



【编者按】:本刊 2010 年第 5 期发表了张旗研究员的“花岗岩与金铜及钨锡成矿的关系”一文,引起了学术界的广泛关注,不少读者对该论文中的一些观点表示不同意见,并希望进行讨论。我们认为,学术思想和学术观点的交流和争鸣是科学发展中的必然现象,在刊物上发表争鸣论文进行学术讨论和交锋,对于活跃学术气氛、促进科学发展具有积极意义。于是,本刊 2011 年第 1 期发表了华仁民教授和王登红研究员的质疑文章,2011 年第 3 期发表了张旗研究员的应答文章,本期又发表了华仁民教授和王登红研究员共同撰写的文章。这些论文就花岗岩与成矿作用的许多重要问题进行了阐述和讨论,相信广大读者一定能够从中受益。在此,本刊编辑部对三位作者的辛勤撰稿表示真诚的感谢,对他们不倦的科学探求精神表示由衷的钦佩。最近,我编辑部收到了加拿大籍华裔科学家卢焕章教授的来信,对于本刊展开的学术争鸣给予肯定,信中说“我读最近几期的《矿床地质》很有感触,……,我自己体会会有以下几点……(4)开展了讨论,尤其是对张旗先生一文的讨论,很不容易,因为过去这种讨论很少。”最后,我们向广大读者、作者对我刊的关注表示感谢!

文章编号:0258-7106(2012)01-0165-11

关于花岗岩与成矿作用若干基本概念的再认识*

华仁民¹,王登红²

(1 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室,南京大学地球科学与工程学院,江苏 南京 210093;

2 中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037)

摘 要 借着对张旗先生两篇文章提出进一步质疑的机会,文章阐述了与花岗岩有关成矿作用的若干基本概念、基础知识以及国内外矿床学界对某些相关问题的研究成果。认为花岗岩浆从形成起到最后固结成岩,必然经历了一定的演化过程,花岗岩浆的分异演化,可以形成富含水和其他挥发组分的残余岩浆,出现晶体、熔体、流体三相共存的“岩浆-热液过渡阶段”,并最终分泌出热液(岩浆水)。中国华南尤其是南岭地区钨锡铋钼铌钽等稀有金属的大规模成矿作用正是与该地区大规模花岗岩浆活动及其演化密切相关的。文章强调了花岗岩类与钨锡等成矿作用之间存在着密切的成因关系,并重申了“成矿母岩”、“含矿岩体”等术语在矿床学研究及指导找矿勘查等方面的积极意义。指出“金铜和钨锡可以伴生”是大量矿床所反映的、因此也是必须尊重的基本地质事实,而不是依据了什么理论。文章最后认为,关于成矿作用问题的任何讨论和争鸣都必须建立在尊重地质事实、尊重矿床学基本概念和尊重矿床学领域前人研究成果的基础之上。

关键词 地质学,花岗岩,岩浆演化,成矿作用,岩浆-热液过渡阶段,含矿岩体

中图分类号:P588;9611

文献标志码:A

Clarification of some basic concepts concerning the granite-related mineralization

HUA RenMin¹ and WANG DengHong²

(1 State Key Laboratory of Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 2 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

* 第一作者简介 华仁民,男,1946 年生,矿物学岩石学矿床学专业。Email: huarenmin@nju.edu.cn

收稿日期 2011-11-20;改回日期 2011-12-20。张绮玲编辑。

Abstract

Taking the opportunity of further query against two published papers by Mr Zhang Qi, the authors clarified some basic concepts, knowledge, and major research achievements in the field of granite-related mineralization. The present paper holds that the granite magma must undergo certain evolution from its formation to its final consolidation. The differentiation and evolution of granite magma would result in a residual magma which is rich in water and other volatile components and comprises coexistent crystals, melts and fluids at the stage called "magmatic-hydrothermal transition", and finally yield hydrothermal solution (magmatic water). The world-class large-scale metallogenic processes of W, Sn, Bi, Mo, Li, Be, Nb, Ta and other rare metals in South China are products of very broad and strong granitic magmatism and high evolution in that region. The authors emphasized the close genetic relation between granitoids and rare metal mineralization, and restate the positive effect of the terms such as "mother rock", "ore-bearing rock" used in the ore deposit study as well as in ore prospecting. The present paper also pointed out that the coexistence of Au-Cu with W-Sn is not from any theory, but from the natural phenomena proved by many ore deposits, and hence a basic fact which we have to recognize and acknowledge. Finally, the authors suggest that the discussion and contention on any problem about mineralization must respect the geological facts, the basic concept of mineral deposits, and the previous research achievements in the field of mineral deposits.

Key words: geology, granite, magma evolution, mineralization, magmatic-hydrothermal transition, ore-bearing rock

《矿床地质》2011 年第 3 期刊登了张旗先生的“再论花岗岩的分类及其与金铜钨锡成矿的关系”论文,就笔者分别对张旗等文章(张旗等,2010)的质疑进行了回答,并且进一步强调了他在前一篇文章中提出的一些观点。看来,双方在与花岗岩有关的成矿作用的许多基本问题上已经无法达成一致的认识了。达不成一致认识当然也没有什么关系,尤其是关于花岗岩的分类方案,愿意采用张旗先生分类的尽管自便。不过,笔者既然是矿床学专业的科研工作者,那么,尽管不是为了和张旗先生继续辩论,也仍然觉得有必要把一些与花岗岩成矿作用相关的基本概念、甚至基础知识说说清楚、弄弄明白,以免混淆视听,误人子弟。这是笔者的责任所在。所以,借着对张旗先生两篇文章提出进一步质疑的机会,笔者重新学习了与花岗岩有关的成矿作用的若干基本概念,写成此文,就教于矿床学界各位同仁,尤其希望能对矿床学专业的年轻学子开展相关领域研究工作有所裨益。

对于张旗先生的两篇文章,本文分别用“张文之一”(张旗等,2010)和“张文之二”(张旗,2011)作为简称,对于在两篇文章中都有的观点和说法,笼统以“张文”简称之。对于笔者分别对张旗等文章(张旗等,2010)质疑的两篇文章,则分别以“华文”(华仁

民,2011)和“王文”(王登红,2011)简称之。

1 关于花岗岩的演化和岩浆-热液体系问题

1.1 花岗岩的演化和水的来源

1.1.1 花岗岩岩浆的演化过程

张文之二认为:“花岗岩研究有一个误区,长期以来,大家都以为花岗岩是能够演化的”,并断定:“花岗岩能够演化的观点对矿床学研究有明显的影响,困扰了矿床学的研究,才出现华文的问题”。张文又说:“岩浆不可能演化,即便按照传统的说法,岩浆可以演化,早期岩浆演化到晚期,酸性组分增加,将导致黏性的增加,怎么会有水出现?水来自哪里?”

看来,张文之二批评的“花岗岩(岩浆)演化”的观点不仅是华文作者一个人的问题,而且是一个“长期以来”困扰了矿床学研究的问题,是一个“大家都以为”正确但实际上是“误区”的问题。这当然是一个比较严重的问题了,笔者不得不认真对待,好好反省一下。这个问题又包含了两个基本问题,一个是花岗岩岩浆能不能演化,一个是花岗岩的含水量和水(热液)的来源。

第一个问题其实根本不是问题。岩浆当然是能演化的。什么是“演化”?《现代汉语词典》(2002年增补本)上对“演化”一词的解释很简单,就是“演变(多指自然界的变化)”;所以可以说,演化的实质就是变化。因此,岩浆不仅是可演化的,而且必定会发生演化。从岩浆形成起,到最后固结成为岩浆岩,它必然经历了一定的演化过程,玄武岩浆能够演化,花岗岩浆也能够演化,这是不以张文承认不承认转移的事实,也是国内外地质学者“长期以来”的基本的工作成果。

在中国地学界,但凡关系到花岗岩类以及相关的成矿作用,无论是学术会议的报告,还是刊物上发表的论文、正式出版的著作,“花岗岩(岩浆)演化”的概念广泛运用、随处可见,的确早已达到了“大家都以为”的程度。这里且列举几个笔者认为比较权威的学者的论著吧。孙鼎等(1983)在研究浙江桐庐花岗质火山侵入杂岩的地球化学特征后指出:“岩浆房中的岩浆在喷发前已分异演化得相当完全,亦说明分离结晶以及晶出晶体的重力分异在岩浆的演化中起了重要作用”。翟裕生等(1985)在讨论南岭若干与钨锡有关的含矿复式花岗岩体时指出它们是“在地壳一定深度,遭受深变质作用,经过熔融、分异,原地演化或向浅部侵位,在地壳较浅部形成的黑云母花岗岩系列”。陈毓川等(1995)在研究桂北地区与岩浆岩有关的成矿系列时指出:“对于成矿而言,岩浆本身含有成矿元素是成矿的一个基本条件,但是否能够成矿还取决于岩浆的演化过程 and 方向”;类似地,毛景文等(1998)在研究湘南柿竹园钨锡钼铋矿床与岩浆岩关系时指出,该地区花岗岩“岩体都具备成矿的先决条件,是否能够成矿,则在于岩体分异演化程度和成矿元素聚集的条件和环境”;他们的结论是:有关的“似斑状黑云母花岗岩、等粒黑云母花岗岩和花岗斑岩均经历了强烈的分异演化作用,形成了与之有关的多金属成矿系统”。涂光炽等(2000)出版的《中国超大型矿床(I)》一书中,赵振华等撰写的第17章第6节标题就是“燕山期高演化花岗岩对形成区内大-超大型矿床的控制作用”;按张文的说法,花岗岩不能演化,那么更不可能有“高演化”花岗岩。在前几年相当流行的《花岗岩研究思维与方法》一书中,洪大卫等撰写的第四章“花岗岩研究的同位素地球化学方法”的第二节标题就是“岩浆演化的同位素体系”(肖庆辉等,2002);这里的“岩浆演化”,应该主要是指花岗质岩浆。陈骏等(2008)将南

岭地区含钨锡铋钼花岗岩划分为3个主要类型:含钨花岗岩、含锡钨花岗岩和含铋钨花岗岩;并指出3类含矿花岗岩具有明显不同的演化特征,成矿作用与它们的演化密切相关。卢欣祥等(2010)对东秦岭的花岗伟晶岩进行了研究,认为花岗伟晶岩的演化关系同本区花岗岩的成分演化相一致。

中国地质工作者对于花岗岩演化的深刻认识,主要始于半个多世纪前对华南花岗岩及其成矿作用的大规模研究(徐克勤等,1963;1984b;贵阳地球化学研究所,1979;莫柱孙等,1980;南京大学地质学系,1981;陈毓川等,1989;地矿部南岭项目花岗岩专题组,1989)。在华南尤其是南岭地区,与钨锡铋钼铌钽等稀有金属成矿作用密切相关的花岗岩中有不少是多期多阶段的复式岩体,大者如4000多 km^2 的诸广山岩体,小者如19 km^2 的西华山岩体。这些复式岩体的各个阶段之间虽然关系比较复杂,但是绝大多数地质工作者都认为是一种“演化”关系。例如,徐克勤等(1984a)指出“改造型花岗岩通常都是多旋回、多阶段复式岩体,……多旋回花岗岩具有一定的演化趋势”。对于一个具体的花岗岩体,也存在着从早到晚的演化,例如华南与钨锡等稀有金属有关的花岗岩类的最常见、最典型的演化趋势是从早期的含角闪石黑云母花岗岩、到黑云母花岗岩、再到二云母花岗岩、白云母花岗岩。李献华等的研究则认为,南岭燕山早期的含角闪石花岗闪长岩→黑云母二长花岗岩→黑云母钾长花岗岩→二(白)云母花岗岩,属于准铝质(弱过铝质)的I型/分异I型“花岗岩演化系列”(Li et al., 2007)。吴永乐等(1987)对中国最早开采、最具代表性的赣南西华山钨矿进行了全面研究,他们编写的专著《西华山钨矿地质》详尽地描述了西华山花岗岩体2期、4阶段、6次侵入的特征及它们之间的演化关系。

花岗岩的“岩浆演化”并非国人所独创,在国际学术界也是被广泛认可的,笔者可以列举出许多文献(Ward et al., 1992; Blevin et al., 1995; Antipin et al., 1997; Charoy, 1999; Clandia et al., 2009; Mueller et al., 2010; Balen et al., 2011; Hezel et al., 2011),因此,花岗岩的岩浆演化决非张文所说的“存在误区”。

张文尽管不承认“岩浆演化”,但对于“岩浆分异”似乎是认可的,张文之二中说:“岩浆虽然不能演化,但可以发生流动分异,这种分异通常发生在岩浆上升侵位过程中,是岩浆在运移过程中的内部调整

.....”。笔者姑且把这里所谓的“流动分异”看作是“岩浆分异”的内容之一。那么,什么是“岩浆分异”呢?据2006年出版的《地球科学大辞典(基础科学卷)》的解释,岩浆分异就是“岩浆在演化过程中,在没有外来物质加入下,受条件变化控制,使原始成分均匀的单一岩浆分化为不同组分的多种岩浆的现象”(《地球科学大辞典编委会,2006》;粗体是笔者加的)。看来,张文之二关于“岩浆分异”是岩浆在运移过程中的内部调整”的说法是正确的,但是却忘记了“岩浆分异”就是“岩浆在演化过程中”发生的现象之一,既然有岩浆分异,那必须有岩浆演化,承认岩浆分异,实际上等于承认岩浆演化。

张文之二中使用了一个“结晶分离”的术语,说“花岗岩的黏性大,阻止了花岗岩的结晶分离”,又说“玄武质岩浆可以发生结晶分离和混合,而花岗质岩浆很难分离”。笔者不清楚这里的“结晶分离”是何含义,因为一般文献或字典或教科书中都使用“分离结晶”(fractional crystallization)或“结晶分异”(crystallization differentiation),却很难找到“结晶分离”这个术语。不过,笔者姑且把张文所说的“结晶分离”当做“分离结晶”或“结晶分异”来对待吧。——而如前所述,分离结晶、结晶分异这些岩浆分异作用同样发生在花岗岩浆中,其实质也就是“岩浆演化”的体现。

1.1.2 花岗岩中水的来源

再来看第二个问题,即关于花岗岩的含水量及水的来源。张文问道:“早期岩浆演化到晚期,酸性组分增加,将导致黏性的增加,怎么会有水出现?水来自哪里?”比起前一个问题,这个问题似乎问得更加有些莫名其妙,因为酸性(长英质)岩浆的含水量高于基性(镁铁质)岩浆应该是一个常识,而且众所周知,花岗岩是离不开水的。Campbell和Taylor早就认为水在花岗岩形成中是“不可或缺的(essential)”,他们有一个著名的观点就是:“没有水就没有花岗岩”(no water, no granites)(Campbell et al., 1983)。Whitney(1988)则认为温度和水含量是花岗岩浆形成的两个最重要因素。至于(花岗岩)岩浆的去气(degassing)以及分离出岩浆水,更是从100年前的尼格里时代就被认识了(Niggli, 1912)。因此,花岗岩含水有什么奇怪吗?奇怪的倒是张文怎么会问出这种问题,莫非张文作者认为所有的花岗岩都是玄武岩浆演化而来的?难怪张文反复说岩浆演化适合于“玄武质岩浆(可以延伸到闪长质岩浆),但不适合于花岗质岩浆”。

有关花岗岩中水的来源及含量等方面的国内外文献很多。通俗地说,当地壳物质发生熔融形成花岗质岩浆的时候,必须是有水参与的。水可以通过与硅酸盐熔体中的桥氧作用形成羟基(OH)、 H^+ 置换熔体中的离子(如 Na^+ 、 K^+)等方式溶解在硅酸盐岩浆中,溶解的多少主要取决于压力,压力愈大,溶解的水愈多;一般认为,水在花岗质(或长英质)岩浆中质量分数为2.5%~6.5%,实验研究显示,当压力达到500 MPa时,水在岩浆中的溶解度就超过10%,而当压力为1 000 MPa时,水在花岗质岩浆中的溶解度可以达到20%(Kennedy, 1961; Luth, 1967; Burnham et al., 1971; Huang et al., 1973; Burnham, 1979; 1994)。当岩浆从深部岩浆房向上运移,由于压力下降,溶解度降低,原先溶解在岩浆中的水会出溶(exsolution);此外,岩浆结晶分异过程中由于无水矿物先结晶而导致残余熔体相对富水,也可能使水达到饱和而出溶——这就是对“怎么会有水出现?水来自哪里?”的最简单回答。这种水,矿床学界的人一般叫做“岩浆水”,它也是一种很重要的成矿热液(或成矿流体)来源(White, 1974; 卢焕章, 1997)。

通常所说的“花岗岩中的水”实际上是指以水为主体、包含了其他挥发组分(如 CO_2 、F、Cl、B、S等)的流体。以水为主的挥发组分的存在可以降低岩浆的黏度(《地球科学大辞典编委会,2006》;徐夕生等, 2010),并促进岩浆的分异。因此,实际情况完全不是如张文所说的“岩浆演化到晚期,酸性组分增加,将导致黏性的增加”,相反,岩浆演化到晚期,酸性组分增加,以水为主体的挥发组分只会不断聚集增多,而且不会导致黏性的增加。

岩浆分异(主要是结晶分异)的结果之一,是形成所谓“残余岩浆”。对此,许多火成岩岩石学的教科书以及《地球科学大辞典(基础科学卷)》上都有解释,笔者没有必要在此一一抄录。这些晚阶段的“残余岩浆”,由于它们具有黏度小、比重轻、活动性强等特征,都可以贯入到稍早阶段已经固结了的或正在固结的岩相带中去,这种现象在华南花岗岩中非常普遍。朱金初等(2002)认为,华南香花岭、雅山、大吉山以及法国Beauvoir、捷克Podlesi等地一些最晚阶段侵入的Li-F花岗质小岩脉,就是高度演化的残余岩浆产物。这些富含水和其他挥发组分的花岗岩类、碱性岩等残余岩浆也可以形成各种伟晶岩(Jahns et al., 1969)。张文之二说“野外和岩相学研究找不

到花岗岩曾经发生过结晶分离的证据”,如果张文的所谓“结晶分离”就是指的“分离结晶”或“结晶分异”的话,那么,富含挥发组分的花岗质伟晶岩就是花岗岩发生过结晶分异、从硅酸盐熔体中“出溶”富水流体的最好证据。

1.2 关于岩浆-热液体系

张文之二说:“华文有一个‘岩浆-热液系统(或岩浆-热液体系)’的提法笔者认为值得商榷”,理由是“岩浆-热液”不是一个“系统”,而是两个独立的体系,二者有“根本性差异”。花岗岩为高黏性的岩浆;(含矿的)热液为黏性很低的流体,其性质近似于水。因此,岩浆和热液是性质完全不同的两个体系。

笔者首先要声明,“岩浆-热液体系”并非华文的提法,而是许多前辈包括国外学者早就提出的,也是从事热液矿床地质地球化学研究的人所熟知的基本概念之一。

上面已经说到,除了 H_2O 之外,被称为岩浆水或岩浆热液的以水为主的流体中还有相当数量的其他挥发组分,其中的 F、B、P、Li 等被称为“解聚元素”(de-polymerizing elements),又被称为“助熔剂”(fluxing agents),因为它们可以有效地降低硅酸盐熔体的黏度,又能够使花岗质岩浆的凝固速度和固相线温度大大降低,拉长了熔体的结晶时间,加快了物质组分的扩散速率和机械运动能力,有利于分离结晶作用的充分进行(Manning, 1981; Pichavant et al., 1984; Dingwell et al., 1985; 朱金初等, 2002; Thomas et al., 2005; Rickers et al., 2006; Breiter et al., 2007; Parat et al., 2009)。众所周知的是,华南以及世界各地与钨锡等稀有金属有关的花岗岩是普遍富含 F、B、P、Li 等挥发组分的(熊小林等, 1996; 毛景文等, 1998; 王联魁等, 2000; 李福春等, 2000; 2004; 朱金初等, 2002; 张德会等, 2004)。这类花岗岩由于富含水和其他挥发组分,所以并不像张文设想的那样黏度很大。

岩浆和热液的确“二者有根本性差别”,笼统地说它们是“两个独立的体系”,似乎也没错。但是,如前所述,当岩浆分异演化到晚期,形成残余岩浆的时候,温度已经比初始岩浆时要低得多。当岩浆(尤其是花岗质岩浆)中的 H_2O 和 F、B、P、Li 等挥发组分含量较高时,其结晶的温度范围也被扩大,允许残余岩浆的结晶温度降至 $500 \sim 600^\circ\text{C}$,甚至低至 $400 \sim 350^\circ\text{C}$ (Sirbescu et al., 2003),从而形成“熔体-流体-晶体三者共存”的低温岩浆体系,熔体是硅酸盐残

浆,流体则是温度、压力都超过水的临界点的“超临界(supercritical)流体”。研究表明,在熔融和结晶这两个过程中,都有晶体、熔体和流体共存的阶段(Spera et al., 2007; 朱金初等, 2011)。这种熔体-流体共存的阶段就是“岩浆-热液过渡阶段(magmatic-hydrothermal transition)”(London, 1986; 朱金初, 1997; 牛贺才等, 1997; Audetat et al., 2000; Bach et al., 2001; Balen et al., 2011; Veksler, 2004; Kamenetsky et al., 2004)。朱金初等(2000)通过对著名的新疆阿尔泰可可托海 3 号伟晶岩脉的详细研究,指出“从岩浆-热液演化的角度来看,含水的中酸性硅铝质熔浆体系的地质演化史,从形成、上侵和冷凝开始,至完全固结为止,大致可以分成 3 个阶段,即正岩浆阶段、岩浆-热液过渡阶段和热液阶段”;而岩浆-热液过渡阶段就是“以晶体相、熔体相和流体相三相并存为特点的”。

这种熔体-流体共存的体系就是张文之二认为值得商榷的“岩浆-热液体系”,也简称为“熔-流体系(melt-fluid systems)”(Layman et al., 2006)。上世纪 90 年代以来,有关岩浆岩矿物中共存的流体和熔体包裹体的精细观察和深入研究,使得人们不断加深了对“熔-流体系”的认识(Webster et al., 1997; Thomas et al., 2000; 2005; Kamenetsky et al., 2004)。

国内外关于“岩浆-热液过渡阶段”、“岩浆-热液体系”的论著很多;例如, Bureau 等的文章显示了他们利用金刚石压腔(diamond-anvil cell)实验观察到硅酸盐熔体和水的完全混溶;他们并指出这种完全混溶可以发生于很宽的熔体成分以及在上地幔条件下(Bureau et al., 1999)。Audetat 等人以澳大利亚新南威尔士州著名的 Mole 花岗岩为例,用多种方法进行了硅酸盐熔体和水流体在晚期岩浆到早期热液过渡阶段的化学演化的研究(Audetat et al., 2000)。前面提到过的涂光炽等所著《中国超大型矿床(I)》第三章,在论述柿竹园矿床成矿作用时,依据熔融包裹体和流体包裹体共存、大多数流体包裹体中均有 $10\% \sim 40\%$ 气体等特征,提出与成矿有关的是一种“熔体、流体、熔流体与气体混合共存”构成的“熔-流体系”(涂光炽等, 2000)。常海亮和黄惠兰对湘南尖峰岭似伟晶岩黄玉中熔流包裹体的研究认为,熔流包裹体是在岩浆演化末期从岩浆(熔融体)与水(流体)共存的不混溶体系中同时被捕获的,而对赣南西华山钨矿绿柱石中共存的流体-熔体包裹体的研究

表明形成黑钨矿石英脉的成矿流体是一种岩浆-热液过渡性流体(常海亮等,1998,2001)。Davidson 和 Kamenetsky 研究了智利中部 Rio Blanco(含 Cu-Mo 矿床)斑岩系统中富挥发分硅酸盐熔体向高盐度流体连续演化的过程,指出这是一个 silicate/volatile 比值逐渐降低的过程(Davidson et al., 2001)。Hack 等发表了一篇关于含水硅酸盐熔体、(水)流体、矿物三者相(phase)关系的综述文章(Hack et al., 2007)。谢玉玲等通过对川西牦牛坪大型稀土元素矿床萤石、石英等矿物中多相包裹体的研究,获得了稀土元素成矿作用中连续的熔体-流体演化过程的认识(Xie et al., 2009)。朱金初等(2011)最近在题为“湘南癞子岭花岗岩体分异演化和成岩成矿”的文章中指出:“癞子岭花岗岩体的这种岩石性质和化学元素的垂直分带及面型云英岩和钠长花岗岩的形成,主要与高度发育的岩浆分异和演化密切相关,也是稀有金属元素和挥发分逐步富集并成矿的关键机制”;而“这一分异和演化经历了一个晶体相、熔体相和流体相三相并存的岩浆-热液过渡阶段……”。

张文之二曾对王文的参考文献中专著类文献比例过大提出质疑,说“王文的评论引用的大多是书刊上的资料,有些还是上个世纪 80 年代的资料,笔者无法评价数据的质量。建议以后还是多引用杂志上的、新的资料为好”,言下之意似乎专著类文献不如杂志类论文有分量。实际上,研究成果(包括数据)的发表形式是与内容相关的,如果说关于矿床地质方面的研究成果可能较多地见之于专著类文献的话,那么,矿床地球化学方面的研究成果可能会更多地反映于杂志类论文。就“岩浆-热液体系”而言,在中外的杂志类论文中可谓屡见不鲜,本文列出的只是一小部分而已,期待张旗先生参阅、指正。

2 关于成矿母岩和含矿岩体

2.1 成矿母岩

张文认为花岗岩与金铜钨锡矿床都不是成因关系而只是空间关系,不是母子关系而只是兄弟关系,因此两篇张文都反对使用“成矿母岩”,并认为“成矿母岩”的说法是不对的。张文之一的结论第 6 条就说:“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”。对于张文这条十分武断的结论,笔者也可以十

分武断地说是完全错误的,并相信广大的矿床工作者不会同意张文的这个结论。

让我们先来看看“成矿母岩”或“母岩”的涵义,虽然这是矿床学的基本概念和基本知识。

徐克勤等(1964)编著的《矿床学》是笔者之一当年在大学读书时候用的教科书,该书的第 25 页上写道:“母岩就是指成矿物质来源的岩石。如与一个钨矿脉有成因关系的花岗岩就是这个钨矿床的母岩”。这句话不但简洁地说明了什么是母岩,同时还在举例时指出了花岗岩与钨矿脉之间的成因关系。

任启江等(1993)编写的《矿床学概论》是这样说的:“母岩是指提供成矿物质来源的岩石,如从镁质超基性岩中通过结晶作用形成了铬铁矿,则镁质超基性岩即可称为铬铁矿的母岩。”

姚凤良等(2006)编著的《矿床学教程》上写道:“给矿床形成提供主要成矿物质的岩石称为成矿母岩,或简称母岩(mother rock),如充填于裂隙中的黑钨矿石英脉是由花岗岩侵位冷凝时析出的含钨气水热液运移至裂隙结晶而成的,所以花岗岩便是含钨矿石英脉矿床的母岩。”

2005 年出版的《地球科学大辞典(应用科学卷)》中,也有“成矿母岩”这一个条目,解释为:泛指能够为一个矿床的形成提供成矿物质来源或与成矿作用直接有关的岩石(地球科学大辞典编委会,2005)。例如,生成铬铁矿矿床的超镁铁岩和生成钽铌磁铁矿矿床的铁镁岩,通常被称为铬铁矿矿床或钽铌磁铁矿矿床的成矿母岩。

上述关于成矿母岩或母岩的解释基本一致。总之,成矿母岩是人们对某一种岩石的称呼,它是客观存在的;它与“围岩(wall rock)”、“主岩(host rock)”的涵义不同;后者与矿床或矿体的空间关系更直观但不一定有成因关系,而母岩一般是既有空间关系又有成因关系的,甚至可以没有空间关系,但一定有成因关系。对成矿母岩或母岩这个术语,尽管可能有不同的理解或用法,但迄今为止仍然是矿床学界所广泛认可和经常使用的。例如《南岭银矿》一书中就总结说“它们的主要成矿母岩是同熔型和过渡型花岗岩类”(黄崇珂等,1997)。

“成矿母岩”一词不但形象生动,而且是一个通俗易懂的术语,对成矿理论的普及和指导地质找矿起到了积极作用。就譬如儿子可以离开母亲,成为“游子”,虽然空间上母子不在一起,但这种母子关系并不改变。以前文所述的钨矿与花岗岩的关系为

例,虽然南岭地区的石英脉型黑钨矿大多不是产在花岗岩体内而是产在花岗岩体上覆的浅变质岩中,但正是因为认识到了华南地区花岗岩是石英脉型黑钨矿的成矿母岩,才导致一大批钨矿的发现或者从小矿变成大矿,也为当年的“五层楼”模式、近年来的“五层楼+地下室”模式的建立奠定了基础。

2.2 关于含矿岩体

对于“含矿岩体”这个说法,张文也表示反对,原因是:“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”。

因为具有成因联系的含义,就不符合地质实际——这在逻辑上本身就不通。什么是地质实际?张文之一所说的地质实际是“有的岩体有矿,有的岩体没有矿”,这当然完全正确。不过,张文的提问却有点奇怪:“一个困扰学术界多年的问题是:既然花岗岩与成矿是成因有关,为什么有些花岗岩有矿,有些花岗岩无矿?例如铜陵有70多个岩体,含矿的岩体不到20个,为什么其余50多个岩体不含矿?”。显然,张文认为,如果花岗岩与矿床有成因关系,那就必须每一个花岗岩都要成矿;既然“地质实际”是“有的岩体有矿,有的岩体没有矿”,那就证明花岗岩与矿没有成因关系——说这是“强盗逻辑”,或许有点太不客气,但至少有点极端或是形而上学吧。

对于张文提出的这个问题,笔者说两点看法。第一点,笔者并不认为“有些花岗岩有矿,有些花岗岩无矿”是什么“困扰学术界多年的问题”,矿床学界的人都不会认为这是“困扰学术界多年的问题”;因为大家都知道花岗岩的情况很复杂,成矿的情况更复杂,条件更苛刻,没有人指望每个花岗岩体都会有矿,但是也没有人会因此而认为花岗岩与矿就没有成因关系了。第二点,张文的这句话其实恰恰说明了“含矿岩体”是客观存在的:铜陵不是就有20个“含矿岩体”吗?

正因为有“含矿岩体”和“不含矿岩体”之分,所以从事找矿勘查和矿床研究的人会竭尽全力地去研究它们之间的差别,试图总结出一些区分它们的标志,努力寻找那些可能与成矿有关的“含矿岩体”,以提高地质找矿的工作成效。张旗先生虽然不是专门从事矿床研究和地质找矿的,但也曾经提出埃达克岩可以作为找矿的标志来使用(张旗等,2002;2004a,2004b),只是稍后由于受到其他作者论文的启示(如芮宗瑶等,2006),所以他在检讨自己上述说

法时认识到,埃达克型花岗岩作为找矿标志的提法不恰当;埃达克岩更重要的是作为找矿的前提,而不是找矿的标志”、“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”。笔者不具体评论埃达克型花岗岩与金铜矿床的关系,但至少觉得张旗先生后来的这种想法还不离谱。可是,张旗先生为什么不把这个思想用于花岗岩与相关矿床的研究呢?有了花岗岩,只是具备了可能成矿的各种条件之中的最最起码的一个条件而已;而岩体的形成构造环境、规模大小、温度、压力、氧逸度、矿物组分、化学成分、挥发分含量、金属含量、侵位深度、保存条件……等等,都可能是关系到该岩体是否成矿的因素和条件。芮宗瑶等(2006)在那篇给张先生以启示的关于斑岩铜矿的文章中就指出了“与成矿密切的斑岩”的若干主要特征,例如“含矿斑岩”具有特征性很强的副矿物组合(磁铁矿、磷灰石、榍石、金红石和锆石)等等。这里的“含矿斑岩”当然就是“含矿岩体”。

张文为了反对含矿岩体和成矿母岩,甚至还提出了更尖锐更严厉的问题:“含矿岩体和成矿母岩的说法盛行了半个多世纪了,其找矿效果究竟如何?科学意义究竟如何?”——这的确需要全体矿床工作者认真思考、努力工作,做出更多更大的成果,使得类似张文作者的人们今后不会再提出这种咄咄逼人、令我们汗颜的问题。但是退一万步说,即使“含矿岩体和成矿母岩的说法”并无直接的找矿效果,也不能否认它们在认识矿床地质特征、探究成矿作用机制上的意义吧。矿床学的术语或“说法”很多,我们不能要求每个术语或“说法”都有找矿效果;而且事实上,通过确定“含矿岩体和成矿母岩”来帮助人们寻找和发现矿床的例子也还是不少的。如果张旗先生能多关注一些“地质勘探报告”类的文献资料的话,或者翻阅一下诸如《中国矿床发现史》各省系列之类专著的话,一定会发现“含矿岩体和成矿母岩的说法”还是大有益处的。

一个不争的事实是长期以来“成矿母岩”和“含矿岩体”等术语一直被从事矿床工作的人们所使用着,并确实已经成为“矿床学界的共同语言”,因此,其他专业的人是否赞同“含矿岩体”和“成矿母岩”这些术语,其实无关紧要。

3 关于与花岗岩有关金铜钨锡成矿作用

3.1 花岗岩与金铜钨锡有成因关系

张文反复强调“花岗岩与成矿有关,不是成因有关,而是时空有关”。为此张文之二还特意赞扬了笔者之一的某篇文章“总结很精辟”,因为该文指出了成岩与成矿存在“形成机制上的根本性差异”(华仁民,2005)。但是“成岩与成矿存在差异”并不等于二者不能是成因关系。

诚然,对于究竟什么叫做“成因关系”,可能不同的人有不同的理解。张文对成因的解释就是“因果关系”或“母子关系”。笔者认为“因果关系”确实是“成因”的关键所在;但是“母子关系”却不一定是界定成因关系的确切表述,尤其是在地质学的范畴内更是如此。对于花岗岩与矿床有没有“成因关系”,无非是看花岗岩是不是成矿物质的来源、矿床产出与花岗岩的时空关系等。我国著名矿床学家、国际公认的钨矿地质专家徐克勤院士指出:“与华南花岗岩有成因联系的矿床主要分成两类”,一类是“与大陆地壳改造型花岗岩有关的矿床”,它们由“W、Sn、Nb、Ta、Be、U、稀土等亲花岗岩元素所组成,这些元素以陆壳较富”,另一类是“与同熔型花岗岩类有关的矿床”;如Fe、Cu、Mo、Au、Pb、Zn等均以上地幔(及部分下部陆壳)为富”(徐克勤等,1984a)。这里所说的“有成因联系”就是指花岗岩提供了成矿元素。卢焕章(1986)在其所著《华南钨矿成因》一书的结论中说:“总起来说,华南主要类型的钨矿与经地壳重熔而形成的含钨很高的燕山期花岗岩有成因上的联系”。笔者认为,张文一定要说花岗岩和成矿元素都是来自于陆壳,因此二者是兄弟而非母子关系,因此没有成因联系,这是过于牵强附会甚至钻牛角尖了。再说,张文反对的“成因关系”和张文主张的“时空关系”二者并不矛盾,时空关系也是成因关系的一个方面,讨论成因联系离不开讨论时空关系。因此我们不能以偏概全,不能以“时空关系”“兄弟关系”来否认花岗岩与金铜钨锡成矿之间很重要的成因关系。

实际上“花岗岩与金铜钨锡成矿有成因关系”几乎是每一个矿床工作者都认同的、近于常识性的概念,根本不是什么问题,所以实在无需笔者在这里再多费笔墨加以阐述了。

张文还表示对华文所说的“矿床是在一定的构

造条件下由热和流体将岩石中分散的金属元素迁移-集中的产物”这句话“不赞同”;为什么?因为,不是“将岩石中分散的金属元素迁移-集中起来”,而应当是“将源区中分散的金属元素迁移-集中起来”。笔者要请教张旗先生:这两句话真的有什么本质的差别吗?你说的“源区”难道不是由“岩石”组成的吗?你的“源区中分散的金属”难道不就是源区“岩石中分散的金属”吗?为什么你说“源区”是对的,我说“岩石”就不对了呢?

3.2 金铜和钨锡共生是大量存在的事实

张文之二在“关于金铜和钨锡是否能同时同地出现的问题”一节,针对华文列举的“一大堆”金铜和钨锡可以共生的实例给出了6条“答复”,这些所谓“答复”大多含糊其辞,甚至答非所问,只是说了好几句诸如“这是很好的研究对象”、“这个问题很有意思,值得今后认真研究”、“很有意思、值得重点加以解剖”、“笔者阅后发现该文很有意思”之类的话。其实,笔者并不指望张旗先生能够一一回答华文列举的“一大堆”矿床实例,只是希望通过大量事实来纠正他的错误认识而已。但是看来张旗先生仍然不肯面对和承认金铜和钨锡共生的事实。或许是为了挽回无法“答复”华文质疑的尴尬,张文之二煞有介事地提出了这样一个问题:“一个很难解释的、最大的难题,莫过于湖南的钨锡金矿床。金铜和钨锡笔者认为相悖的,但是,钨和金在一起怎么解释?”——看到这里,不禁令人掩卷而笑。因为实际上,湖南的钨锡金共生矿床早就不是“困扰矿床学界”的什么“很难解释的、最大的难题”,因为金铜和钨锡本来就不是什么“相悖”的。张旗先生置基本事实和矿床学基本知识于不顾,却非要提出一套所谓“金铜和钨锡相悖”的理论,当然就会自己给自己套上许多枷锁,永远也无法破解这一类“最大的难题”了。

关于这个问题,张文之二最后不得不承认:“地质情况是极其复杂的,需要我们不懈地探索,笔者的解释不一定合适”。这听起来还有点实事求是的意思,不过,接下来张文之二却话锋一转,又反问道:“华文坚持金铜和钨锡可以伴生,你的理论依据是什么呢?”——在此,笔者可以明确地告诉张旗先生:首先,不是我们要“坚持金铜和钨锡可以伴生”,其次,也不是依据了什么理论,“金铜和钨锡可以伴生”只是大量矿床所反映的,因此也是我们必须尊重的基本地质事实而已;而笔者在那篇质疑文章中所列举的,也只不过是大量金铜-钨锡相互共生或伴生的矿

床中的一小部分罢了。

4 结束语

地质学是一门实践性很强的科学,矿床学似乎更是如此。记得笔者之一的导师徐克勤院士说过:没有看过100个矿床,不可能成为一个矿床学家。这句话实际上是告诫我们,矿床是一个各种复杂地质作用的综合产物,千变万化,情况各异,因此,不要轻易下结论。矿床学发展史上有不少例子是矿床已经采尽而对其成因仍有争议的。笔者从参加工作起,一直从事矿床学领域的找矿勘查、科研和教学工作,虽然看过的矿床不会少于100个,但是每次面对一个新的矿床或要做一些矿床方面的“总结”、“综述”之类工作的时候,总有临深履薄之感。而即使是那些比笔者更资深、更有成就的矿床学家,面对形形色色错综复杂的矿床,也不会轻易总结什么“上山找金铜、下山找钨锡”或者“先找埃达克岩再找矿”之类的理论。

必须说明的是,笔者并不反对非矿床专业人士介入矿床学领域的研究工作,因为有些时候外行们可能会提出一些令内行们振聋发聩的意见。因此,笔者真诚欢迎张旗先生和其他不同专业的人士关注或参与矿床学研究,提出新鲜的见解,共同促进矿床学的发展。但是,笔者也真诚希望他们能尊重地质事实,尊重矿床学的基本概念、基础知识,尊重矿床工作者的研究成果,而不要在对相关问题一无所知或者知之甚少的情況下就动辄挑毛病、找“误区”,更不要轻易否定那些“矿床学界长期以来”大家都以为“是正确的东西乃至一些“共同语言”;否则,他们便失去了与矿床工作者讨论或争鸣的基础,他们的高谈阔论也就变成了毫无意义的自说自话。

参考文献/References

- 常海亮,黄惠兰.1998.尖峰岭似伟晶岩内黄玉中的熔流包裹体[J].岩石矿物学杂志,17(1):81-86.
- 常海亮,黄惠兰.2001.西华山黑钨矿石英脉绿柱石中熔融包裹体的发现及其意义[J].华南地质与矿产,2:21-27.
- 陈骏,陆建军,陈卫锋,王汝成,马东升,朱金初,张文兰,季峻峰.2008.南岭地区钨锡铌钽花岗岩及其成矿作用[J].高校地质学报,14(4):459-473.
- 陈毓川,裴荣富,张宏良,等.1989.南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色及稀有金属矿床地质[M].北京:地质出版社,1-508.
- 陈毓川,毛景文等.1995.桂北地区矿床成矿系列和成矿历史演化轨

- 迹[J].南宁:广西科学技术出版社,1-394.
- 地矿部南岭项目花岗岩专题组.1989.南岭花岗岩地质及其成岩和成矿作用[M].北京:地质出版社,1-471.
- 地球科学大辞典编委会.2005.地球科学大辞典(应用科学卷)[M].北京:地质出版社,8.
- 地球科学大辞典编委会.2006.地球科学大辞典(基础科学卷)[M].北京:地质出版社,440,448.
- 贵阳地球化学研究所.1979.华南花岗岩类的地球化学[M].北京:科学出版社,1-421.
- 华仁民.2005.南岭中生代陆壳重熔型花岗岩类成岩-成矿的时间差及其地质意义[J].地质论评,51(6):633-639.
- 华仁民.2011.关于花岗岩成因分类与花岗岩成矿作用若干基本问题的思考——与张旗先生等商榷[J].矿床地质,30(1):163-170.
- 黄崇轲,朱裕生,张忠伟,孙纯成,杨兆萍.1997.南岭银矿[M].北京:地质出版社,57.
- 李福春,朱金初,饶冰,王年生.2000.富氟花岗岩中萤石岩浆成因的新证据[J].矿物学报,20(3):224-227.
- 李福春,朱金初,张林松,饶冰,张佩华.2004.富氟花岗质熔体形成和演化的实验研究[J].岩石学报,19(1):125-130.
- 卢焕章.1986.华南钨矿成因[M].重庆:重庆出版社,211-212.
- 卢焕章.1997.成矿流体[M].北京:北京科学技术出版社,1-210.
- 卢欣祥,祝朝辉,谷德敏,张画眠,吴梅,吴艳.2010.东秦岭花岗岩伟晶岩的基本地质矿化特征[J].地质论评,56(1):21-30.
- 毛景文,李红艳,宋学信,芮柏,胥友志,王登红,蓝晓明,张景凯.1998.湖南柿竹园钨锡钼铋多金属矿床地质与地球化学[M].北京:地质出版社,1-215.
- 莫柱孙,叶伯丹.1980.南岭花岗岩地质学[M].北京:地质出版社,172-178.
- 南京大学地质学系.1981.华南不同时代花岗岩及其成矿关系[M].北京:科学出版社,1-395.
- 牛贺才,单强,陈培荣.1997.岩浆-热液过渡阶段流体性质的研究——以四川冕宁矿床为例[J].南京大学学报,33卷,地质流体专辑,21-27.
- 任启江,胡志宏,严正富,叶俊,孙明志.1993.矿床学概论[M].南京:南京大学出版社,5.
- 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.
- 孙鼐,周金城,刘昌实,陈克荣,曾家湖.1983.浙江桐庐火山侵入杂岩的地球化学特征[J].地球化学,4:329-337.
- 涂光炽,等.2000.中国超大型矿床(Ⅰ)[M].北京:科学出版社,41-42.
- 王登红.2011.关于矿床学研究方法的一点看法——就“埃达克岩”与成矿的关系问题与张旗先生商榷[J].矿床地质,30(1):171-175.
- 王联魁,黄智龙.2000. Li-F 花岗岩液态分离和实验[M].北京:科学出版社,1-280.
- 吴永乐,梅勇文,刘鹏程,蔡常良,卢同衍.1987.西华山钨矿地质[M].北京:地质出版社,1-317.
- 肖庆辉,邓晋福,马大铨,等.2002.花岗岩研究思维与方法[M].北京:地质出版社:71-78.
- 熊小林,朱金初,饶冰.1996.黄玉云英岩成因的初步实验研究[J].科学通报,41(10):917-919.

- 徐克勤, 孙 翥, 王德滋, 胡受奚. 1963. 华南多旋回花岗岩类的侵入时代、岩性特征、分布规律及其成矿专属性的探讨[J]. 地质学报, 42(1-2): 1-26, 141-155.
- 徐克勤, 胡受奚, 俞受望. 1964. 矿床学[M]. 北京: 人民教育出版社. 25.
- 徐克勤, 涂光炽. 1984a. 花岗岩地质与成矿关系[M]. 南京: 江苏科学技术出版社. 1-657.
- 徐克勤, 孙 翥, 王德滋, 胡受奚, 刘英俊, 季寿元. 1984b. 华南花岗岩成因与成矿[A]. 见: 徐克勤, 涂光炽, 主编. 花岗岩地质与成矿关系[M]. 南京: 江苏科学技术出版社. 1-20.
- 徐夕生, 邱检生(主编). 2010. 火成岩岩石学[M]. 北京: 科学出版社. 16-17.
- 姚凤良, 孙丰月. 2006. 矿床学教程[M]. 北京: 地质出版社. 16.
- 翟裕生, 林新多, 周宗桂, 赵永鑫, 章传玲, 张德会, 赵彦明. 1985. 花岗岩体构造-化学特征与钨锡成矿作用[J]. 地球科学——武汉地质学院学报, 10(4): 11-20.
- 张德会, 张文淮, 许国建. 2004. 富 F 熔体-溶液体系流体地球化学及其成矿效应[J]. 地学前缘, 11(2): 479-490.
- 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, 金惟俊, 王 焰, 李承东, 王元龙. 2010. 花岗岩与金铜及钨锡成矿的关系[J]. 矿床地质, 29(5): 729-759.
- 张 旗. 2011. 再论花岗岩的分类及其与金铜钨锡成矿的关系[J]. 矿床地质, 30(3): 557-570.
- 朱金初. 1997. 硅铝质熔浆体系中的水质流体[J]. 南京大学学报, 33(地质流体专辑): 11-20.
- 朱金初, 吴长年, 刘昌实, 李福春, 黄小龙, 周东山. 2000. 新疆阿尔泰可可托海 3 号伟晶岩脉岩浆-热液演化和成因[J]. 高校地质学报, 4(1): 40-52.
- 朱金初, 饶 冰, 熊小林, 李福春, 张佩华. 2002. 富锂氟含稀有矿化花岗岩岩石的对比和成因思考[J]. 地球化学, 31(2): 141-152.
- 朱金初, 王汝成, 陆建军, 张 辉, 张文兰, 谢 磊, 章荣清. 2011. 湘南癞子岭花岗岩体分异演化和成岩成矿[J]. 高校地质学报, 17(3): 381-392.
- Antipin V S, Goreglyad A V, Savina E A and Mitichkin M A. 1997. Evolution of Li-F-granites with the formation of rare-metal mica schlieren, Bezmyansky Massif, Prebaikalia[J]. Russian Geology and Geophysics, 38(7): 1251-1263.
- Audetat A, Guenther D and Heinrich C A. 2000. Magmatic-hydrothermal evolution in a fractionating granite: A microchemical study of the Sn-W-F-mineralized Mole Granite (Australia)[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64(19): 3373-3393.
- Bach W, Alt J C and Humphris S E. 2001. A geochemical and isotopic study of the magmatic-hydrothermal transition in the lower oceanic crust (ODP Hole 735B)[J]. GSA Abstracts with Programs, 33(6): 331.
- Balen D and Broska I. 2011. Tourmaline nodules: Products of devolatilization within the final evolutionary stage of granitic melt (in Granite-related ore deposits)[J]. Geological Society Special Publications, 350: 53-68.
- Blevin P L and Chappell B W. 1995. Chemistry, origin, and evolution of mineralized granites in the Lachlan Fold Belt, Australia; The metallogeny of I- and S-type granites[J]. Econ. Geol., 90: 1604-1619.
- Breiter K, Skoda R and Uher P. 2007. Nb-Ta-Ti-W-Sn-oxide minerals as indicators of a peraluminous P- and F-rich granitic system evolution; Podlesi, Czech Republic[J]. Mineralogy and Petrology, 91(3-4): 225-248.
- Bureau, H and Keppler, H. 1999. Complete miscibility between silicate melts and hydrous fluids in the upper mantle: Experimental evidence and geochemical implications[J]. Earth and Planetary Science Letters, 165(2): 187-196.
- Burnham C W. 1979. Magmas and hydrothermal fluids[A]. In: Barnes H L, ed. Geochemistry of hydrothermal ore deposits[M]. 2nd edition. New York: John Wiley & Sons. 71-36.
- Burnham C W and Davis N F. 1971. The role of H₂O in silicate melts; I. P-V-T relations in the system NaAlSi₃O₈-H₂O to 10 kilobars and 1000 degrees [J]. American Journal of Science, 270(1): 54-79.
- Burnham C W. 1994. Development of the Burnham model for prediction of H₂O solubility in magmas[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 30: 123-129.
- Campbell I H and Taylor S R. 1983. No water, no granites; no oceans, no continents[J]. Geophysical Research Letters, 10(11): 1061-1064.
- Charoy B. 1999. Beryllium speciation in evolved granite magma: Phosphates versus silicates[J]. European Journal of Mineralogy, 11: 135-148.
- Claudia Cannatelli L, Fedele F J Spera and Benedetto De Vivo. 2009. Understanding magma evolution at Campi Flegrei (Italy) using melt inclusions data and thermodynamic modeling[J]. Proceedings of the ECROFI, 20: 49-50.
- Davidson P and Kamenetsky V S. 2001. Immiscibility and continuous felsic melt-fluid evolution within the Rio Blanco porphyry system, Chile: Evidence from inclusions in magmatic quartz[J]. Econ. Geol., 96: 1921-1929.
- Dingwell D B and Mysen B O. 1985. The effect of water and fluorine on the viscosity of albite melt at high pressure: A preliminary investigation[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 74: 266-274.
- Hack A C, Thompson A B and Aerts M. 2007. Phase relations involving hydrous silicate melts, aqueous fluids, and minerals[J]. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 65: 129-185.
- Hezel D C, Kalt A, Marschall H R, Ludwig T and Meyer H P. 2011. Major-element and Li, Be compositional evolution of tourmaline in an S-type granite-pegmatite system and its country rocks: an example from Ikaria, Aegean Sea, Greece[J]. The Canadian Mineralogists, 49: 321-340.

- Huang W L and Wyllie P J. 1973. Muscovite dehydration and melting in deep crust and subducted oceanic sediment[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.* , 18(1): 133-136.
- Jahns R H and Burnham C W. 1969. Experimental studies of pegmatite genesis : 1. A model for derivation and crystallization of granitic pegmatites[J]. *Econ. Geol.* , 64 : 843-864.
- Kamenetsky V S , Naumov V B , Davidson P , van Acherbergh E and Ryan C G. 2004. Immiscibility between silicate magmas and aqueous fluids : A melt inclusion pursuit into the magmatic-hydrothermal transition in the Omsukchan Granite (NE Russia) [J]. *Chemical Geology* , 210 : 73-90.
- Kennedy G C. 1961. Phase relations of some rocks and minerals at high temperatures and high pressures[J]. *Advances in Geophysics* , 7 : 303-322.
- Layman A J and Anderson A J. 2006. Preliminary investigation of Nb in melt-fluid systems using in situ X-ray spectroscopy[J]. *Atlantic Geology* , 42(1): 94-95.
- Li X H , Li W X and Li Z X. 2007. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling Range , South China[J]. *Chinese Science Bulletin* , 52(14): 1873-1885.
- London D. 1986. Magmatic-hydrothermal transition in the Tanco rare elements pegmatite : evidence from fluid inclusions and phase equilibrium experiments[J]. *American Mineralogists* , 71(3-4): 376-395.
- Luth W C. 1967. Studies in the system $KAlSi_3O_8$ - Mg_2SiO_4 - SiO_2 - H_2O ; [Part] 1 , Inferred phase relations and petrologic applications[J]. *Journal of Petrology* , 8(3): 372-416.
- Manning D. 1981. The effect of fluorine on liquidus phase relationship in the system Qz - Ab - Or with excess water at 1 kbar[J]. *Contribution of Petrology* , 76 : 206-215.
- Mueller A , van den Kerkhof , Behr H-J , Kronz A and Koch-Mueller. 2010. The evolution of late-Hercynian granites and rhyolites documented by quartz : A review[J]. *GSA Special Paper* , 472 : 185-204.
- Niggli P. 1912. Die gasmineralisatoren im magma[J]. *Z. Anorg. Chem.* , 75 : 161-188.
- Parat F and Bucher K. 2009. Topaz-fluorite granites from the Black Forest , Germany ; Evolution of F-rich felsic magmas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 73(13S): A992.
- Pichavant M and Manning D. 1984. Petrogenesis of tourmaline granites and topaz granites : The contribution of experimental data[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* , 35 : 1-5.
- Rickers K , Thomas R and Heinrich W. 2006. The behavior of trace elements during the chemical evolution of the H_2O - , B- , and F-rich granite-pegmatite-hydrothermal system at Ehrenfriedersdorf , Germany : A SXRF study of melt and fluid inclusions[J]. *Mineralium Deposita* , 41(3): 229-245.
- Spera F J , Bohron W A , Till C B and Ghiorso M S. 2007. Partitioning of trace elements among coexisting crystals , melt , and supercritical fluid during isobaric crystallization and melting[J]. *American Mineralogist* , 92 : 1881-1898.
- Sirbescu M C and Nabelek P I. 2003. Crustal melts below 400°C[J]. *Geology* , 31(8): 685-688.
- Thomas R , Webster J D and Heinrich W. 2000. Melt inclusions in pegmatite quartz : complete miscibility between silicate melts and hydrous fluids at low pressure[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology* , 139 : 394-401.
- Thomas R , Foerster H J , Rickers K and Webster J D. 2005. Formation of extremely F-rich hydrous melt fractions and hydrothermal fluids during differentiation of highly evolved tin-granite magmas : A melt-fluid-inclusion study[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology* , 148 : 582-601.
- Veksler I V. 2004. Liquid immiscibility and its role at the magmatic-hydrothermal transition : A summary of experimental studies[J]. *Chem. Geol.* , 210 : 7-31.
- Ward C D , McArthur J M and Walsh J N. 1992. Rare earth element behavior during evolution and alteration of the Dartmoor Granite , SW England[J]. *Journal of Petrology* , 33(4): 785-815.
- Webster J D , Thomas R , Rhede D , Forster H J and Seltmann R. 1997. Melt inclusions in quartz from an evolved peraluminous pegmatite : geochemical evidence for strong tin enrichment in F-rich and P-rich residual liquids[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 61 : 2589-2604.
- White D E. 1974. Diverse origins of hydrothermal ore fluid[J]. *Econ. Geol.* , 69 : 954-973.
- Whitney J A , 1988. The origin of granite : The role and source of water in the evolution of granitic magmas[J]. *GSA Bulletin* , 100 : 1886-1897.
- Xie Y L , Hou Z Q , Yin S P , Simon C D , Xu J H , Tian S H and Xu W Y. 2009. Continuous carbonatitic melt-fluid evolution of a REE mineralization system : Evidence from inclusions in the Maoniuping REE Deposit , Western Sichuan , China[J]. *Ore Geology Reviews* , 36(1-3): 90-105.