea gold belt intrusions: Geology, petrology, geochemistry and timing[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 71: 103– 117.
- Meza F D, Valencia M M, Valencia V A, Ochoa L L, Perez S E and Diaz S C. 2003. Major and trace element geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of Laramide plutonic rocks associated with gold- bearing Fe skarn deposits in Guerrero state, southern Mexico [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 16: 205– 217.
- Miao L C, Fan W M, Zhai M G, Qiu Y M, McNaughton N J and Groves D I. 2003. Zircon SHRIMP U – Pb geochronology of the granitoid intrusions from Jinchanggouliang – Erdaogou gold orefield and its significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19: 71– 80(in Chinese with English abstract).
- Neiva A M R, Williams I S, Ramos J M F, Gomes M E P, Silva M M V G and Antunes I M H R. 2009. Geochemical and isotopic constraints on the petrogenesis of Early Ordovician granodiorite and Variscan two- mica granites from the Gouveia area, central Portugal[J]. *Lithos*, 111: 186– 202.
- Qiu Q L, Gong Q S, Lu S W and Liu S X. 2008. Geochemical characteristics and geological significance of adakitic granitoids in Xiahe County of Gansu Province[J]. *Gansu Geology*, 17(3): 6– 12(in Chinese with English abstract).
- Qu X M and Xin H B. 2006a. Ages and tectonic environment of the Bangong Co porphyry copper belt in western Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 25: 792– 799(in Chinese with English abstract).
- Qu X M, Hou Z Q and Li Y G. 2004. Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore- bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan plateau[J]. *Lithos*, 74: 131– 148.
- Qu X M, Xin H B, Xu W Y, Yang Z S and Li Z Q. 2006b. Discovery and significance of copper- bearing bimodal rock series in Coqin area of Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 707– 716(in Chinese with English abstract).
- Raith J G. 1995. Petrogenesis of the concordia granite gneiss and its relation to W – Mo mineralization in western Namaqualand, South Africa[J]. *Precambrian Research*, 70: 303– 335.
- Ressel M W and Henry C D. 2006. Igneous geology of the Carlin trend, Nevada: Development of the Eocene plutonic complex and significance for Carlin- type gold deposits[J]. *Econ. Geol.*, 101: 347– 383.
- Rui Z Y, Zhang H T, Chen R Y, Wang Z L, Wang L S and Wang Y T. 2006. An approach to some problems of porphyry copper deposits[J]. *Mineral Deposits*, 25: 491– 500(in Chinese with English abstract).
- Ruiza C, Fernandez- Leyva C and Locutura J. 2008. Geochemistry, geochronology and mineralisation potential of the granites in the Central Iberian Zone: The Jalama batholith[J]. *Chemie der Erde*, 68: 413– 429.
- She H Q, Zhang D Q, Jing X Y, Guan J, Zhu H P, Feng C Y and Li D X. 2007. Geological characteristics and genesis of the Ulan Uzhur porphyry copper deposit in Qinghai[J]. *Geology in China*, 34: 306– 314(in Chinese with English abstract).
- Shen P, Shen Y C, Liu T B, Dai H W and Yang Y H. 2009. Geochemical signature of porphyries in the Baogutu porphyry copper belt, western Junggar, NW China[J]. *Gondwana Research*, 16: 227– 242.
- Shi Y R, Liu D Y, Zhang Q, Jian P, Zhang F Q, Miao L C, Shi G H, Zhang L Q and Tao H. 2005. The petrogenesis and SHRIMP dat-

- ing of the Baiyinbaolidao adakitic rocks in southern Suzuoqi, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 143– 150(in Chinese with English abstract).
- Sun S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. In: Saunders A D and Norry M J, eds. *Magmatism in the Ocean Basins*[M]. London: Geological Society. 313– 345.
- Tang G J, Wang Q, Zhao ZH, Wyman D A, Chen H H, Jia XH and Jiang Z Q. 2009. Geochronology and geochemistry of the ore-bearing porphyries in the Baogutu area (western Junggar): Petrogenesis and their implications for tectonics and Cu– Au mineralization [J]. *Earth Science*, 34(1): 56– 74(in Chinese with English abstract).
- Tang H F, Qu W J, Su Y P, Hou G S, Du A D and Cong F. 2007. Genetic connection of Sareshike tin deposit with the alkaline A-type granites of Sabei body in Xinjiang: Constraint from isotopic ages[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23: 1989– 1997(in Chinese with English abstract).
- Trumbull R B, Hua L, Lehrberger G, et al. 1996. Granitoid-hosted gold deposits in the Anjiayingzi district of Inner Mongolia, People's Republic of China[J]. *Econ. Geol.*, 91: 873– 895.
- Ugarkar A G, Panaskar D B and Gowda G R. 2000. Geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of metavolcanics and their implications for gold mineralisation in Gadag gold field, southern India[J]. *Gondwana Research*, 3(3): 371 – 384.
- Wang J R, Guo Y S, Fu S M, Chen J L, Qin X F, Zhang H P and Yang Y J. 2005. Early Paleozoic adakitic rocks in Heishishan, Gansu and their significance for tectonics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 977– 985(in Chinese with English abstract).
- Wang J R, Wu C J, Cai Z H, Guo Y S, Wu J C and Liu X H. 2006. Early Paleozoic high-Mg adakite from Yndongliang in the eastern section of the north Qilian: Implications for geodynamics and Cu– Au mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 2655– 2664(in Chinese with English abstract).
- Wang J, Jin Q, Lai S C, Qin J F and Li X. 2008. Research of geochemistry and petrogenesis of the Wubang granites in the Fuping region, south Qinling Mountains[J]. *J. Mineral Petrol.*, 28: 79– 87 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Wyman D K, Xu J F, Zhao Z H, Jian P, Xiong X L, Bao Z W, Li C F and Bai Z H. 2006a. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu– Au mineralization[J]. *Lithos*, 89: 424– 446.
- Wang Q, Xu J F, Jian P, Bao Z W, Zhao Z H, Li C F, Xiong X L and Ma J L. 2006b. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, south China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization[J]. *Journal of Petrology*, 47: 119– 144.
- Wang Q, Xu J F, Zhao Z H, Wang R J and Xiong X L. 2002. Geochemical characteristics and genesis of Yanshanian intrusive rocks in Fanshan, Hebei Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 22: 160– 168(in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Zhao Z H, Xu J F, Bai Z H, Wang J X and Liu C X. 2004. The geochemical comparison between the Tongshankou and Yinzu adakitic intrusive rocks in southeastern Hubei: (De)laminated lower crustal melting and the genesis of porphyry copper deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 351– 360(in Chinese with English abstract).
- Wang X W, Wang X D, Liu J Q and Chang H L. 2004. Relationship of Qitianling granite to Sn mineralization in Hunan Province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 23: 1– 12(in Chinese with English abstract).
- Wang Y J, Liu J H, Xu Z W, Fang C Q, Jiang S Y, Yang X N, Zhang J and Li H Y. 2007. Petrochemical characteristics and discussion on the genesis of the Datuanshan quartz diorite in Tongling area, Anhui Province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 22: 264– 269, 286(in Chinese with English abstract).
- Wang Y L, Pei R F, Li J W, Wu J D, Li L and Wang H L. 2007. Geochemical characteristics and tectonic setting of Laochang granite in Gejiu[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81: 979– 985(in Chinese with English abstract).
- Wang Y T, Mao J W, Lu X X and Ye A W. 2002. ^{40}Ar – ^{39}Ar dating and geological implication of auriferous altered rocks from the middle– deep section of Q875 gold– quartz vein in Xiaoqinling area, Henan China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 47: 1750– 1755.
- Wang Z H, Guo X D, Ge L S, Wang K Q, Zou Y L, Zhang Y and Yu W Q. 2009. Geochemistry of the Machangqing alkaline-rich porphyry in Xiangyun, Yunnan Province[J]. *Geology and Exploration*, 45: 343– 351(in Chinese with English abstract).
- Wu C J, Wang J R, Guo J H, Yu G M and Wu J C. 2009. Metallogenic significance and geochemical characteristics of granite rock from Yangshan gold ore belt Wenxian in Gansu Province[J]. *Mineral Resources and Geology*, 23: 345– 351(in Chinese with English abstract).
- Wu G Y, Pan Z F, Li J D, Xiao Q H and Che Q J. 2005. Geological and geochemical characteristics of the Dayishan granitoids in southern Hunan and their relations to mineralization[J]. *Geology in China*, 32: 434– 442(in Chinese with English abstract).
- Wu H E, Yang G X, Li Y J, Si G H and Jin Z. 2008. Characteristics of geochemistry of the Xikuangbei granite– porphyry in Kalamaili area, east Junggar[J]. *Xinjiang Geology*, 26: 325– 329(in Chinese with English abstract).
- Xie C F, Zhu J C, Ding S J, Zhang M Y, Chen M L, Fu Y R, Fu T A and Li Z H. 2006. Age and petrogenesis of the Jianfengling granite and its relationship to metallogenesis of the Baolun gold deposit, Hannan Island[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 2493– 2508(in Chinese with English abstract).
- Xiong X L, Adam J and Green T H. 2005. Rutile stability and rutile/mdt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: implications for TTG genesis[J]. *Chemical Geology*, 218: 339– 359.
- Xiong X L, Zhao Z H, Bai Z H, Mei H J, Xu J F and Wang Q. 2001. Origin of Awulale adakitic sodium-rich rocks in western Tianshan:

- Constraints for Nd and Sr isotopic compositions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17: 514– 522 (in Chinese with English abstract).
- Xu Q D, Zhong Z Q, Zhou H W, Yang F C and Tang X C. 1998. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Xiaqingling gold area in Henan Province[J]. *Geology Review*, 44: 323– 327 (in Chinese with English abstract).
- Xu S M, Mo X X, Zeng P S, Zhang W H, Zhao H B and Zhao H D. 2006. Characteristics and origin of alkali-rich porphyries from Beiya in western Yunnan[J]. *Geoscience*, 20: 527– 535 (in Chinese with English abstract).
- Yang J H, Zhu M F, Liu W and Zhai M G. 2003. Geochemistry and petrogenesis of Guojialing granodiorites from the northwestern Jiaodong Peninsula, eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19: 692– 700 (in Chinese with English abstract).
- Yang X M, Lentz D R, Chi G X and Thorne K G. 2008. Geochemical characteristics of gold-related granitoids in southwestern New Brunswick, Canada[J]. *Lithos*, 104: 355– 377.
- Yao J M, Hua R M and Lin J F. 2005. Zircon LA-ICPMS U-Pb dating and geochemical characteristics of Huangshaping granite in southeast Hunan Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 688– 696 (in Chinese with English abstract).
- Yokart B, Barr S M, Williams-Jones A E and Macdonald A S. 2003. Late-stage alteration and tin-tungsten mineralization in the Khuntan Batholith, northern Thailand[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21: 999– 1018.
- You X M. 1999. Research on magma origin and mineralogical-geotectonic background of porphyry in Gongpoquan copper ore district, Gansu Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 23: 167– 171 (in Chinese with English abstract).
- Yu Y C, Wu S C and Liang T G. 2006. Metallogenic geological characteristics and ore prospecting direction in Xitian area[J]. *Resources Survey and Environment*, 27: 136– 142 (in Chinese with English abstract).
- Zeng P S, Li W C, Wang H P and Li H. 2006. The Indosinian Pulang superlarge porphyry copper deposit in Yunnan, China: Petrology and chronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 989– 1000 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H F, Zhai M G, Tong Y, Peng P, Xu B L and Guo J H. 2006. Petrogenesis of the Sanfoshan high-Ba-Sr granite, Jiaodong peninsula, eastern China[J]. *Geological Review*, 52: 43– 53 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J F, Li Z T and Jin C Z. 2004. Adakites in northern China and their mineralized significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 361– 368 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J Q, Chen Z H, Wang D H, Chen Z Y, Liu S B and Wang C H. 2008. Geological characteristics and metallogenic epoch of the Xingluokeng tungsten deposit, Fujian province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 32: 92– 97 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L C, Wan B, Jiao X J and Zhang R. 2006. Characteristics and geological significance of adakitic rocks in copper-bearing porphyry in Baogutu, western Junggar[J]. *Geology in China*, 33: 626– 631 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L Y, Qu X M and Xin H B. 2008. Geochemical characteristics, zircon U-Pb LA-ICP-MS ages of medium-acid dykes in the Huashugou iron-copper deposit, Jingtieshan rofield, and their geological significances[J]. *Geological Review*, 54: 253– 262 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Jin W J, Li C D and Wang Y L. 2009b. Reason for gold and copper discovery in mountain with tungsten and tin discovery on plain[J]. *Earth Science*, 34: 547– 568 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Jin W J, Li C D and Wang Y L. 2010. Revisiting the new classification of granitic rocks based on whole-rock Sr and Yb contents: Index[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26: 985– 1015 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Qin K Z, Wang Y L, Zhang F Q, Liu H T and Wang Y. 2004a. Study on adakite broadened to challenge the Cu and Au exploration in China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 195– 204 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Qin K Z, Xu J F, Wang Y, Liu H T and Wang Y L. 2004b. On the distribution, prospecting principle and method for the adakite-related deposits in China[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (2): 1– 8 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Wang Y L, Zhang F Q, Wang Q and Wang Y. 2002. Adakite and porphyry copper deposit[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (3): 85– 90 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Wang Y, Li C D, Wang Y L, Jin W J and Jia X Q. 2006. Granite classification on the basis of Yb and Sr contents and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 2249– 2269 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Wang Y, Xiong X L and Li C D. 2008. Adakite and granite: Challenge and opportunity[M]. Beijing: China Land Press (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Yin X M, Yin Y, Jin W J, Wang Y L and Zhao Y Q. 2009a. Issues on metallogenesis and prospecting of gold and copper deposits related to adakite and Himalayan type granite in west Qinling[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25: 3103– 3122 (in Chinese with English abstract).
- Zhang T and Zhang Y Q. 2008. Late Mesozoic tectono-magmatic evolution history of the Jiaobei uplift, Shandong peninsula[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82: 1210– 1228 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X W, Xiang H, Zhong Z Q, Zhou H W, Zhang L, Yang N and Wang Q. 2009. U-Pb dating and trace elements composition of hydrothermal zircons from Jianfengling granite, Hainan: Restriction on the age of hydrothermal event and mineralization of Baolun gold deposit[J]. *Earth Science*, 34: 921– 930 (in Chinese with English abstract).
- Zhao D L and Hu N G. 1997. Geochemical characteristics and tectonic environment of the Laoyaquan stanniferous granite pluton in eastern Junggar[J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 19(4): 7– 12 (in Chinese with English abstract).

- Zhao X L. 2007. The geochronology petrography and geochemical characteristics of Mesozoic granitoids from Shanghang area in SW Fujian and their implications (Master's Degree) [D]. Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Zhu J C, Zhang P H, Xie C F, Zhang H and Yang C. 2006. The Huashan-Guposhan A-type granitoid belt in the western part of the Nanling Mountains: Petrology, geochemistry and genetic interpretations[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80: 529-542 (in Chinese with English abstract).
- Zhu L M, Zhang G W, Li B Guo B, Gong H J, Kang L and L S L. 2010. Zircon U-Pb dating and geochemical study of the Xianggou granite in the Ma'anqiao gold deposit and its relationship with gold mineralization[J]. *Science in China(Series D)*, 53: 220-240 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 柏道远, 贾宝华, 李金冬, 王先辉, 马铁球, 张晓阳, 陈必河. 2007. 区域构造体制对湘东南印支期与燕山早期花岗岩成矿能力的重要意义-以千里山岩体和王仙岭岩体为例[J]. *矿床地质*, 26: 487-500.
- 蔡明海, 梁婷, 吴德成, 黄惠民. 2004a. 广西大厂矿田花岗岩地球化学特征及其构造环境[J]. *地质科技情报*, 23: 57-62.
- 蔡明海, 梁婷, 吴德成, 黄惠民. 2004b. 桂西北丹池成矿带花岗岩地球化学特征及其构造环境[J]. *大地构造与成矿学*, 28: 306-313.
- 曹殿华, 王安建, 李文昌, 王高尚, 李瑞萍, 李以科. 2009. 普朗斑岩铜矿岩浆混合作用: 岩石学及元素地球化学证据[J]. *地质学报*, 83: 166-175.
- 陈斌. 2002. 内蒙古苏尼特左旗白音宝力道岩体特征与成因: 是岛弧岩浆岩而不是埃达克岩[J]. *地质评论*, 48: 261-266.
- 陈富文, 付建明. 2005. 南岭地区中生代主要成锡花岗岩地质地球化学特征与锡矿成矿规律[J]. *华南地质与矿产*, (2): 12-21.
- 陈文伦, 廖忠直. 1999. 广西海洋山花岗岩基特征及其含矿性[J]. *广西地质*, 12(3): 7-12.
- 陈衍景, Franco Pirajno, 赖勇, 李超. 2004. 胶东矿集区大规模成矿时间和构造环境[J]. *岩石学报*, 20(4): 907-922.
- 陈衍景, 李诺. 2009. 大陆内部浆控高温热液矿床成矿流体性质及其与岛弧区同类矿床的差异[J]. *岩石学报*, 25: 2477-2508.
- 程彦博, 毛景文, 谢桂青, 陈懋弘, 赵财胜, 杨宗喜, 赵海杰, 李向前. 2008. 云南个旧老厂-卡房花岗岩体成因: 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学约束[J]. *地质学报*, 82: 1476-1493.
- 戴传固, 杨大欢. 2000. 贵州南加花岗岩类特征及其与成矿的关系[J]. *贵州地质*, 17(3): 160-165, 175.
- 戴霜, 任育智, 程, 高兆奎, 张翔, 王方成. 2002. 公婆泉铜矿岛弧型含矿斑岩地质地球化学特征[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 38(5): 100-107.
- 邓希光, 李献华, 刘义茂, 黄革非, 侯茂松. 2005. 骑田岭花岗岩体的地球化学特征及其对成矿的制约[J]. *岩石矿物学杂志*, 24: 93-102.
- 丰成友, 许建祥, 曾载淋, 张德全, 屈文俊, 余宏全, 李进文, 李大新, 杜安道, 董英君. 2007. 赣南天门山-红桃岭钨锡矿田成矿时代精细测定及其地质意义[J]. *地质学报*, 81: 952-963.
- 冯京, 张招崇. 2009. 阿尔泰山南缘中-酸性斑岩的地球化学特征及其岩石成因探讨[J]. *地质论评*, 55: 58-72.
- 付建明, 谢才富, 彭松柏, 杨晓君, 梅玉萍. 2006. 湖南骑田岭花岗岩及其暗色微粒包体的地球化学与壳幔岩浆的混合作用[J]. *地球学报*, 27: 557-569.
- 高阳, 张招崇, 杨铁铮. 2009. 黑龙江宝山一带海西晚期强过铝花岗岩地质地球化学及岩石成因[J]. *岩石矿物学杂志*, 28: 433-449.
- 葛良胜, 邓军, 张文钊, 雷时斌, 卿敏, 郭晓东, 张艳春. 2009. 中国金矿床(II): 金矿地质勘查新突破[J]. *地质找矿论丛*, 24(1): 1-10.
- 顾晟彦, 华仁民, 戚华文. 2006. 广西花山-姑婆山燕山期花岗岩的地球化学特征及成因研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 25: 97-108.
- 胡芳芳, 范宏瑞, 杨进辉, 王非, 翟明国. 2006. 胶东乳山金矿蚀变岩中缙云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄及其对金成矿事件的制约[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 25: 109-114.
- 华仁民, 张文兰, 陈培荣, 王汝成. 2003. 赣南大吉山与漂塘花岗岩及有关成矿作用特征对比[J]. *高校地质学报*, 9: 609-619.
- 黄顺生, 徐兆文, 顾连兴, 华明, 陆现彩, 陆建军, 聂桂平, 朱士鹏. 2004. 安徽铜陵狮子山矿田岩浆岩地球化学特征及成因机制探讨[J]. *高校地质学报*, 10: 217-226.
- 黄增保, 魏志军, 金霞. 2005. 甘肃北山 460 金矿埃达克质石英闪长岩地球化学特征及意义[J]. *甘肃地质学报*, 14(2): 30-34.
- 金治鹏, 李永军, 黄万堂, 李注苍, 付国民. 2004. 甘肃天水坪道花岗岩体的地质特征及矿化信息[J]. *甘肃地质学报*, 13(2): 24-30.
- 冷成彪, 张兴春, 陈衍景, 王守旭, 苟体忠, 陈伟. 2007a. 中国斑岩铜矿与埃达克(质)岩关系探讨[J]. *地学前缘*, 14(5): 199-210.
- 冷成彪, 张兴春, 王守旭, 秦朝建, 苟体忠. 2007b. 云南中甸地区两个斑岩铜矿容矿斑岩的地球化学特征-以雪鸡坪和普朗斑岩铜矿床为例[J]. *矿物学报*, 27: 414-422.
- 李冰, 赵志丹, 王亮亮, 董国臣, 董昕. 2007. 西藏冈底斯成矿带驱龙斑岩铜钼矿的岩石地球化学特征[J]. *物探化探计算技术*, 29(增刊): 195-201.
- 李承东, 张旗, 苗来成, 孟宪锋. 2004. 冀北中生代高 Sr 低 Y 和低 Sr 低 Y 型花岗岩: 地球化学、成因及其与成矿作用的关系[J]. *岩石学报*, 20: 269-284.
- 李进文, 裴荣富, 张德全, 梅燕雄, 臧文拴, 孟贵祥, 曾善胜, 李铁军, 狄永军. 2007. 铜陵矿集区燕山期中酸性侵入岩地球化学特征及其地质意义[J]. *地球学报*, 28: 11-22.
- 李立主, 杨仕长, 康本和. 1995. 盐源县西范坪-模范村喜马拉雅斑岩群地质特征及找矿前景探讨[J]. *四川地质学报*, 15: 283-293.
- 李永军, 杨高学, 吴宏恩, 司国辉, 金朝, 张永智. 2009. 东准噶尔贝勒库都克铝质 A 型花岗岩的厘定及意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 28: 17-25.
- 梁国宝. 2008. 桂北地区摩天岭复式花岗岩体地球化学特征及其与成矿的关系[J]. *桂林工学院学报*, 28(1): 8-14.

- 凌洪飞, 胡受奚, 孙景贵, 倪培, 沈昆. 2002. 胶东金青顶和大尹格庄金矿床花岗岩围岩的蚀变地球化学研究[J]. 矿床地质, 21: 187-199.
- 刘国仁. 2009. 就找矿的理论及新疆阿尔泰的找矿实践[J]. 新疆有色金属, 1(增刊): 84-87.
- 刘明强. 2007. 甘肃北山造山带红山地区埃达克质花岗岩类的发现及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 26: 232-238.
- 刘文斌, 刘振宏, 张世佼. 2003. 河南商城岩体地质地球化学特征及成因意义[J]. 华南地质与矿产, (4): 17-23.
- 刘玉琳, 丁式江, 张小文, 等. 2002. 海南乐东抱伦金矿床成矿时代研究[J]. 地质论评, 48(增刊): 84-87.
- 刘志武, 王崇礼. 2007. 南祁连党河南山花岗岩类地球化学及其金铜矿化[J]. 地质与勘探, 43: 64-73.
- 罗铭玖, 黎世美, 卢欣祥, 郑德琼, 苏振邦. 2000. 河南省主要矿产的成矿作用及矿床系列[M]. 北京: 地质出版社. 1-355.
- 罗照华, 卢欣祥, 陈必河, 等. 2009. 透岩浆流体成矿作用导论[M]. 北京: 地质出版社. 1-177.
- 马铁球, 王先辉, 柏道远. 2004. 锡田 W, Sn 花岗岩体的地球化学特征及其形成构造背景[J]. 华南地质与矿产, (1): 11-16.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 21: 169-188.
- 苗来成, 范蔚茗, 翟明国, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I. 2003. 金厂沟梁-二道沟金矿田内花岗岩类侵入体锆石的离子探针 U-Pb 年代学及意义[J]. 岩石学报, 19: 71-80.
- 邱庆伦, 龚全胜, 卢书伟, 柳生祥. 2008. 甘肃黄河地区印支期埃达克岩的厘定及其意义[J]. 甘肃地质, 17(3): 6-12.
- 曲晓明, 辛洪波. 2006a. 藏西班公湖斑岩铜矿带的形成时代与成矿构造环境[J]. 地质通报, 25: 792-799.
- 曲晓明, 辛洪波, 徐文艺, 杨竹森, 李振清. 2006b. 藏西措勤含铜双峰岩系的发现及其意义[J]. 岩石学报, 22: 707-716.
- 芮宗瑶, 张洪涛, 陈仁义, 王志良, 王龙生, 王义天. 2006. 斑岩铜矿研究中若干问题探讨[J]. 矿床地质, 25: 491-500.
- 余宏全, 张德全, 景向阳, 关军, 朱华平, 丰成友, 李大新. 2007. 青海省乌兰乌珠尔斑岩铜矿床地质特征与成因[J]. 中国地质, 34: 306-314.
- 石玉若, 刘敦一, 张旗, 简平, 张福勤, 苗来成, 施光海, 张履桥, 陶华. 2005. 内蒙古苏左旗白音宝力道 Adakitic 质岩类成因探讨及其 SHRIMP 年代学研究[J]. 岩石学报, 21: 143-150.
- 唐功建, 王强, 赵振华, Wyman DA, 陈海红, 贾小辉, 姜子琦. 2009. 西准噶尔包古图成矿斑岩年代学与地球化学: 岩石成因与构造、铜金成矿意义[J]. 地球科学, 34(1): 56-74.
- 唐红峰, 屈文俊, 苏玉平, 侯广顺, 杜安道, 丛峰. 2007. 新疆萨惹什克锡矿与萨北 A 型花岗岩成因关系的年代学制约[J]. 岩石学报, 23: 1989-1997.
- 汪雄武, 王晓地, 刘家齐, 常海亮. 2004. 湖南骑田岭花岗岩与锡成矿的关系[J]. 地质科技情报, 23: 1-12.
- 王金荣, 郭原生, 付善明, 陈建林, 秦秀峰, 张洪培, 杨永均. 2005. 甘肃黑石山早古生代埃达克质岩的发现及其构造动力学意义[J]. 岩石学报, 21: 977-985.
- 王金荣, 吴春俊, 蔡郑红, 郭原生, 吴继承, 刘晓煌. 2006. 北祁连山东段银洞梁早古生代高镁埃达克岩: 地球动力学及成矿意义[J]. 岩石学报, 22: 2655-2664.
- 王娟, 金强, 赖绍聪, 秦江峰, 李鑫. 2008. 南秦岭佛坪地区五龙花岗岩体的地球化学特征及成因研究[J]. 矿物岩石, 28: 79-87.
- 王强, 许继锋, 赵振华, 王人镜, 熊小林. 2002. 河北矾山燕山期侵入岩地球化学特征及成因[J]. 矿物学报, 22: 160-168.
- 王强, 赵振华, 许继峰, 白正华, 王建新, 刘成新. 2004. 鄂东南铜山口、殷祖埃达克质(adakitic)侵入岩的地球化学特征对比: (拆沉)下地壳熔融与斑岩铜矿的成因[J]. 岩石学报, 20: 351-360.
- 王义天, 毛景文, 卢欣祥, 叶安旺. 2002. 河南小秦岭金矿区 Q875 脉中深部矿化蚀变岩的 $40\text{Ar}-39\text{Ar}$ 年龄及其意义[J]. 科学通报, 47: 1427-1431.
- 王永磊, 裴荣富, 李进文, 武俊德, 李莉, 王浩琳. 2007. 个旧老厂矿田花岗岩地球化学特征及其形成构造背景[J]. 地质学报, 81: 979-985.
- 王云健, 刘经华, 徐兆文, 方长泉, 蒋少涌, 杨小男, 张军, 李海勇. 2007. 安徽铜陵大团山石英闪长岩岩石化学特征及成因探讨[J]. 地质找矿论丛, 22(4): 264-269, 286.
- 王治华, 郭晓东, 葛良胜, 王科强, 邹依林, 张勇, 喻万强. 2009. 云南祥云马厂富碱斑岩体的地球化学特征[J]. 地质与勘探, 45: 343-351.
- 王治华, 吴兴泉, 王科强, 喻万强, 黄辉, 马德锡, 张国利. 2006. 西藏申扎西南部甲岗雪山钨(铋)矿区嘎若二长花岗岩体的地球化学特征[J]. 地质通报, 25: 1487-1491.
- 吴春俊, 王经荣, 郭俊华, 喻光明, 吴继承. 2009. 甘肃文县阳山金矿带花岗岩岩石地球化学特征及其成矿意义[J]. 矿产与地质, 23: 345-351.
- 吴宏恩, 杨高学, 李永军, 司国辉, 金朝. 2008. 东准噶尔锡矿北花岗岩斑岩地球化学特征[J]. 新疆地质, 26: 325-329.
- 伍光英, 潘仲芳, 李金冬, 肖庆辉, 车勤建. 2005. 湘南大义山花岗岩地质地球化学特征及其与成矿的关系[J]. 中国地质, 32: 434-442.
- 谢才富, 朱金初, 丁式江, 张业明, 陈沐龙, 付杨荣, 付太安, 李志宏. 2006. 海南尖峰岭花岗岩体的形成时代、成因及其与抱伦金矿的关系[J]. 岩石学报, 22: 2493-2508.
- 熊小林, 赵振华, 白正华, 梅厚许, 许继峰, 王强. 2001. 西天山阿吾拉勒埃达克质岩石成因: Nd 和 Sr 同位素组成的限制[J]. 岩石学报, 17: 514-522.
- 徐启东, 钟增球, 周汉文, 杨发城, 唐学超. 1998. 豫西西秦岭金矿区的一组 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代数据[J]. 地质论评, 44: 323-327.
- 徐受民, 莫宣学, 曾普胜, 张文洪, 赵海滨, 赵寒冬. 2006. 滇西北衙富碱斑岩的特征及成因[J]. 现代地质, 20: 527-535.
- 杨进辉, 朱美妃, 刘伟, 翟明国. 2003. 胶东地区郭家岭花岗岩的地球化学特征及成因[J]. 岩石学报, 19: 692-700.
- 姚军明, 华仁民, 林锦富. 2005. 湘东南黄沙坪花岗岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年及岩石地球化学特征[J]. 岩石学报, 21: 688-696.
- 游小毛. 1999. 甘肃公婆泉铜矿区斑岩岩浆起源及成岩成矿大地构造背景[J]. 大地构造与成矿学, 23: 167-171.
- 余阳春, 伍志崇, 梁铁刚. 2006. 锡田地区成矿地质特征及找矿方向

- [J]. 资源调查与环境, 27: 136-142.
- 曾普胜, 李文昌, 王海平, 李红. 2006. 云南普朗印支期超大型斑岩铜矿床: 岩石学及年代学特征[J]. 岩石学报, 22: 989-1000.
- 张华锋, 翟明国, 董英, 彭澎, 许保良, 郭敬辉. 2006. 胶东半岛三佛山高 Ba-Sr 花岗岩成因[J]. 地质论评, 52: 43-53.
- 张家菁, 陈郑辉, 王登红, 陈振宇, 刘善宝, 王成辉. 2008. 福建行洛坑大型钨矿的地质特征、成矿时代及其找矿意义[J]. 大地构造与成矿学, 32: 92-97.
- 张炯飞, 李之彤, 金成洙. 2004. 中国东北部地区埃达克岩及其成矿意义[J]. 岩石学报, 20: 361-368.
- 张兰英, 曲晓明, 辛洪波. 2008. 镜铁山桦树沟铁铜矿区中酸性岩脉地球化学特征、锆石 U-Pb LA-ICP-MS 年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 54: 253-262.
- 张连昌, 万博, 焦学军, 张锐. 2006. 西准包古图含铜斑岩的埃达克岩特征及其地质意义[J]. 中国地质, 33: 626-631.
- 张旗, 王元龙, 张福勤, 王强, 王焰. 2002. 埃达克岩与斑岩铜矿[J]. 华南地质与矿产, (3): 85-90.
- 张旗, 秦克章, 王元龙, 张福勤, 刘红涛, 王焰. 2004a. 加强埃达克岩研究, 开创中国 Cu、Au 等找矿工作的新局面[J]. 岩石学报, 20: 195-204.
- 张旗, 秦克章, 许继峰, 王焰, 刘红涛, 王元龙. 2004b. 中国与埃达克岩有关的矿床分布、找矿方向和找矿方法刍议[J]. 华南地质与矿产, (2): 1-8.
- 张旗, 王焰, 李承东, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. 岩石学报, 22: 2249-2269.
- 张旗, 王焰, 熊小林, 李承东. 2008. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇[M]. 北京: 中国大地出版社.
- 张旗, 殷先明, 殷勇, 金惟俊, 王元龙, 赵彦庆. 2009a. 西秦岭与埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩有关的金铜成矿及找矿问题[J]. 岩石学报, 25: 3103-3122.
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 王元龙. 2009b. “上山”找金铜, “下山”找钨锡及其理由[J]. 地球科学, 34: 547-568.
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 王元龙. 2010. 再论花岗岩按照 Sr-Yb 的分类: 标志[J]. 岩石学报, 26: 985-1015.
- 张田, 张岳桥. 2008. 胶北隆起晚中生代构造-岩浆演化历史[J]. 地质学报, 82: 1210-1228.
- 张小文, 向华, 钟增球, 周汉文, 张利, 杨念, 王婧. 2009. 海南尖峰岭岩体热液锆石 U-Pb 定年及微量元素研究: 对热液作用及抱伦金矿成矿时代的限定[J]. 地球科学, 34: 921-930.
- 章平, 田邦生. 2005. 赣东北灵山复式岩体特征及其成矿作用初探[J]. 世界核地质科学, 22(1): 31-38.
- 赵东林, 胡能高. 1997. 新疆东准老泉含锡花岗岩体地球化学特征及其构造环境[J]. 西安地质学院学报, 19(4): 7-12.
- 赵希林. 2007. 福建省上杭地区中生代花岗岩体的年代学、岩石学、地球化学特征及其地质意义(硕士论文)[D]. 中国地质科学院.
- 朱金初, 张佩华, 谢才富, 张辉, 杨策. 2006. 南岭西段花山-姑婆山 A 型花岗质杂岩带: 岩石学、地球化学和岩石成因[J]. 地质学报, 80: 529-542.
- 朱赖民, 张国伟, 李^牛年, 郭波, 弓虎军, 康磊, 吕拾零. 2009. 马鞍桥金矿床中香沟岩体锆石 U-Pb 定年、地球化学及其与成矿关系研究[J]. 中国科学(D 辑), 39: 700-720.