

·综述与进展·

关于成矿作用地球化学研究的几个问题

张德会

ZHANG Dehui

中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

School of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

摘要:成矿作用地球化学是矿床地球化学的基础理论分支,属于应用基础类学科,以地球化学原理和方法研究造成元素沉淀富集形成矿床的地球化学作用的原因和机理。本文讨论了热液矿床成矿作用的几个问题。指出花岗岩与矿床类型之间是否存在相关性,即花岗岩是否具有成矿专属性仍然存在争论,需要继续探索。花岗岩类具有成矿潜力不等于这些花岗岩最终都能成矿。决定岩浆发生成矿作用的因素很多,其中岩浆分异作用过程和流体释放时间及其机制可能是决定成矿发生和矿床类型的关键,岩浆熔体中挥发组分及其行为可能是岩浆能否发生成矿作用的决定性要素,聚焦流体流动是成矿作用能否发生的关键环节,而自组织临界性和反馈作用决定了成矿效率和矿床的规模。

关键词:成矿作用地球化学;应用地球化学;问题讨论

中图分类号:P611;P595

文献标识码:A

文章编号:1671-2552(2005)10~11-0885-07

Zhang D H. Some problems on the geochemistry of ore-forming processes. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24 (10-11):885-891

Abstract: The geochemistry of ore-forming processes is one of the branches of applied geochemistry, which uses the principle and method of geochemistry to study and explain the mechanisms of geochemical processes responsible for the precipitation of ore elements and formation of ore deposits. In this paper, some problems concerning the geochemistry of ore-forming processes of hydrothermal ore deposits are discussed. Whether or not there is a relationship between granites and ore deposit types, i.e. whether granites have metallogenic specialization, is still in dispute and needs further study. The fact that granitoids have ore potential does not imply that the granitic magmas can produce ore deposits in the end. There are many controlling factors responsible for ore-forming processes. Among these, magmatic differentiation and the time and mechanism of fluid release may be the key controls on the ore-forming processes and deposit types. The magmatic volatile phases (MVP) in hydrothermal fluids and their behaviors are probably one of the decisive factors for determining whether ore-forming processes can occur. Focusing of fluid flow appears to be a critical link in the occurrence of the ore-formation processes, while the self-organized criticality and the extent to which feedback occurs between processes determine the efficiency of metal deposition and characteristics of the resulting deposit, as well as the size of the deposit.

Key words: geochemistry of ore-forming processes; applied geochemistry; problem and discussion

地球化学创始于20世纪30年代,真正发展始于20世纪50年代。尽管在地球科学诸多学科中该学科创建较晚,但是由于建立在地球科学和化学2门基础学科的深厚根基上,因此具有强劲的发展势头。目前已经渗入地球科学所有领域,成

为地球科学中起着中心作用的成熟学科^[1]。地球化学分为理论和应用两大部分,应用地球化学已经扩展到与地球化学有关的所有应用学科。成矿作用地球化学是矿床地球化学的基础理论分支,也属于应用地球化学中的应用基础研究分支,

收稿日期:2005-03-21;修订日期:2005-08-05

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:40173021)和国家重点基础研究项目(973项目)(2002CB4126)资助。

作者简介:张德会(1955-),男,教授,博士生导师,从事地球化学、成矿作用地球化学和应用地球化学的教学和研究工作。E-mail:

zhdehui@cugb.edu.cn

以地球化学原理和方法研究造成元素沉淀富集形成矿床的地球化学作用的原因和机理。

全球铜资源量近一半和目前全球铜年产量的一半以上来自于斑岩铜矿床,因此对其成矿作用地球化学的研究历来受到很大重视。斑岩铜矿形成于消减带的层状火山岩之下,如果这是汇聚板块边缘的共同特征,那么这种重要类型的矿床应该非常丰富。过去1万年时间内,全球岛弧有1000余个火山发生喷发^[2],但是斑岩铜矿的蚀变和脉状矿化却非常稀少,更不必说矿床了。事实表明,要在全球巨量的几乎或根本没有矿化的深成岩和火山杂岩中发现新矿床需要投入巨大的勘探努力^[3]。因此斑岩铜矿具有罕见性(scarcity)。目前制约矿床勘查的深层次问题是:花岗岩类型与矿床之间是否存在相关性?究竟什么样的环境和过程制约着矿石的金属成分?是源区重要还是作用过程更为重要?如何区别有矿床生产力(productive)和无矿床生产力(non productive)的侵入体^[4]?本文以岩浆热液矿床为例,讨论成矿作用地球化学研究的几个有关问题。

1 花岗岩与矿床类型之间是否存在相关性 仍然需要探讨

20世纪70—80年代Chappell等^[5]、Loiselle等^[6]、Pitcher^[7]等提出将花岗岩类岩石分为4类:I型、S型、A型和M型,4类花岗岩都有与其共生的矿床,A型为钨铁矿、锡石和萤石矿,M型为斑岩型Cu、Au矿,I型(科迪勒拉)为斑岩型Cu、Mo矿,I型(加里东型)一般矿化不强,S型为云英岩型和脉型W、Sn矿床。分类强调花岗岩类之间的化学变化和花岗岩与大地构造、源区成分的关系。而Hannah等^[8]认为,上述花岗岩类型字母粥(Alphabet soup)分类存在问题。这种分类一般模棱两可。Clarke^[9]对此作过详细讨论,建议仍然使用Shand^[10]花岗岩的三元化学分类,即过铝质(peraluminous)、准铝质(metaluminous)和过碱性(peralkaline)花岗岩。其他学者也赞成使用这种根据铝饱和指数(ASI)进行的花岗岩分类^[11]。而且认为花岗岩与金属矿床的关系远非那么密切,成矿作用不完全取决于花岗岩的类型^[9]。

Blevin等^[12,13]以澳大利亚东部Lachlan褶皱带花岗岩为例进行研究,指出与花岗岩有关的矿床可能与花岗岩套中岩石的氧化状态、卤素含量和分异结晶程度有关,其中氧化状态主要受源区控制。在矿床形成方面,源区组分仅对其后的岩浆分异、挥发组分出溶、流体释放程度等具有决定作用。源区不是决定矿床形成的第一位因素^[9]。

构造位置控制了地壳和地幔源区物质遭受熔融的类型和岩浆产生的深度,也限制了源区岩石的组成和矿物学特征,以及熔融位置的温度和压力条件。源区物质与所形成的花岗岩的化学特征在广义上是相关的,I型花岗岩主要来自火成岩源区,S型花岗岩主要来自沉积岩源区。但是,这并不意味着I型花岗岩源自幔源,S型花岗岩源自壳源。不同化学组

成的源岩由于成岩作用可以形成相同的岩石,如过铝质含矿花岗岩等。当前花岗岩的研究趋势是强调花岗岩的多源物质混合成因。可以是壳幔物质二元混合,也可以是三元混合,如长英质上地壳、基性下地壳、幔源基性物质或陆壳、洋壳、地幔物质的混合。

2 具有成矿潜力的花岗岩不等于 最终都能成矿

人们强调花岗岩与成矿关系时,都是强调一种成矿的可能性,即成矿作用发生的必要条件。研究表明,许多赋存大量具成矿潜力花岗岩的地区,真正能够成矿的花岗岩仅是其中的一小部分。对东秦岭含Mo花岗岩的研究表明^[14],成矿岩体无论是以Mo、W还是以Cu为主,均属于钙碱性系列。但是并非所有具备此特征的侵入体都能形成钼(钨、铜)矿床。位于区域地球化学Mo异常区的上房沟钼矿,与成矿岩体同源,但属于岩浆演化末期的花岗斑岩并不伴随钼矿化。南泥湖钼矿所在的栾川南部已发现11个中酸性小岩体,都有钼矿化,但只有南泥湖、上房沟等少数岩体才形成有工业价值的钼(钨)矿。秦岭地区花岗岩广泛分布,已发现各类矿化岩体近百个^[15],但是并非每个小岩体都有钼矿化。嵩县祈雨沟金矿是一角砾岩化斑岩型矿床,受酸性斑岩控制,矿化与角砾岩体有关,已发现30余个含金角砾岩,但有工业价值的仅占1/5左右^[14]。赣东北乐(华)–德(兴)成矿带赋存有4个大型铜矿、2个大型铅锌矿、1个大型独立岩金矿及多个中、小型矿床,然而区内37个小斑岩体只有9个为含矿斑岩,含矿斑岩中只有3个为工业矿床^[16]。滇西北中甸地区近年来找矿勘探有重大突破,已经发现80余个斑岩体,但是发现的斑岩铜矿和与斑岩有关的铜矿不到20处^[17]。

埃达克岩(adakite)是1990年由Defant等^[18]提出的描述具有特定地球化学性质的一套中酸性火山岩和侵入岩组合的术语。近年来对埃达克岩及其与成矿关系的研究成为一个热点。一些学者指出,全球多数埃达克岩省也是重要的成矿省。地区规模上,多数矿床的主岩是埃达克岩,矿区规模上,当埃达克岩与非埃达克岩共存时,成矿主要与埃达克岩有关。中国许多金、铜、钼矿床的成矿作用与埃达克岩密切相关。埃达克岩有利于成矿的关键是角闪石的脱水作用,角闪石分解产生大量流体,不仅有利于埃达克质岩浆的形成,还有利于金属元素的萃取和迁移^[19]。埃达克质岩浆以富水、富硫和高氧逸度为特征。高氧逸度使板片熔体携带大量Fe₂O₃,这种熔体进入地幔楔将导致地幔氧逸度增高,使地幔中的金属硫化物被氧化,从而有利于地幔中亲Cu元素以硫酸盐的形式进入熔体。但是,埃达克岩有利于成矿不等于非埃达克岩就不成矿,也不等于每一个埃达克岩都能成矿。

笔者认为,对埃达克岩与成矿的关系作出结论尚需做更为深入细致的工作。与成矿有关的花岗岩的形成与源区和作用过程2方面有关,究竟成矿在多大程度上受源区的控制?多

大程度上受作用或过程的制约?尚无定论。Lehmann^[20]认为,在形成高浓度亲花岗岩元素方面,源区并不比分异结晶作用贡献更大。Christiansen等^[21]这样论述,稀有金属花岗岩的形成不需要地球化学“预富集”或异常的地壳来源。岩浆岩与成矿关系的研究业已表明,源区形成的岩浆中挥发组分的含量是决定其后能否成矿的重要因素之一^[22]。以后的演化过程还有其他约束,如流体释放的时间和机制,晶体-熔体和流体-熔体分离过程等。以斑岩铜矿为例,含矿斑岩中金属元素含量为 $70 \times 10^{-6} \sim 670 \times 10^{-6}$,非含矿花岗岩中成矿元素的含量则只有 $10n \times 10^{-6}$ 到 $n \times 10^{-6}$ ^[23]。上述含矿斑岩极有可能经历了热液蚀变过程,其中金属含量距离矿石最低品位还差1~2个数量级。而非含矿岩体,尽管经历了结晶作用过程,其金属元素含量与矿石品位相比还要低2~3个数量级^[24]。据研究,斑岩型和其他与高温岩浆系统伴生矿床中的流体包裹体一般含Cu都在 $n \times 1000 \times 10^{-6} \sim 10000 \times 10^{-6}$ 之间。各种分析技术获得的数据与实验室研究得出的结论高度一致,即成矿溶液确实具有如此高的Cu含量,证实斑岩铜矿环境中岩浆热液具有迁移巨量Cu的潜力^[25]。因此热液活动与否制约着岩体是否能够成矿。

如何有效判别具有成矿生产力(productive)和没有成矿生产力(non productive)的侵入体^[4],仍然是一个尚未解决的具有重要理论和实践意义的研究课题。

3 丰富的挥发组分是成矿作用能否发生的决定性条件

岩浆挥发组分相(MVP—magmatic volatile phases)是指岩浆熔体中的 H_2O 、 CO_2 、Cl、F、B等阴离子元素或化合物。虽然它们在岩浆中的含量不高,但却具有非常重要的作用。成矿元素对于MVP所表现出的强烈的地球化学亲和力,具有极大流动性和浮力的MVP成为金属元素的最佳搬运介质,都使MVP成为金属矿石形成的必备条件^[26]。岩浆分异程度和类型主要受挥发组分相对丰度的控制。 H_2O 、 H_2S 、HF和HCl都经历了与熔体中 O^{2-} 退聚合的水解作用。挥发组分的相对丰度、如何出溶与何时出溶决定了熔体的解聚程度,并最终决定着熔体的组成。元素在固相、熔体相和流体相之间的分配系数持续变化,并最终控制高度演化熔体的组成。

由于丰度差异,元素在天然化学反应中反应物之间的量比不符合化学计量比例。用地球总体估计,阴离子总量不足。因此阳离子与各种阴离子结合形成特征各异的共生组合,反映自然作用体系中元素按与阴离子结合而分类的习性。元素亲合性是在地壳(地球)的元素丰度和物理化学条件下表现出来的。绝大多数成矿元素必须与阴离子结合形成络合物才能迁移与富集。研究金属元素富集成矿的机理,就是研究与金属元素形成络合物配位体的地球化学行为和成矿效应。

岩浆挥发分的研究是认识南岭地区大规模成矿作用的

发生和矿质超常富集的关键。中国东部岩石F含量等值线图显示,赣南、湘南、粤北交界地区F含量很高,可达 1000×10^{-6} ^[27]。南岭地区成矿岩体F、B等挥发分含量较高,各类花岗岩平均F/Cl比值为8.21。斑岩铜矿、斑岩钨矿和铅锌矿床成矿花岗岩 H_2O^+ 高($>1.5\%$)、F低($<0.07\%$),而钼钽矿床、非斑岩型钨矿床、重稀土元素成矿花岗岩相反, H_2O^+ 低($<1\%$)、F高($>0.14\%$)^[28]。超大型矿床富集挥发分F,如柿竹园矿床,3期花岗岩均富F,矿石和蚀变岩也高度富F,平均5wt%,氟储量达 $(5 \sim 10) \times 10^8$ t,刘义茂进一步核实氟储量高达 22×10^8 t^[29],并且氯的含量也很高。白云鄂博超大型稀土元素-铁-钼矿床中,除含有大量金属元素外,F、Cl、P等挥发分也有巨大含量,如萤石储量大于 1×10^8 t,位居世界首位,氯、磷的含量也在千万吨数量级^[30]。

研究表明,埃达克质岩浆之所以与含矿花岗岩有关,除了源区富含成矿元素和上升演化途中加入成矿元素之外,很重要的一个原因就是富含挥发组分。只有当残留固相组合中镁铁质矿物从角闪石向石榴子石大规模转变时期形成的埃达克岩浆才与大规模矿化相联系。据信这段时间形成的岩浆富含水和挥发组分^[31]。Burnham^[32]的研究表明,如果岩浆源区先前熔融过,或者经历了有意义的脱水变质,那么源岩就具有高的F/ H_2O 比值,与来自低F/ H_2O 比值源区的熔体相比更干。具有高F/ H_2O 比值的源区岩石部分熔融形成的岩浆将是贫水的,熔体将在结晶晚阶段演化出蒸气相。流体相较晚出溶将造成许多不相容元素在残余熔体中富集。富F系统就是富含不相容元素的成矿流体,像Climax型钼矿、矽卡岩矿床和与过铝花岗岩伴生的不相容元素(Be、F、W、Sn)矿床等。中国南岭地区的钨、锡矿化花岗岩熔体是富F体系。这种熔体是否贫水很值得进行研究^[33]。与此相对,由消减带蚀变洋壳或脱水消减板片之上的地幔楔熔融形成的岩浆熔体,一般具有低的F/ H_2O 比值和高的Cl/ H_2O 比值,并且相容元素与不相容元素的比值较高。高Cl/ H_2O 比值和熔体中 H_2O 含量(Cl/ H_2O 比值固定时)的增加增大了Cu分配进入流体相的效率。当这种岩浆侵位到地壳较浅部位,如果Cu具有不相容的行为,水含量高使得水较早饱和和出溶,形成高Cu/Mo比值,形成相对贫钼、钨而富铜的斑岩铜矿,这种矿床F含量较低^[22]。这也是埃达克质岩石与斑岩铜矿有关的原因之一。因此挥发组分元素是成矿作用能否发生的决定性条件。

4 岩浆分异作用过程是决定成矿作用发生和矿床类型的一级制约

地球动力学主要受2种对立统一机理的制约:一是分异作用,像岩浆部分熔融、结晶分异、水溶液蒸发、凝聚作用等形成不同相的作用;二是混合作用,如来自各种地质单元(雨水、花岗岩、玄武岩、碳酸盐岩、土壤等)的物质到达海洋形成碎屑岩石的混合作用^[34]。前者是地质作用中的建设过程,结果

造成元素的有序和集中;后者则是一种破坏过程,导致元素的无序和分散。元素的有序和集中实质上就是在地质历史发展进程中,地球和地质体不断分异演化,元素也不断在不同地质体、不同相、不同流体体系等之间发生不均匀分配,最终造成元素在某一相中高度富集而形成矿床。因此元素在不同相之间的分配就成为控制元素在地壳中集中和分散的决定性因素。

在决定成矿类型和矿床规模方面,涉及挥发组分释放的岩浆结晶过程比岩浆岩化学特征更为重要。Shaw等认为无法区分富Sn、W和U的花岗岩,对于每种矿床类型来说,不存在特征“矿床组成”花岗岩,控制成矿作用的主要因素是岩浆侵位的深度,而侵位深度则与挥发组分的释放时间和数量有关,矿化类型和金属富集程度是分异过程和流体释放历史的结果^[9]。英国西南部含Sn、W花岗岩不是S型花岗岩,早期石英-长石-黑钨矿脉被晚期黄玉花岗岩切割并伴生电气石化,所有蚀变和矿化又被晚期锡石-石英脉切割。这表明W与演化不充分的早期流体有关,Sn则与晚期高度演化的花岗岩有关。成W花岗岩是在适中深度通过流体释放冷却而成的,没有经历强烈的分异作用,成Sn花岗岩是其富F含水流体释放和强烈分异作用的产物。证明岩浆分异过程和流体释放历史对于成矿类型具有重要作用。

熔体的最终组成主要受下列因素影响:①液相线和固相线的降低;②挥发组分的分配;③挥发组分的相平衡效应;④元素的晶体/熔体和流体/熔体分配系数。而成矿作用能否发生在更大程度上取决于结晶分异作用过程进行的程度。Barton^[35]对北美西南部花岗岩浆作用和成矿学进行研究,作出侵入体演化Cl、Sr含量与 ε_{Nd} 关系图解。结果表明,结晶分异作用对成矿最为有利,而岩浆演化晚期的同化或混合、流体释放(Cl含量降低)或者分异作用较差(Sr含量没有明显变化)等,都不利于矿化的形成。2个世界级矿床, Sonora的Cananea与花岗闪长岩有关的斑岩铜(钼)矿床和 Zacatecas的San Martin与花岗岩有关的锌(-铜)矽卡岩矿床,都表现出显著的结晶分异作用。而亚利桑那Sierrita斑岩铜(钼)矿床品位很低,岩浆初始组成、形成年龄和岩体规模与2个世界级矿床相似,但却经历了不同的演化途径, ε_{Nd} 值较大的变化范围暗示岩浆演化过程中可能发生过同化或混合。因此来自同一源区具有相似特征的岩浆岩,各自演化过程的差异也会对后期结果产生重要影响。由结晶分异导致的金属和挥发组分富集对金属矿化具有重要贡献,相反,缺乏分异作用,与非富集物质产生混合,以及周期性或灾变性的挥发组分逸出等都不利于金属的富集。有效的结晶分异演化和没有发生挥发组分灾变性逸出是形成具有成矿潜力成矿体系的关键。

研究表明,岩浆中初始挥发组分含量、出溶时间等是制约矿床类型的关键因素。初始熔体中高Cl/H₂O比值有利于与Cl络合的金属如Cu、Mn、Zn、Yb和Ce进入蒸气相。压力为100 MPa(3~4 km深度)时Cu进入蒸气相的程度达到最大,更

高和更低压力下都减小,多数斑岩铜矿都与侵位到3~4 km深度的侵入体共生。斑岩铜矿系统根部花岗岩中流体包裹体研究表明,与侵入体伴生的晚阶段岩浆-热液活动温度为630~670℃,压力为190~250 MPa,侵位深度较大相对高压下岩浆中水未饱和,直到结晶作用晚阶段才达到饱和,导致初始熔体中大部分Cu作为微量成分进入早期结晶硅酸盐和氯化物相,形成分散的没有工业价值的Cu异常。岩浆侵位深度大造成水从岩浆中出溶时几乎没有能量形成裂隙,很难发生对金属富集有重要影响的不混溶作用。这是斑岩铜矿根部花岗岩无矿带产生的根本原因。有利于斑岩铜矿形成的挥发组分的条件是:岩浆具有高的Cl/H₂O比值和熔体中挥发组分较早达到饱和^[36]。

5 聚焦流体流动是热液矿床成矿作用发生的关键环节

成矿作用涉及成矿元素的来源、迁移途径和沉淀场所,即所谓的源-流-汇(source-path-sink),其中聚焦流体流动(focusing fluid flow)是成矿作用能否发生的关键环节,而非聚焦的流体流动只能形成地热体系而不是矿床^[37]。

Cox等^[38]讨论了热液体系中控制渗透率与流体流动的构造作用。热液流经多孔介质的渗透率和流体流动是热液体系发育的主要约束。当可渗透构造足够连通,并形成沟通流体源区与矿石沉淀部位的网络时,才会发育受断裂/剪切带控制的热液体系。渗流理论指出,宏观渗流网络由断层、裂隙和剪切带组成,在颗粒尺度的孔隙网络中,主要有3种类型裂隙要素:主干裂隙(backbone structures)、末梢裂隙(dangling structures)和孤立裂隙(isolated structures)。主干裂隙直接将金属源区与矿石沉淀地连通在一起,并运送了绝大部分流体通量。而末梢裂隙,在体系的上游为主干裂隙补给流体,在体系下游为主干裂隙分流和排泄流体。孤立裂隙既不与主干裂隙相连,也不和末梢裂隙相通,因此根本不与流体储库连通。总地壳应变非常低时,变形域中大部分断层或剪切构造都是孤立的且长度不大。随变形程度加深,活动断层和剪切构造的长度和表面积增大,新的构造也成核生长以使断裂随应变发展连通性增强。当所有孔隙连通性消失(即 $\varphi_{\text{主干裂隙}}=0$, $\varphi_{\text{孤立裂隙}}=1$, φ —孔隙度)、渗透率等于零时,称为渗流阈值(percolation threshold)。当总孔隙度超过渗流阈值,足够多的裂隙连通使流体在整个网络范围内产生时,流体旋即产生流动。流体流动在断裂/剪切构造网络要素之间的分配与主干裂隙、末梢裂隙和孤立裂隙之间的相对比例有关。当体系孔隙度稍大于渗流阈值时,渗流网络中流体可达到的部分流体/岩石比达到最大值,因而也使形成“巨型”矿床的潜力达到最大。与此对比,当应变增强时,主干裂隙逐渐生长,由于更多的断层和剪切构造之间、它们与流体储库之间相互连通,流体逐渐在整个体系裂隙群中平均分布,这种更为分散的流动可能形成潜在的分布面积更大的低品位矿床^[38]。

矿石的沉淀主要受几种作用控制:①流体混合作用;②流体-岩石相互作用;③流体压力突然降低导致的相分离;④大的压力和温度梯度的存在。渗流网络中孤立裂隙流体通量小,因此在热液体系中成矿潜力最小。主干裂隙和末梢裂隙的成矿潜力取决于矿石沉淀反应的性质,以及它们所处的空间位置是在体系的上游还是下游。流体-岩石相互作用的最大潜力在渗流网络的下游,在那里,流体从活动构造中排泄进入周围可渗透的岩石介质中。可以从主干裂隙终端排出,也可以从网络下游末梢裂隙排出,并与围岩发生相互作用。如果从网络排出的深部来源的流体与已经存在的浅部流体储库相互作用,在该位置具有产生流体混合作用的最大潜力。许多斑岩型矿床和浅成热液型矿床可能就是这种情况。

对于矿脉分形和渗透性质的研究表明^[39],连通脉系具有比未连通脉系更低的分形D(维数)值,同时矿化脉系比未矿化脉系具有更小的D值,因此脉系的连通性就是矿化能否形成的关键因素。连通脉系网络的发育造成变形和流体流动集中在某些区域,使得流体可以在更长的距离上运移,裂隙的连通性促进了外来流体的进入并增加了体系中流体的通量。如高品位金石英流体包裹体中含有异常高的N,表明所圈闭的是深部主剪切带内的变质去挥发分流体。研究表明^[40],流体不混溶和Au的沉淀与脉系的发育特别是脉系的连通紧密相关。断层和剪切带对于从深部流体储库中导出流体起着关键的作用,对于W-Sn石英脉的研究表明,一群连通裂隙的发育对于从深部导出连通是有效的关键方式,将流体流动集中于类似于脊柱的主脉(backbone),就为流体提供了必需的水道(channelling)而不致于在流体流动的早期就产生显著的流体-岩石反应,大的裂隙渗透率增加了裂隙密度和裂隙的张开度(aperture),更有利于大面积的弥散性蚀变发育,而使得成矿物质分散而非富集。含锡矿脉的发育要求流体流动必须限定于断裂网络的一定位置,防止流体与围岩相互作用导致Sn在更早时候产生沉淀而分散。以一种有效方式沟通流体储库需要发育断裂连通裂隙群集,而流体在裂隙群集的主干裂隙中集中就提供了必要的流体管道化的条件,以防止在早期发生显著的流体/岩石相互作用^[41]。因此围岩蚀变对于金属的富集并非是有利条件。

6 非线性相互作用、反馈作用和自组织 临界性决定了矿床的成矿效率

发生了成矿作用不等于就能形成大型-超大型矿床,成矿效率是决定能否形成富矿和大矿的关键,非线性相互作用、反馈作用和自组织临界性是决定成矿效率的动力引擎。

研究表明,不同类型浅成矿床的频率和规模遵循幂律分布的规律,大型与一般规模矿床在解剖学上没有特别之处,而反馈过程对于矿床的规模具有重要意义^[42]。一个热液体系

的总渗透率 K_p ,由与活动断层有关的连通断裂阵列所决定。流体通量是断裂密度的幂律函数:

$$q=a(d-d_c)^p \quad (1)$$

式中 q 是平均流体通量, a 是常数, d 是断裂密度, d_c 是渗流阈值, $d>d_c$, p 为指数。该式强调随着裂隙密度-孔隙度超过渗流阈值,流体流动呈指数急剧增加。

Henley等^[43]指出,一个热液体系中金属通量 ΣM_m 可以表示为下列各项的乘积:即热液体系的渗透率 K_p ,通过对流的总热传输,表示为穿过整个体系热梯度的函数 $\Delta\theta$,流体搬运金属的潜力 K_c 。各个因子之间强烈的互相依存使系统呈现出明显的非线性特征。例如,体系的总热流和流体流动与控制体系的连通渗透率(式1)各项有关。而这些因素又取决于容纳体系的地壳体制的应力-应变关系。体系流体搬运金属潜力 K_c (相对饱和程度)由其源区特征、与温度相关的岩石-流体相互作用和岩浆、变质源的贡献所决定,因此是 $\Delta\theta$ 的函数。同样,金属沉淀效率通过流体流动与体系渗透率产生和维持的动力学有关。这些过程之间的耦合引入了在单个体系内部耦合现象之间反馈、放大或阻尼(damping)的可能性——这可能是大型矿床形成的重要前提。这意味着一个特定矿床的规模不是每个控制过程概率的简单乘积,而是一个涉及条件概率(conditional probabilities)的非线性乘积。概率函数的变量和像岩石的能干性(competence)等初始条件的微小差异,都控制了任何特定矿物沉淀体系中反馈的强度,并触发振荡、放大等作用并/或最终达到混沌。矿床从确定性混沌状态中涌现,而反馈机理和初始条件(即蝴蝶效应,butterfly effect)的影响就成为理解单个矿床和相同矿床类型的关键。因此需要探索反馈作用怎样在普通的物理和化学过程之间产生,并最终形成经济上有诱惑力的大型和超大型矿床。

中温脉状金矿经常沿运动学上相关的少部分同活动断层(co-active)或剪切构造群分布,成矿热液体系在接近渗流阈值的裂隙网络中发育最好,表现出“自组织临界性”(self-organized criticality)。在热液体系寿命期内,构造网络在渗流阈值上下发生振荡。流体驱动网络生长也使热液体系在渗流阈值附近产生自组织。这种极端的流体聚焦极有潜力形成大型矿床^[44]。

斑岩铜矿床是发育在中等规模侵入体和围岩中的大吨位矿床,特征是总金属含量巨大,可能比其他类型矿床大几个数量级,但是品位与克拉克值相比并非差距悬殊。初始条件对于网脉和断裂阵列的影响对矿床形成巨大吨位最为关键。矿床的形态和吨位是脆性破裂连续增量的积分,而品位分布则记录了矿物沉淀的效率^[45]。

目前,成矿作用地球化学经过成矿作用动力学已进入成矿作用复杂性的研究前沿。於崇文^[44,45]提出了“成矿动力系统混沌边缘分形生长”的理论命题,将复杂性理论和非线性科学与矿床地质学相结合,建立了一种具有普适性的理论框

架,将常规矿床学研究提高到非线性 and 复杂性科学的层次。非线性和复杂性是在更高水平更深层次上对成矿作用地球化学机理进行的阐释和理解,是对成矿理论的突破,具有重要的前瞻性意义。

综上所述,关于花岗岩与矿床类型之间是否存在相关性,即花岗岩是否具有成矿专属性仍然未能达成一致。花岗岩类具有成矿潜力不等于这些花岗岩最终都能成矿。岩浆分异作用过程和流体释放的时间及其机制可能是决定成矿发生和矿床类型的关键,岩浆熔体中挥发组分及其行为可能是岩浆能否发生成矿作用的决定性条件,聚焦流体流动是成矿作用能否发生的关键环节,而非线性相互作用、反馈作用和自组织临界性决定了矿床的成矿效率和矿床的规模。

参考文献:

- [1]Albarede F. Introduction to geochemical modeling[M]. Cambridge University Press, 1995. 1-543.
- [2]Simkin T, Siebert L. Earth's volcanoes and eruptions: An overview[A]. In: Sigurdsson H, et al eds. Encyclopedia of volcanoes[M]. San Diego: Academic Press, 2000. 249-261.
- [3]Legge P J. Geoscience 1994 and beyond: thoughts on geology and exploration for world-class ore deposits—Presidential address delivered in perth on 26 September[J]. Aus. J. Earth Sci., 1995, 42:1-10.
- [4]Candela P A. Physics of aqueous phase evolution in plutonic environments[J]. Amer. Mineral., 1991, 76: 1081-1091.
- [5]Chappell B W, White A J R. Two contrasting granite types[J]. Pacific Geology, 1974,8:173-174.
- [6]Loiselle M C, Wones D R. Characteristics and origin of an orogenic granites[J]. Geological Society of America Abstracts with Programs, 1979,51:468.
- [7]Pitcher W S. Granite type and tectonic environment[A]. In: Hsu K ed. Mountain building processes[C]. New York: Academic Press, 1983. 19-40.
- [8]Hannah J L, Stein H J. Magmatic and hydrothermal processes in ore-bearing systems[A]. In: Stein H J, Hannah J L eds. Ore-bearing granite systems, petrogenesis and mineralizing processes[C]. Geological Society of America Special Paper,246.1990.1-10.
- [9]Clarke D B. Granitoid rocks[M]. London: Chapman & Hall, 1992. 1-283.
- [10]Shand S J. Eruptive rocks: their genesis, composition, classification, and their relation to ore-deposits(3rd)[M]. New York:J Wiley & Sons,1947.1-488.
- [11]Kemp A I S, Hawkesworth C J. Granitic perspectives on the generation and secular evolution of the continental crust[A]. In: Holland H D, Turekian K K eds. Treatise on geochemistry[C]. Volume 3, The Crust. Edited by Rudnik R L. Amsterdam:Elsevier Pergamon, 2003. 349-410.
- [12]Blevin P L, Chappell B W. The role of magma sources, oxidation states and fractionation in determining the granite metallogeny of eastern Australia [J]. Trans. Royal Soc. Edinburgh: Earth Sci., 1992,83: 305-316.
- [13]Blevin P L, Chappell B W, Allen C M. Intrusive metallogenic provinces in eastern Australia based on granite source and composition[J]. Trans. Royal Soc. Edinburgh: Earth Sci., 1996,87: 281-290.
- [14]罗铭玖,张辅民,董群英,等.中国钼矿床[M].郑州:河南科学技术出版社,1991.452.
- [15]卢欣祥.秦岭造山带花岗岩及其成矿作用[A].见:肖庆辉,邓晋福,马大铨,等著.花岗岩研究思维与方法 [C].北京:地质出版社, 2002.192-214.
- [16]中国有色金属工业总公司江西地质勘查局.江西银山铜铅锌金银矿床[M].北京:地质出版社,1996.1-380.
- [17]曾普胜,莫宜学,喻学惠,等.滇西北中甸斑岩及斑岩铜矿[J].矿床地质,2003,22(4):393-400.
- [18]Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. Nature, 1990,347:662-665.
- [19]张旗,秦克章,王元龙,等.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,2004,20(3):195-204.
- [20]Lehmann B. Metallogeny of tin [M]. Berlin:Springer-Verlag, 1990.1-211.
- [21]Christiansen E H, Struckless J S, Fumkhouser-Marolf M J, et al. Petrogenesis of rare-metal granites from depleted crustal sources: an example from the Cenozoic of western Utah, USA [A]. In: Talor R P, Strong D F eds. Recent advances in the geology of granite-related mineral deposits[C]. Can. Inst. Mining and Metall. Spec., Vol.39, 1988.307-321.
- [22]Candela P A. Magmatic ore-forming fluids: Thermodynamic and mass transfer calculations of metal concentrations [A]. In: Whitney J A, Neldrett A J eds. Ore deposition associated with magmas[C]. Reviews in Economic Geology, 1989. 203-222.
- [23]朱昆林.成矿元素丰度和气-热液蚀变的成矿作用[J].地质与勘探, 1981,(2):12-20.
- [24]Hedenquist J W, Lowenstern J B. The role of magma in the formation of hydrothermal ore deposits[J]. Nature, 1994, 370: 519-527.
- [25]Bodnar R J. Hydrothermal solutions[A]. In: Marshall C P, Fairbridge R W eds. Encyclopedia of geochemistry [C]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999. 333-336.
- [26]Candela P A. A review of shallow, ore-related granites: textures, volatiles, and ore metals[J]. Journal of Petrology, 1997, 38:1619-1633.
- [27]鄯明才,迟清华.中国东部上地壳区域元素丰度研究[M].北京:科学出版社,1997.
- [28]地矿部南岭项目花岗岩专题组.南岭花岗岩地质及其成因和成矿作用[M].北京:地质出版社,1989.345-371.
- [29]裴荣富,吴良士,熊群尧.中国特大型矿床成矿偏在性与异常成矿构造聚敛场[M].北京:地质出版社,1998.1-418.

- [30]中国科学院地球化学研究所.高等地球化学[M].北京:科学出版社,1998.1-15.
- [31]刘红涛,张旗,刘建明,等.埃达克岩与Cu、Au成矿作用:有待深入研究的岩浆成矿关系[J].岩石学报,2004,20(3):205-218.
- [32]Burnham C W, Ohmoto H. Late magmatic and hydrothermal processes in ore formation: studies in geophysics, mineral resources: genetic understanding for practical applications [M]. Washington D C: National Academy Press, 1981.62-72.
- [33]张德会,张文淮,许国建.岩浆热液出溶和演化对斑岩成矿系统金属成矿的制约[J].地学前缘,2001,8(3):193-202.
- [34]Albarede F. Geochemistry:A introduction[M]. Cambridge University Press, 2003. 1-248.
- [35]Barton M D. Granitic magmatism and metallogeny of southwestern North America[J]. Trans. Royal Soc. Edinburgh: Earth Sci., 1996,87: 261-280.
- [36]Candela P A. Theoretical constraints on the chemistry of the magmatic aqueous phase[A]. In: Stein H J, Hannah J L eds. Ore-bearing granite systems, petrogenesis and mineralizing processes[C]. Geol. Soc. Am. Special Paper, 1990, 246:11-19.
- [37]Candela P A. Ores in the earth's crust[A]. In: Holland H D, Turekian K K eds. Treatise on geochemistry[C]. Amsterdam: Elsevier Pergamon, 2003,3:411-432.
- [38]Cox S F, Knackstedt M A, Braun J. Principles of structural control on permeability and fluid flow in hydrothermal systems [A]. In: Richards J P, Tosdal R M eds. Structural controls on ore genesis[C]. Soc. Econ. Geol., Inc. Rev. Econ. Geol., 2001,14:1-24.
- [39]Roberts S, Sanderson D J, Gumiel P. Fractal analysis and percolation properties of veins[A]. In: Mccafferey K J W, Lonergan L, Wilkinson J J eds. Fractures, fluid flow and mineralization[C]. Geological Society, London, Special Publication, 1999, 155:7-16.
- [40]Wilkinson J J, Johnston J D. Pressure fluctuations, phase separation, and gold precipitation during seismic fracture propagation [J]. Geol., 1996, 24:395-398.
- [41]Heinrich C A. Geochemistry evolution and hydrothermal mineral deposition in Sn(-W-base metal) and other granite related ore systems: some conclusions from Australian examples [A]. In: Thompson J F H ed. Magmas, fluids, and ore deposits [C]. Mineralogical Association of Canada Short Course Series, Vol: 23, Mineralogical Association of Canada,1995. 203-220.
- [42]Henley R W, Berger B R. Self-ordering and complexity in epizonal mineral deposits[J]. Annu. Rev. Earth Planet. Sci.,2000, 28:669-719.
- [43]Henley R W, Hoffman C F. Gold: Sources to resources[M]. PACRIM, Aust. Inst. Mining Metall, 1987. 159-167.
- [44]於崇文.成矿动力系统在混沌边缘分形生长——一种新的成矿理论与方法论(上)[J].地学前缘,2001,8(3):9-28.
- [45]於崇文.地质系统的复杂性[M].北京:地质出版社,2004.1-1135.