

岩浆成矿新探索

——小岩体成矿与地质找矿突破

汤中立^{1,2}, 徐刚¹, 王亚磊³, 邱根雷¹, 代俊峰²

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 兰州大学地质科学与矿产资源学院, 甘肃 兰州 730000; 3. 西安地质矿产研究所, 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要:近年来, 地质勘查工作取得的许多突破性进展多与小岩体岩浆矿床密切相关。因此, 小岩体矿床作为主要的勘查研究方向之一已经越来越受到关注。在对“两类岩浆小岩体成大矿”(2006)、“小岩体成大矿的范畴及地质属性”(2008), 以及“小岩体成矿体系”(2011)研究的基础上, 进一步深入阐明小岩体成矿的内涵; 完善了2类岩浆小岩体成矿的主要机制和10种成矿类型(基性-超基性岩深部熔离/结晶-贯入机制与中酸性岩头部气、液、矿质聚集成矿机制); 指出了大型岩体成矿与小岩体成矿的本质区别及斑岩成矿与小岩体成矿的关系; 总结了小岩体成大矿的优越禀赋(小、广、大、高、浅(潜))。同时, 提出了在新一轮岩浆矿床勘查工作中应注意小岩体成大矿的典型特征、找矿方向及重点突破的远景区。

关键词:两类岩浆; 小岩体成矿; 成矿机制; 成矿类型; 找矿突破

中图分类号: P612 **文献标识码:** A

1 引言

世界最大的3个岩浆型镍铜(铂族)矿床分别是加拿大Sudbury矿床、俄罗斯Noril'sk-Talnankh矿床和中国金川矿床。

著名的Sudbury大型层状铜镍矿床(岩盆状, 岩体面积大于1300 km²)发现和勘探的时间最早, 始于1883年, 由于这是世界第一例超大型岩浆侵入体镍铜(铂族)矿床, 因此产生了深远的影响。在20世纪, 研究者都比照这个矿床, 深信只有大岩体、产状平缓的岩体才有利于形成这类矿床(Goldshimit, 1959)。因为“矿质”是从岩浆中分凝出来的, 只有岩浆体积很大才能分凝出巨量的

“矿质”, 这是“矿质”聚集成大矿的前提。然而经过长期的实践之后, 研究者发现: Sudbury矿床其实起源于陨石撞击(Lightfoot et al., 2001), 全世界仅此一例, 按照Sudbury模式进行勘查以寻找大而富的铜镍硫化物矿床会是一种令人误导的模式(Maier et al., 2001)。

Noril'sk-Talnankh矿床是原苏联解体之后才为世人所熟知的与西伯利亚大火成岩省有关的席状侵入体矿床, 它被认为在动力学岩浆管道中有赖于围岩S的同化而成矿(Naldrett, 1999)。它的岩体规模也很小, 其中Noril'sk-1为6 km³, Talnankh为5.4 km³, Kharaelakh为5.6 km³, 均呈岩席状。世界上已确定的大火成岩省有多处, 中国西

收稿日期: 2012-10-15

基金项目: 国土资源部公益性行业基金项目(200911007, 201011058), 深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe-05-01), 中国地质调查局地质大调查项目(1212011085061)和中央高校基本科研业务费专项资金(CHD2011TD007, CHD2011ZY004)联合资助

作者简介: 汤中立(1934-), 男, 中国工程院院士, 博士生导师, 主要从事地质矿产勘查与岩浆矿床研究。E-mail: zltang@sohu.com

南峨眉山玄武岩是世界公认的大火成岩省之一,与其有关的大、中、小型铜镍(铂族)矿床也有产出,皆是“小岩体”镍铜(铂族)矿床。

金川矿床发现于1958年,其主要特征是岩体小,岩体面积为 1.34 km^2 ,延深约 1 km ,楔形变小至尖灭,呈不规则岩墙体,岩体体积小于 1 km^3 ,但是储量规模大(已勘探Ni金属大于 $550\times 10^4\text{ t}$,Cu金属大于 $350\times 10^4\text{ t}$),品位富(Ni品位大于 1% ,Cu品位大于 0.7%),矿化率高(47.8% 的岩体体积由矿体组成)。如此巨大的储量,竟然产生于这样一个小岩体中!金川的实例极大地启示了后来的勘查工作,我国在20世纪后半叶,相继发现并勘查了吉林红旗岭、新疆喀拉通克、黄山,云南白马寨、金宝山、杨柳坪等数十个大、中、小型的镍铜(铂族)矿床,这类矿床无一例外都产出于镁铁-超镁铁质小岩体中。直至现在,我国仍以这类小岩体大矿床的发现为主。

值得注意的是,不仅岩浆型镍铜(铂族)矿床具有小岩体成矿的特性,对于中酸性岩浆矿床,很多世界级的大矿床也都不是产在大岩体中。据现在不完全统计,世界最大的巨型铜、钨、钼、锡矿床都是产于小岩体和与小岩体有关的邻近的围岩中。例如,智利Chuquicamata铜矿床、江西大湖塘钨锡矿床、湖南柿竹园钨矿床、安徽沙坪沟钼矿床等。而且有些矿种如铁、铬、金银、铅锌等都已分别形成了小岩体超大型、大型矿床。例如,湖北大冶铁矿床、云南北衙金矿床、广东大宝山铜铅锌矿床等。其余如钒、钴、铋、铂、钨、钼、铀、镭、钍、钷、锶、钇、铯、碲等也主要以共生或伴生成分赋存于这些巨型、超大型、大型矿床中(王登红等,2012;孟祥金等,2012;毛景文等,1997;谢桂青等,2008;薛传东等,2008;王磊等,2012;姚书振等,2006;李文渊等,2006,2007)。

综上所述,小岩体成大矿不仅有悖于传统的大岩体成矿论,而且已成为这类岩浆矿床理论研究与地质找矿的主要方向。因此,小岩体为什么能成大矿?小岩体的矿床成矿规律以及区域成矿规律等应当是引起人们关注和讨论的重要问题。

2 小岩体成矿体系框架

2.1 小岩体成矿体系的概念

小岩体成矿体系是一种地壳浅成侵入岩浆成矿

体系,其主要内容有:①在规模较小的热侵入岩浆岩体的内部或附近的围岩中形成了与岩浆岩体有关的大型-超大型甚至是巨型矿床。②镁铁质岩浆和中酸性岩浆都能形成小岩体大矿床,其中镁铁质岩浆矿床多由富而大的矿体组成,中酸性岩浆矿床往往由富或贫而大的矿体组成。③岩体的最大变化截面积(或体积)可以大到 n ($n < 10$) km^2/km^3 ,小到 $0.00n\text{ km}^2/\text{km}^3$,一般在 $1\text{ km}^2/\text{km}^3$ 左右或更小。另外,对于镁铁质产状平缓的岩席用体积衡量岩体大小;对于陡立或倾斜的岩墙、岩株等由于深部地质短期难以搞清,暂以截面积衡量岩体大小。④小岩体矿床常常由刚刚出露地表的小岩体矿床或形成于地面以下几十米到几百米甚至几千米的隐伏矿体组成。往往隐伏矿体的品位更高,规模更大。岩体的成矿深度最大可达 $5\sim 9\text{ km}$,一般不超过地表以下 3 km ,在这个范围内是最有利的成矿和储矿空间。⑤岩体的矿化率(矿体体积/岩体体积 $\times 100\%$)高或很高。例如,金川为 47% ,喀拉通克1号岩体为 60% ,红旗岭7号岩体为 96% 等,中酸性小岩体不仅矿化率高,而且往往达到全岩矿化和大于全岩范围的蚀变围岩矿化。⑥镁铁质岩浆的成矿岩浆流体与成矿作用主要系指携带深部熔离硫化物液滴的岩浆或携带深部分离结晶的或熔离钒钛磁铁矿、磁铁矿或铬铁矿的岩浆。它们的成矿作用是指这种成矿岩浆流体脉动式多次上侵入现存空间聚集成岩成矿。一般先上侵的同源、同期的不含矿或含少量矿的岩浆质量要大得多,分布的范围也广得多,形成前导性喷发岩流(西伯利亚暗色岩,峨眉山玄武岩等)或前导性侵入岩体群或侵入岩体(金川矿床外围的茅草泉、塔马子沟、V异常岩体等;喀拉通克矿床附近的4~10号岩体等;红旗岭1、3、7号矿体附近的几十个岩体,加拿大Voisey's Bay矿床外围的Muahuau, Kiglapait等岩体,这些前导性岩流或岩体一般是不含矿或贫矿化的),后来脉动式贯入的同源、同期的岩浆、含矿岩浆、富矿岩浆或矿浆的总体质量较前者要小得多,依次就位于现存较小的空间成矿,形成所谓的“小岩体大矿床”(金川、喀拉通克、红旗岭1、3、7号、Noril'sk-Talnakh、Voisey's Bay镍矿及大庙、磁海、姑山铁矿以及萨兰诺夫铬铁矿的现存矿床等)。特别是富矿岩浆和矿浆多就位于岩体的底部或尾部,体现出尾羽成矿的特征。⑦中酸性岩浆

的成矿流体与成矿作用主要是指深部熔融岩浆底辟上侵过程中聚集起来的岩浆流体, 即通常所说的挥发分(包括气体和液体)。当岩浆从源区底辟上侵, 处于深部高温高压状态下, 挥发分中的气体和液体不可分离, 处于这种状态的挥发分称为超临界流体(罗照华, 2010)。它们可以从岩浆中搜寻并溶解可溶盐类和致矿金属元素, 其溶解度随着温度和压力的升高而增加, 并且以复合氯化物与复合硫化物运输(Yang et al., 2006)。当岩浆侵位到上地壳约5 km时, 达到中性浮力水平, 形成深部岩浆房。这种中性岩浆就地继续演化, 大量富集气泡(挥发分)的岩浆对流向岩浆房头(顶)部集中, 促使这里的岩浆注入浅部超浅部(1.5 km至几百米), 并形成流体的外壳, 去气后高密度携矿岩浆流体下沉, 留下空间由新鲜的、富流体的、低密度岩浆再次注入, 并向外壳释放新的流体和热, 产生K交代。当这些流体冷却时, 不断堆积金属硫化物, 交代后蚀变成绢英岩化和泥岩化。由于热地下水的对流循环使围岩发生青磐岩化, 如此循环直至岩浆固结(Burnham 1979; Shinohara et al., 1995, 1997; Richards, 2003, 2005), 这就是浅成-超浅成小岩体与成矿耦合的过程, 也是斑岩成矿过程。除此之外, 还有一种中深成、深成小岩体(大于1.5~5 km)的成矿作用, 这种成矿小岩体一般不呈斑状结构, 具有高温高压成矿特征。例如, 柿竹园钨-锡-钼-铋矿、个旧锡矿、西华山钨矿等。

2.2 小岩体成矿体系范畴规模

基性小岩体的成矿作用包含小岩体铜镍铂族矿, 钒钛磁铁矿、磁铁矿和铬铁矿; 中酸性小岩体的成矿作用包含斑岩矿床和一些非斑岩矿床, 所有的斑岩矿床都是小岩体矿床, 但是小岩体矿床不都是斑岩矿床, 小岩体矿床还包含一些非斑岩矿床。例如, 高温型的钨锡矿床等。世界最大的一些铜镍铂族矿床(Noril'sk-Talnakh、金川、Pechenga、Voisey's Bay等), 铜矿床(Chuquicamata、El Teniente、驱龙、德兴、玉龙等), 钨锡钼铋矿床(大湖塘、柿竹园等), 钼矿床(曹四夭、岔路口、沙坪沟、金堆城、河南上房沟(钼铁), 南泥湖-三道庄(钼钨))等和一大批超大型-大型的镍铜铂族矿, 钒钛磁铁矿, 磁铁矿, 铬铁矿, 铜、钼、钨、锡、铋、金、铁、铅、锌矿床等都是小岩体矿床。

2.3 两类小岩体的成矿模式

2.3.1 镁铁质-超镁铁质小岩体成大矿的成矿机制与类型

(1) 成矿岩体的原生岩浆。这类岩体的原生岩浆一般被认为是来自地幔的中等深度经中度熔融的拉斑质苦橄岩浆和大深度经高度或中度熔融的科马提岩浆, 地幔浅部-较浅部低度熔融的玄武岩浆和碱性苦橄岩浆并不产生这类矿床(Arndt et al., 2005)。中国这类矿床的原生岩浆多属拉斑质苦橄岩浆, 这是一种中等深度经中度熔融的岩浆。

原生岩浆上侵-结晶, 演化为富橄榄石岩浆(Naldrett, 1999)和富斜方辉石岩浆, 有利于成矿。

(2) 邻近深大断裂。小岩体矿床一般都邻近深大断裂, 这种断裂有时耦合于重要的地壳缝合带。例如, 俄罗斯Noril'sk-Talnakh地区的20多个岩体均沿Noril'sk-Kharaelakh深断裂带分布, 主要集中在分布于Talnakh、Noril'sk矿集区中。这些岩体侵入未变质的泥盆系一下二叠统沉积地层, 厚度0~300 m, 呈长宽比很大的岩席。3个含矿岩席中, Kharaelakh呈三角形, 而Talnakh和Noril'sk岩体则呈宽度小于2 km、长度达15~20 km的“隧道状”岩席。这种产状显示岩浆快速上侵喷出地表的同时, 后继性的含矿岩浆沿深断裂次一级的层状裂隙侵入成岩成矿。

我国的小岩体矿床也表现出这一特征。例如, 金川南侧华北地块与祁连山之间的缝合带, 红旗岭南缘辉发河深断裂带, 喀拉通克北缘额尔齐斯北西向深断裂带, 白马寨北西之哀牢山-红河深断裂带等, 这些深断裂及其次级羽状裂隙为地幔岩浆上升成岩、成矿提供了通道和储矿空间。

深断裂是重大构造岩浆事件的产物, 也是地壳应力长期聚集和突然释放的表现形式之一。由于深断裂的减压作用导致深部岩浆房的不含矿岩浆、贫矿岩浆、富矿岩浆和矿浆脉动式快速上侵, 大量的不含矿岩浆喷出地表或侵入浅部空间, 贫矿岩浆、富矿岩浆和矿浆可能由于相对较重, 沿着深大断裂的次级裂隙侵入到终端岩浆房聚集成岩成矿。

(3) 两种S源。矿床的S源有2类: 一类 $\delta^{34}\text{S}$ 变化很小, 基本上接近于0, 并呈塔式分布, 显示岩浆S为主的特点, 没有迹象表明有较多地壳S的加入。主要矿床如, 金川、黄山、红旗岭、喀拉通

克；另一类 $\delta^{34}\text{S}$ 变化较大，显示出它们成矿多以壳源S为主。例如，力马河、Noril'sk、Voisey's Bay等。

(4) 深部熔离（预富集）-贯入成矿机制。依据上述特征结合小岩体矿床的成矿过程建立了小岩体的成矿模式（图1），这个模式的主要内容包括：由于岩体小，矿体相对大而富，这种矿体不可能从小岩体自身产生出来。因此，来自深部地幔的岩浆多期次涌进地壳的深部岩浆房中，由于物理化学条件的变化发生分离结晶作用，以及可能的（不是必须的）与围岩发生同化混染或有外来S加入，致使岩浆达到S过饱和，发生熔离作用和部分结晶作用，在重力作用参与下，岩浆房中的液体分异成为不含矿岩浆、贫矿岩浆、富矿岩浆和矿浆几部分，然后向现存空间（地表或地壳浅部）一次或多次脉

动式喷发-贯入成岩成矿。通常经过结晶、分异、熔离后的不含矿岩浆的体积比贫矿岩浆、富矿岩浆和矿浆的体积要大得多，在上侵过程中，不含矿岩浆大部分都喷溢出地表或侵入到不同的空间，形成喷发岩流（Noril'sk-Talnakh、白马寨）或侵入岩体群（金川、喀拉通克、红旗岭等），剩余的岩浆、贫矿岩浆、富矿岩浆和矿浆可以多次贯入同一空间成岩成矿（金川、喀拉通克、白马寨、图拉尔根等），也可以分别贯入不同的空间成岩成矿（红旗岭1、3、7号）。相对于就地熔离的“大岩体”矿床而言，这种深部熔离-贯入矿床的岩体体积小得多，含矿率和矿石品位也高得多，所以这种成矿作用导致形成小岩体大矿床。即所谓的“小岩体成大矿”这个模式简要概括为深部熔离（预富集）-分期贯入-终端岩浆房聚集成矿。

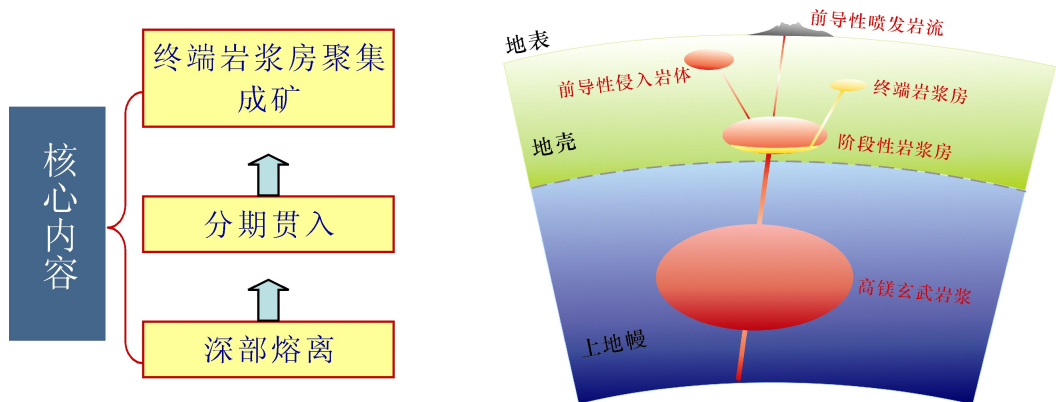


图1 镁铁质-超镁铁质小岩体成矿模式图

Fig.1 The model of small mafic and ultramafic intrusions mineralization

(5) 深部岩浆作用（前导性岩浆、继发性岩浆）。来自深部地幔的岩浆多期次涌进地壳中的深部岩浆房，深部岩浆房的环境是相对长期的、稳定的，只有大的构造岩浆事件（构造运动、深层地震等）促成深部岩浆房中的岩浆脉动式的快速上升。岩浆房上部的不含矿岩浆先期喷出地表或侵入浅部空间，形成矿质亏损的喷发岩流或侵入岩体群。例如，Noril'sk-Talnakh上覆火山岩流中的Nd层（Naldrett et al., 1992），四川杨柳坪地区铂族显著亏损的峨眉山玄武岩中段（Song et al., 2003, 2006），金川外围的茅草泉、塔马子沟、V号异常等岩体，喀拉通克、红旗岭矿集区的那些无矿岩体群等。这部分先侵入的岩浆是大量的、密度较小

的，也是矿质亏损的，统称前导性岩浆。

所谓继发性岩浆是指位于深部岩浆房中下部的不含矿岩浆、含矿岩浆（贫矿岩浆、富矿岩浆和矿浆）。在岩浆快速上升的过程中，继发性岩浆跟随前导性岩浆上侵可以到达同一水平高度。例如，喀拉通克、红旗岭、Pechenga；也可能由于密度不同到达不同水平空间，继发性岩浆由于密度较大，往往侵入于较低水平高度的终端岩浆房成岩成矿。例如，金川、白马寨、金山、Noril'sk-Talnakh。

前导性岩浆一般是大规模的、大质量的；继发性岩浆一般是小质量、小规模。前导性岩浆往往指示了岩浆深部预富集作用的存在；继发性岩浆指示了现存成矿作用的空间。

(6) 成矿类型。①深熔(深部结晶)-单式贯入成矿。继发性岩浆如果分别贯入不同的空间成岩成矿, 其中的富矿岩浆单独贯入一脉型空间成矿, 总体组成含矿率很高(96%)、Ni含量大于1%的大型矿床。例如, 红旗岭7号。②深熔(深部结晶)-脉冲式贯入成矿。继发性岩浆如果依次贯入同一较小的空间成岩成矿, 先贯入的岩浆和含矿岩浆分布于通道的外侧, 后贯入的富矿岩浆或矿浆分布于通道的中下部(或中间), 截面上呈中心式结构, 总体组成含矿率很高(60%)、Ni含量大于1%的大型矿床。例如, 喀拉通克、中型矿床白马寨。③深熔(深部结晶)-复式贯入成矿。继发性岩浆如果依次贯入同一空间成岩成矿, 先贯入的岩浆和含矿岩浆分布于岩体的中上部, 后贯入的富矿岩浆或矿浆分布于岩体的中下部, 总体组成含矿率很高(47%)、Ni含量大于1%的大型、超大型矿床。例如, 金川、大庙铁矿。其继发性岩浆为苏长岩(辉长岩)、含矿苏长岩、富矿苏长岩及矿浆, 并依次贯入成矿。④深部结晶-矿浆贯入成矿。如果继发性岩浆主要为矿浆, 分别依次贯入同一或者不同较小的空间成矿, 并且形成以块状矿石为主要矿石类型的大型矿床。例如, 磁海铁矿、姑山铁矿。

2.3.2 中酸性小岩体成大矿的机制与类型

(1) 成矿小岩体的原生岩浆。产铜矿为主(铜、铜金、铜钼)的斑岩小岩体, 其原生岩浆主要是洋壳或上地幔部分熔融的产物(包括俯冲板片的重熔和大陆上地幔底侵), 但也有部分下地壳混合的证据(芮宗瑶等, 2004; 侯增谦等, 2007)。以产钼为主的小岩体, 其原生岩浆主要来自下地壳(毛景文等, 1997), 多属古板块碰撞造山导致的地壳重熔型花岗质岩浆(陈衍景等, 2000)。近年研究表明, 华南地区以钨锡铋、稀有、稀土为主的小岩体金属矿床, 除壳源为主要成矿物质外, 地幔物质及能量或多或少地参与了成矿作用, 而且壳幔相互作用程度的不同和表壳构造的差异是华南出现不同成矿系列(亚系列)以及成矿系列叠合的重要原因(陈毓川等, 2012)。

(2) 岩浆侵位。从源区产生的岩浆, 由于浮力作用穿过地壳而上侵。但是针对岩浆在地壳中运移方式的争议持续了近2个世纪, 并一直延续至今。今天大多数研究者认为, 在热的韧性下地壳范围内, 岩浆多以底辟方式侵位; 而在相对较冷的中上

地壳, 岩浆则常以裂隙控制的岩墙扩散方式上升为主(Richards, 2003, 2005)。当岩浆达到某一高位, 由于浮力消失而停止, 形成浅成侵入岩浆房。岩浆就地继续演化, 大量富集气泡(挥发分)的岩浆对流向岩浆房头(顶部)部集中, 促使这里的岩浆注入浅部-超浅部(1.5 km至几百米), 并形成流体的外壳, 去气后高密度携矿岩浆流体下沉, 留下空间由新鲜的、富流体的、低密度岩浆再次注入, 并向外壳释放新的流体和热, 产生K交代。当这些流体冷却时, 不断堆积金属硫化物, 交代后蚀变成绢英岩化、泥岩化。由于热地下水的对流循环使围岩发生青磐岩化, 如此循环直至岩浆固结(Burnham, 1979; Shinohara et al., 1995, 1997; Richards, 2003, 2005), 形成浅成-超浅成含矿小侵人体。这种含矿小侵人体体积很小, 截面积也很小, 但是, 随着深度增加, 截面积也逐渐变大。例如, 安徽狮子山燕山早期中浅成的中酸性侵入岩是矿田内岩浆岩的主体, 出露或隐伏于浅部者多呈岩枝、岩脉、岩墙、岩瘤和小岩床产出, 规模很小(0.1~0.25 km²), 中深部(-1 500~-2 500 m)呈近东西向、南北向和北东向小岩株, 深部(大于-2 500 m)则构成一个大岩体(岩基)(唐永成等, 1998)。

自然界中酸性岩浆的侵位, 往往是多期的、脉动的, 先侵位的岩体一般规模相对较大, 后侵位的岩体往往规模较小, 组成复式的斑岩或非斑岩小岩体。

(3) 头部气、液、矿质聚集成矿机制。现存成矿小岩体处于整个岩体的头部(或浅部), 这一部位正是岩浆“气(挥发分)”、“液(流体)”和“矿质”聚集的最有利场所, 也是成矿的中心部位。

岩浆侵位后, 随岩浆结晶, 温度下降, 会依次达到高温气液期(600~420℃), 中温热液期(420~280℃)和中低温热液期(280~120℃)(陈毓川等, 1993), 对于以铜为主或以钼钨为主以及钨锡钼铋为主的矿床, 主要以前两个成矿期为主, 同时向围岩扩散挥发分和矿质热流体, 如果围岩是碳酸盐岩, 即可发生矽卡岩矿化。如果围岩属花岗质岩、细碧岩、凝灰岩和千枚岩等, 则相应发生钾化、硅化、绢云母化、黏土化、角岩化和青磐岩化等, 同时伴以浸染状、细脉浸染状或网脉状、脉状矿化; 对于以金为主的矿床(大水金矿床)主要以

后一成矿期为主,属中低温岩浆热液为主的细粒浸染矿床。

(4) 成矿类型。这里的成矿类型是以小岩体作为主导成矿因素的划分意见而有别于通常划分的矿床类型。共分为以下6类(表1)。

① 前峰式小岩体矿床。实例:西藏甲玛(铜钼)、安徽狮子山(铜金)、甘肃小柳沟(钨钼)。在小岩体侵入的前峰围岩中和小岩体顶部成矿,且以前峰围岩中成矿为主的矿床,围岩中往往形成规模很大的层状、似层状、脉状、网脉状、爆破角砾岩和构造角砾状矿体等,岩体顶部或前部往往形成接触带倒月牙形矽卡岩矿体和岩体内浸染状、细脉状矿体,组成以小岩体上部为中心的三度空间多层分布的矿床,以岩体外前峰式矿体为主。

② 单式斑岩小岩体矿床。实例:安徽沙坪沟(钼)、内蒙古曹四夭(钼钨)、黑龙江岔路口(钼铅锌)、陕西金堆城(钼)、江西德兴铜厂(铜钼)、西藏玉龙(铜钼钨铋)、新疆土屋(铜钼)矿床等。与通常所说的斑岩矿床并无差别,这里强调的是单次侵入的斑岩小岩体矿床。

③ 矽卡岩-斑岩小岩体矿床。实例:河南上房沟(钼铁)、河南南泥湖-三道庄(钼钨)。是指斑岩小岩体的接触带和围岩碳酸盐岩中形成了一个或多个矽卡岩矿体,这些矽卡岩矿体的规模和金属量相当于或大于斑岩矿体。

④ 复式斑岩小岩体矿床。实例:江西大湖塘(钨锡)、西藏驱龙(铜钼)。2次或2次以上侵入形成的复式岩体中(或多次侵入的岩体叠合成矿),至少一期或最晚期侵入的斑岩小岩体与成矿密切相关的矿床。

⑤ 单式非斑岩小岩体矿床。实例:湖南水口山(铅锌)、甘肃大水(金)。单体侵位的非斑岩小岩体的内外成矿,或本身并无矿化的小岩体向围岩扩散挥发分和热流体致使围岩中成矿的矿床。

⑥ 复式非斑岩小岩体矿床。实例:江西西华山(钨)、湖南柿竹园(钨锡钼铋)。

两次或两次以上形成的复式岩体中,每次侵位形成的岩体都与成矿相关,并相互叠加或其中一次岩体成矿,但主要的成矿期次是非斑状结构的岩体。

3 小岩体成矿与大岩体成矿的关系

大岩体成矿最早由 V. M. 戈尔德施密特(1959)依据加拿大 Sudbury 矿床的发现提出。此

类规模巨大,具有层状结构的镁铁质-超镁铁质岩体往往是铂族金属、铬铁矿和钒钛磁铁矿的储库。例如,南非 Bushveld 杂岩体(PGE-Cr-Fe)、Great Dyke 岩墙(PGE-Cr)、加拿大 Sudbury 大型盆状岩体矿床(Ni-Cu-PGE)和美国 Stillwater 岩体(PGE-Cr)等。

而世界上最大的巨型镍、铜、钨、锡、钼、铋、硒、碲、锂、铷、铯、稀土元素、金刚石矿床主要产于小岩体和与小岩体邻近的围岩中,有些矿种如铁、铬、金银、铅锌等都有小岩体超大型、大型矿床实例。尽管铂族元素、Co 在一些大岩体中形成了巨型和超大型矿床,但也有相当高比例的铂族元素、Co 以共生或伴生成分赋存于那些巨型、超大型、大型的小岩体矿床中。在我国,金川矿床是最典型的小岩体矿床代表,红旗岭、金山、白马寨、喀拉通克、黄山、图拉尔根等一系列大中型岩浆硫化物矿床,它们的岩体都很小,多数都在 1 km²左右,甚至更小。

迄今为止,我国还未发现像国外那样规模大于 10² ~ n × 10⁴ km² 的大岩体矿床,仅发现有 n × 10² ~ < 10² km² 大岩体矿床。例如,新疆菁布拉克矿床(铜镍)、攀枝花-白马(钒钛铁),但此类大岩体矿床多以贫矿为主。

以 Bushveld 为典型代表的大岩体成矿机制应属低硫化物岩浆就地分异成矿;而以金川为代表的小岩体成矿机制应属高硫化物岩浆深部预富集贯入成矿。2种成矿机制的主要特征及差异为:“低硫化物岩浆就地分异成矿”机制的主要特征:①“就地分异成矿”是指岩浆上侵到达现存空间之后,由于不同原因,致使岩浆达到 S 饱和或过饱和,而熔离出不混溶硫化物成矿。②不同岩浆的混合、结晶分异作用,壳源成分的混染,外来 S 的加入等都可导致发生 S 饱和或过饱和。在布什维尔德主要是由于不同岩浆的混合作用(Sharpe et al., 1983; Harmer et al., 1985; Barnes et al., 2002)。③熔离出的硫化物一般仅占岩浆体积的 0.5% ~ 3% (Naldrett, 2004),构成岩石中低硫化物浸染结构。④硫化物具有中等的 Ni、Cu 和极高的 PGE 浓度,导致形成低硫化物低 Ni、Cu,高 PGE 矿石矿体。⑤除了层状矿体所具备的上述特征之外,在岩体与围岩白云岩为主的内接触带(Platreef)也发育低硫化物高 PGE 矿体。⑥在岩体的关键带和上带还

表1 小岩体成大矿床实例
Tab. 1 Main cases of small intrusions forming large deposit

编号	国别/省 自治区	矿床名称	成矿小岩体				矿床 规模	成矿类型	成矿元素	围岩	资料来源
			岩体规模 (km ² /km ³)	岩体产状	岩石类型	岩体时代					
1	甘肃	金川	1.34 km ²	岩墙状	二辉橄榄岩-纯橄岩	(1508±31)Ma (831.8±0.6)Ma	巨型	深熔-复式 贯入	Ni, Cu, Co, Pt	大理岩、混合岩 角砾晶屑凝灰 岩岩屑晶屑凝 灰岩	汤中立等, 1992; Zhang et al., 2010 三金柱等, 2010
2	新疆	图拉尔根	0.005 km ²	透镜状	角闪橄榄岩-橄辉石 岩-辉石岩-辉长岩	1号岩体(300.5± 3.2)Ma	大型	深熔-反序 复式贯入	Ni, Cu, Co, Pt		张作衡等, 2005; 韩宝福等, 2004
3	新疆	喀拉通克	0.075 km ²	透镜状	黑云角闪苏长岩、黑云 角闪橄辉苏长岩	(282.5±4.8)Ma (287±5)Ma	大型	深熔-脉冲 式贯入	Ni, Cu, Co, Pt		石贵勇等, 2006
4	云南	白马寨	0.009 km ²	扁柱状	辉长岩、辉石岩、橄辉 岩	(259±18)Ma	中型	深熔-脉冲 式贯入	Ni, Cu, Pt		冯光英等, 2009, 2011; 张广良等, 2005
5	吉林	红旗岭7号	0.02 km ²	脉状	顽火辉石岩	(220.6±2)Ma 1号岩体:(216±5) Ma	大型	深熔-单式 贯入	Ni, Cu, Co, Pt		Kamo et al., 1996
6	俄罗斯	Noril'sk- Talnakh	3~10 km ³	席状	辉长粗玄岩	(251.2±0.3)Ma	巨型	深熔-贯入	Ni, Cu, Co, Pt		Amelin et al., 1999 Lighthfoot et al., 2011
7	加拿大	Voisey's Bay	4.5 km ²	岩墙状	橄长岩	1 334 Ma	巨型	深熔-贯入	Ni, Cu, Co, Pt		Bayanova et al., 1999
8	俄罗斯	Pechenga	6 km ²	透镜状	辉长岩、辉石岩、橄辉 岩	(1.98±0.01)Ga	巨型	深熔-贯入	Ni, Cu, Pt		陶球等, 2008
9	云南	金宝山	1.95~3.17 km ²	岩席	含长辉橄岩、辉长岩、 闪长岩	(260.6±3.5)Ma (260.7±5.6)Ma	大型	深熔-贯入	Pt, Pd		Zhou et al., 2004; 李华芹等, 1998
10	新疆	黄山	3.04 km ²	透镜状	橄辉岩、二辉岩、苏长 岩、辉长苏长岩、辉长 岩	(269±2)Ma (305.4±2.4)Ma	大型	深熔-贯入	Ni, Cu		赵太平等, 2004 Zhang et al., 2007 孙静等, 2009
11	河北	大庙	黑山矿区 1 200 m ×(40~250 m) 680 m×(30~140 m)	层状	斜长岩(85%)、苏长岩 和辉长岩(11%)、纹长 二长岩-石英纹长二长 岩-花岗岩(4%)	苏长岩(1 693±7)Ma 纹长二长岩(1 715± 6)Ma 斜长岩(1 726 ±9)Ma	大型 3 569.2 ×10 ⁴ t	深部结晶- 复式贯入	Fe, Ti, P		

续表 1

编号	国别/省 自治区	矿床名称	成矿小岩体				矿床 规模	成矿类型	成矿元素	围岩	资料来源
			岩体规模 (km ² /km ³)	岩体产状	岩石类型	岩体时代					
12	新疆	磁海	360 m×130 m 70 m×180 m	楔形、尾状矿脉	橄榄辉长岩、橄长岩、辉长岩、辉绿岩、玄武岩	268 Ma (辉绿岩 Rb-Sr)	深部结晶-岩浆贯入	Fe (Co、Ni、Cu)	含矿黑云母辉绿岩、鲕县系的大理岩夹碎屑岩	薛春纪, 2000 左国朝等, 2004 唐萍芝等, 2010	
13	安徽	姑山	1 100 m×880 m ×60.6 m	似穹窿状(或呈八字形)	辉石闪长玢岩	(129.2±1.7)Ma	深部结晶-岩浆贯入	Fe、Ti	高岭土化辉石闪长岩、火山岩、页岩	范裕等, 2010 刘佳林等, 2011	
14	安徽	狮子山	0.1~0.25 km ²	岩枝、岩瘤小岩床	高钾闪长岩类、碱性辉长(闪长)岩类	(135.5±2.2)Ma (139.1±2.3)Ma (140.0±2.6)Ma	前辉式小岩体	Cu、Au、Mo	白云岩、灰岩、泥灰岩、钙质页岩	徐晓春等, 2008	
15	甘肃	小柳沟	≈1.5 km ²	岩株状	二长花岗岩、花岗闪长岩	(462±13)Ma (2σ)	前辉式小岩体	Mo、W	灰岩、砂卡岩、二长花岗岩	Mao, 1999	
16	西藏	甲玛	隐伏	斑岩脉、岩枝	花岗斑岩、二长花岗岩、花岗闪长斑岩	(14.2±0.2)Ma (14.1±0.3)Ma	前辉式小岩体	Cu、Mo	角岩、砂卡岩、大理岩	应丽娟等, 2011	
17	陕西	金堆城	0.067 km ²	不规则岩枝	碱长花岗岩	(140.95±0.45)Ma (143.7±3)Ma	单式斑岩小岩体	Mo	细碧岩、石英岩、碱长花岗岩	朱赖民等, 2008; 焦建刚等, 2010	
18	新疆	土屋	≈0.1 km ²	岩墙状	斜长花岗岩	(333±2)Ma (322.7±2.3)Ma	单式斑岩小岩体	Cu、Mo	玄武岩、凝灰岩	刘德全等, 2003; 芮宗瑶等, 2002a	
19	江西	德兴铜厂	0.7 km ²	三角形岩株	花岗闪长斑岩	(171±3)Ma	单式斑岩小岩体	Cu、Mo	千枚岩、凝灰质千枚岩	王强等, 2004	
20	西藏	玉龙	0.64 km ²	岩株状	花岗斑岩-二长花岗岩	~40Ma (40.9±0.1)Ma	单式斑岩小岩体	Cu、Mo、W、Bi	砂页岩、灰岩	郭利果等, 2006; 马鸿文等, 1990	
21	安徽	沙坪沟	0.89 km ³	椭球体状	花岗岩	(111.5±1.5)Ma (120.7±1.1)Ma	单式斑岩小岩体	Mo	花岗岩、正长岩	张红等, 2011; 孟祥金等, 2012	

续表 1

编号	国别/省 自治区	矿床名称	成矿小岩体				矿床 规模	成矿类型	成矿元素	围岩	资料来源
			岩体规模 (km ² /km ³)	岩体产状	岩石类型	岩体时代					
22	内蒙古	曹四天	0.06 km ² 0.02 km ²	岩株状、岩枝 状	多斑花岗斑岩、少斑花 岗斑岩	131~134 Ma	单式斑岩 小岩体	Mo、W	石榴子石浅粒 岩夹石榴子石 斜长石英岩、砂 线石榴子石 正长片麻岩	李香贤等, 2012; 聂风军等, 2012	
23	黑龙江	岔路口	<4 km ²	岩枝状、岩株 状	石英斑岩、花岗斑岩	(146.96±0.79) Ma	单式斑岩 小岩体	Mo、Pb、 Zn、Ag	流纹质含角砾 凝灰岩熔岩、英 安质角砾凝灰 岩、层状凝灰质 粉砂岩及泥岩	聂风军等, 2011	
24	智利	丘基卡马塔 (Chiquicamata)	4 km ²	楔状	花岗斑岩	(34.8±0.2) Ma	单式斑岩 小岩体	Cu	安山岩、闪长 岩、花岗岩	Reynolds et al., 1998	
25	河南	上房沟	0.05 km ²	不规则岩筒	碱长花岗斑岩	(145.8±2.1)~ (143.8±2.2) Ma	砂卡岩-斑 岩小岩体	Mo、Fe	白云石大理岩、 砂卡岩	燕北海等, 2004	
26	河南	南泥湖-三道庄	0.12 km ²	岩株状	斑状钾长花岗岩	三道庄 (145.4± 2.0)~(144.5± 2.2) Ma 南泥湖 (141.8± 2.1) Ma	砂卡岩-斑 岩小岩体	Mo、W	大理岩、长英角 岩、黑云母长英 角岩、斑状钾长 花岗岩	李永峰等, 2003	
27	智利	埃尔特尼恩特 (El Teniente)	<1 km ²	岩株状	石英闪长岩、英安斑岩	12~7 Ma 矿化蚀变年龄: 5.4 ~4.4 Ma	复式斑岩 小岩体	Cu、Mo	新近纪安山岩、 沉积岩	Maksaeu et al., 2004	
28	印尼	格拉斯伯格 (Grasberg)	600 m×250 m	岩筒状	石英二长斑岩	(3.33±0.12) Ma	复式斑岩 小岩体	Cu、Au	粗面安山岩、凝 灰岩、角砾岩、 碳酸盐岩	Pollard et al., 2005; 卢焕章等, 2000	

续表 1

编号	国别/省 自治区	矿床名称	成矿小岩体				矿床 规模	成矿类型	成矿元素	围岩	资料来源
			岩体规模 (km^2/km^3)	岩体产状	岩石类型	岩体时代					
29	江西	大湖塘	大多长一百—几百米、宽几米—几十米	岩脉状、岩墙状、岩株状	黑云母花岗岩、二云母花岗岩、细粒斑状花岗岩	~134 Ma ~149.9 Ma	巨型 (探明 金属量 106 $\times 10^4\text{t}$ 、 世界最 大钨矿)	复式斑岩 小岩体	W、Sn	中-粗粒斑状黑 云母花岗岩 长 岩,变余云母细 砂岩、千枚状页 岩、板岩;	林黎等,2006; 宜昌所,1982
30	西藏	驱龙	0.15 km^2 0.75 km^2	岩枝状 岩株状	二长花岗岩斑岩	(17.0 \pm 0.2)Ma (17.58 \pm 0.74)Ma	巨型	复式斑岩 小岩体	Cu、Mo	黑云母二长花 岗岩	莫济海等,2006; 王亮亮等,2006
31	甘肃	大水	1.2 km^2	岩株状	辉石闪长岩-花岗岩 斑岩	(202.9 \pm 1.5)Ma (149.5~214.9)Ma	超大型	单式非斑 岩小岩体	Au	白云岩、粉晶灰 岩、泥晶细晶灰 岩	同海卿等,2010; 李红阳等,2007
32	湖南	水口山	大小岩体约 72 个,约 5 km^2	筒柱状、囊 状、扁豆状、 不规则状	花岗岩闪长岩、花岗岩 斑岩、花岗斑岩、英安 玢岩、引爆角砾岩	(163 \pm 2)Ma	大型 (Pb+ Zn $>$ 50 $\times 10^4\text{t}$)	单式非斑 岩小岩体	Pb、Zn、 Au、Ag	浅海相碳酸盐 岩建造夹海陆 交互相含煤砂 页岩建造;陆相 碎屑岩类磨拉 石建造	马丽艳等,2006 喻亨祥等,1997
33	湖南	柿竹园	5.9 km^2 4.1 km^2	岩株状	似斑状黑云母花岗岩、 等粒黑云母花岗岩、花 岗斑岩脉	(151.0 \pm 3.5)Ma 160~151 Ma	超大型	复式非斑 岩小岩体	W、Mo、 Sn、Bi	石灰岩	李红艳等,1996; 毛景文等,1998; 付建明等,2004
34	江西	西华山	6.48 km^2	岩株状、小岩 枝	早期斑状中-细粒黑云 母花岗岩;晚期中-细 粒黑云母花岗岩	早期花岗岩: 155~150 Ma 晚期花岗岩: 142~140 Ma	超大型 22.8 $\times 10^4\text{t}$	复式非斑 岩小岩体	W、Sn、 Mo、Bi	寒武系浅变质 岩	刘家齐,1989 李华芹等,1993

分别产有超大型层状铬铁矿和钒钛磁铁矿 (Naldrett, 2004)。

“高硫化物岩浆深部预富集贯入成矿”机制的主要特征：①“深部预富集贯入成矿”是指岩浆上侵到达现存空间之前，在深部岩浆房中，由于不同原因，致使岩浆达到S饱和或过饱和，而熔离出不混溶硫化物，向底部分异聚集之后，因动力学机制再由上而下分别上侵贯入到现存空间成岩成矿。由于上部的岩浆体积大，且不含矿或含矿少，首先上侵喷出地表或侵入其他空间，下部剩余的含矿多的少部分岩浆脉动式上侵进入现存空间成岩成矿，就构成了“小岩体成大矿” (汤中立, 1996)。②在深部岩浆房中，不同岩浆的混合、结晶分异作用，壳源成分的混染，外来S的加入等都可导致发生S饱和或过饱和。金川岩体主要是由于岩浆的结晶分异作用和少量壳源成分的污染导致了岩浆硫化物的深部熔离。③熔离出的硫化物由上而下可分别占到百分之几、百分之几十和百分之九十以上，分别对应上侵形成的浸染状矿石、网状矿石和块状矿石。④硫化物具有中等Ni、Cu中低PGE浓度，导致形成了高硫化物高Ni、Cu中低PGE矿床。⑤小岩体还有待发现接触带的低硫化物高PGE矿床，以及其他共生矿床。

综上所述，镁铁质大、小岩体成矿机制最本质的差别就是岩浆就(原)地成矿和岩浆深部预富集再上侵成矿。

中酸性大岩体多构成岩基或基底，迄今尚未发现产出重要的金属矿床。

4 中酸性小岩体与斑岩成矿的关系

中酸性小岩体矿床包含了斑岩型小岩体矿床，斑岩型矿床都是小岩体矿床，而小岩体矿床还包含了一部分非斑岩型小岩体矿床。据估计，世界97%的大型、巨型斑岩铜(钼、金)矿床都产出于岩浆弧(包括岛弧、陆缘弧)区(Kerrick et al., 2000)。例如，太平洋西岸的印尼和菲律宾岛弧区产出的斑岩小岩体铜矿、斑岩小岩体铜金矿(印尼的Batu Hijau, 菲律宾的Lepanto-FSE等)；太平洋东岸如美国西南部亚利桑那州和智利中部成矿省的一些斑岩小岩体矿床(Cooke et al., 2005)，产出的主要矿床如智利的丘基卡马塔(Chuquicama-

ta)、特尼恩特(El Teniente)、阿根廷的Bajodela, Alumbara, Marte等。

我国学者(地质勘查者)发现大陆环境特别是陆内环境和大陆碰撞带同样是大型、超大型甚至巨型斑岩小岩体矿床的产出环境。例如，冈底斯-玉龙斑岩小岩体铜矿带产于青藏高原大陆碰撞带环境(芮宗瑶等, 1984; 侯增谦等, 2004; 曲晓明等, 2001; Hou et al., 2003, 2009); 秦岭巨型斑岩小岩体钼矿带产于秦岭大陆碰撞造山带内(黄典豪等, 1994); 德兴特大型斑岩小岩体铜金矿床和长江中下游斑岩小岩体铜铁金矿床产于我国东部燕山期陆内环境(常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992)。

中酸性小岩体成矿需要气、液、矿质和流体上侵的耦合作用，气、液携带矿质可以上侵到小岩体以上和以外更大范围的构造岩或围岩中成矿，形成各种成矿的蚀变岩、角岩、矽卡岩和构造角砾岩等。中酸性小岩体的头部和浅部是有利的成矿场所，越向深部矿化趋向减弱。

4.1 成矿要素

以斑岩型矿床为代表的中酸性小岩体矿床成矿要素主要有：岩体头部成矿(气、液、矿质、流体头部成矿)；头部以上(外)空间蚀变带，爆破角砾岩多期岩(矿)脉等成矿；小岩体头部面型成矿；小岩体外侧金属分带成矿；小岩体本身金属垂直分带成矿。

而对于基性-超基性小岩体矿床，成矿要素与其有明显的差别：小岩体尾羽成矿；前导性岩浆矿质亏损；富橄榄石岩浆有利成矿；深断裂两侧次级裂隙控矿；终端岩浆房多次脉动式贯入聚集成矿。

4.2 成矿机制

在我国斑岩矿床发育地区(成矿带)，由于构造运动时期出现岩石圈不同程度拆沉减薄和底侵作用，岩石圈减薄，使软流圈上涌，地壳和岩石圈地幔被大幅加热(或是克拉通A型俯冲作用)，导致下地壳物质发生部分熔融、壳幔交换，生成岩浆。携带大量成矿物质的中酸性岩浆由于浮力作用或构造底辟作用，沿垂向或斜向上升并强烈演化。当携带大量成矿物质的含矿地幔临界-超临界流体上升侵位至浅部构造薄弱位置时，由于深部和浅部显著的温压差，成矿流体发生沸腾，并与浅部流体交换。岩浆中气体挥发分、流体等携带矿物质优先聚集到小岩体的头部或浅部(成矿的中心部位)，或

是上侵到小岩体以上、以外更大范围的构造岩或围岩中成矿。经过强烈演化的矿化小岩体,经历高温岩浆热液和混合热液流体作用后矿物质进一步的聚集,从而形成一系列斑岩型、非斑岩型小岩体矿床,而大部分岩浆形成不含矿的岩基,常常分布于斑岩、非斑岩矿床的基底或外围地区。

由于每个矿床含矿小岩体侵位的围岩和构造位置、侵位的时限、岩浆中气、液、矿质等的富集程度及其与小岩体上侵的耦合作用等因素的差异,各个矿床具有独特性,但主要的成矿模式和上述模式具有相似性。

5 小岩体成矿禀赋

小岩体成大矿优越的成矿禀赋集中体现在“小、广、大、高、浅(潜)”的五字特征上。五字特征中的首要特征是“小”。五字特征的综合表述为:与“小岩体”有关的,成矿背景广泛的,集“大”矿、“高矿化率”矿于一身的,“浅成”(含“潜伏”)矿床。

“小”是指在规模较小的热侵入岩浆岩体的内部或附近的围岩中形成了与小岩体有关的大型、超大型甚至巨型矿床。按照质量平衡原理,小岩体本身产生不了这种规模很大的矿床,现实中小岩体之所以形成了与其有关的大矿,主要原因就是小岩体在侵入现存空间之前,经历了深部预富集成矿作用。对于镁铁质岩浆是指硫化物矿的深部熔离作用或氧化物矿的深部结晶作用,由于大量同源前导性非矿岩浆的前侵分离,喷出地表或侵入其他空间,致使质量相对较小的继发性含矿岩浆、富矿岩浆甚至矿浆得以一次或多次集中或分别贯入现存空间聚集成矿,这样就形成了小岩体大矿床。这种矿床一般都赋存于岩体内部,有的矿床虽然发育接触交代热液矿体,但是,仅占次要地位。这种机制为在前导性岩浆体分布区和与它们相邻的下伏层位分布区寻找小岩体大矿床提供了方向;对于中酸性岩浆是指当岩浆侵位到上地壳约5 km时,达到中性浮力水平,形成深部岩浆房,在岩浆房中,大量富集气泡(挥发分)的岩浆对流向岩浆房头(顶)部集中,促使这里的岩浆注入浅部-超浅部(3 km以上至几百米),并形成流体的外壳,去气后,高密度携矿岩浆流体下沉,残留空间由新鲜的、富流体

的、低密度岩浆再次注入,并向外壳释放新的流体和热,当这些流体冷却时,不断堆积金属矿物质,如此循环直至岩浆固结。这种机制表明,主矿体主要分布于小岩体头部,首先要全力找到并控制这部分主矿体,然后向外向下逐步勘查清楚。

“广”是指分布广泛。一般来说,凡是岩浆岩发育的地区,都有可能发育小岩体大矿床。但是从“就矿找矿”的角度,还是要首先关注那些已有矿床实例的成矿构造区带。由表1实例可以看出,小岩体矿床主要发育在大陆边缘裂解及其外侧的造山带内,大陆内部活化背景区及大火成岩省发育区这四类区域。其分布十分广泛。在这些分布区中,有的已经发现了重要的小岩体大矿床,说明它们成矿条件优越,找矿潜力巨大,需要继续深入研究,攻“深”找“盲”,扩大资源远景,发现新矿床。还有相当未发现重要小岩体矿床的区域,更应该加强部署,争取重大突破。仅就西北地区来说。例如,华北板块北部边缘、西部边缘、南部边缘及其外侧的北山地区、祁连造山带、秦岭造山带;阿尔泰造山带南缘;天山造山带;塔里木板块东北缘;柴达木地块边缘;祁漫塔格昆仑造山带等都是小岩体成矿重要远景区,应当给予高度关注。

“大”是指主成矿元素的储量/资源量大。一般能达到大型、超大型(大型矿床5倍)乃至巨型矿床(超大型矿床4倍)。例如,铜矿大型 50×10^4 t,超大型 250×10^4 t,巨型 $1\,000 \times 10^4$ t;镍矿大型 10×10^4 t,超大型 50×10^4 t,巨型 200×10^4 t;金矿大型20 t,超大型100 t,巨型400 t等。其他矿种矿床以此类推。

“高”是指岩体高矿化率(矿体面积(体积)/岩体面积(体积) $\times 100\%$)。例如,金川大于47%;喀拉通克大于60%;红旗岭7号岩体大于90%;金堆城 $\geq 100\%$ 等。所以一个小岩体矿床,往往达到一半甚至全岩以上的矿化。

“浅(潜)”是指赋矿部位浅成、中浅成,常常隐伏于地下较浅的地方。这是因为岩浆上侵的浮力中性区或岩浆房发育约在5 km深度左右,在这个深度发生“预富集”作用再上侵形成小岩体大矿床就必然达到地表或浅部的现存空间。特别是那些未出露地表的隐伏矿床往往规模更大、品位更高,应当引起重视。

6 找矿突破

在我国镁铁质大岩体不甚发育, 中酸性大岩体尚未发现有利成矿。因此, 小岩体成矿作用应当是今后岩浆矿床勘查研究的主要方向。

对于镁铁质小岩体, 注重前导性岩浆及其异常的找矿指引作用。例如, 大火成岩省深断裂发育区两侧次级断裂区控岩控矿; 前导性小岩体(群) 同层位或下伏层位深断裂发育区控矿; 此类成岩成矿区所具有的地球物理、地球化学异常分布区。重视富橄榄石、斜方辉石岩浆成矿; 重视镁铁质小岩体尾羽成矿特征, 其包含底部成矿、通道尾部成矿和构造裂隙薄弱带矿浆贯入成矿等。

同时对那些中等规模的镁铁质岩体, 有可能形成重要的钒钛铁矿, 铂族矿以及铬铁矿等这一方向也应予以足够重视。

对于中酸性小岩体矿床, 无论斑岩小岩体还是非斑岩小岩体, 今后都应注重小岩体成矿的典型特征, 即头部和浅部是成矿的最有利场所。主矿体主要产于小岩体本身; 在小岩体以上和以外更大范围的构造岩或围岩中成矿; 含矿小岩体的侧向和垂向金属分带; 岩体头部以上空间蚀变带, 爆破角砾岩/岩脉等多期成矿标志。而对于矿化小斑岩体同源同成因的岩基附近的其他的小侵入体, 也应是重要的找矿方向。另外, 近年来, 一系列隐伏的大型、超大型、巨型小岩体矿床的发现, 小岩体型潜伏矿应是今后寻找大矿、富矿的重要方向。表1中的图拉尔根、Voisey's Bay、甲玛、驱龙、沙坪沟、曹四夭和岔路口等都是最近十余年来新发现的大型、超大型、巨型矿床, 说明小岩体大矿床仍然具有很大的远景, 加强对“小岩体成矿”的深入研究与勘查十分必要, 尤其要把这项研究与实际勘查紧密结合起来, 是发现新的超大型、大型矿床的重要途径。

成矿背景方面, 对于基性岩小岩体矿床, 应注重在已发现众多小岩体矿床区带上, 就矿找矿。重点区域应包括在大陆边缘裂解背景, 造山带后碰撞伸展背景, 以及二叠纪大火成岩省背景三种构造环境区域的小侵入体; 对于中酸性岩浆热液小岩体矿床应主要围绕祁连-秦岭北缘-大别北缘成矿带、长江中下游成矿带、青藏高原冈底斯成矿带、玉龙成

矿带, 以及华南成矿区的典型中酸性小岩体矿床开展工作和研究。针对我国西北地区, 塔里木板块东北缘、华北克拉通西北缘以及柴达木南北缘是今后小岩体矿床找矿突破的重要远景区。

小岩体成矿作用在我国还有新的开发空间。例如, 小岩体铬铁矿(乌拉尔萨兰诺夫铬铁矿床, 储量大于 1×10^8 t)、小岩体铀矿床、小岩体金刚石矿床等。

参考文献 (References):

- Goldshimit V M 著, 沈永直, 郑康乐译. 地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1959.
- Goldshimit V M, translated by Shen Y Z, Zheng K L. Geochemistry [M]. Science Press, Beijing, 1959.
- 王登红, 陈郑辉, 黄国成, 等. 华南“南钨北扩”、“东钨西扩”及其找矿方向探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36 (3): 322-329.
- Wang Denghong, Chen Zhenghui, Huang Guocheng, et al. Northwards and Westwards prospecting for Tungsten and its significance in south China [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2012, 36 (3): 322-329.
- 孟祥金, 徐文艺, 吕庆田, 等. 安徽沙坪沟斑岩钨矿锆石 U-Pb 和辉钨矿 Re-Os 年龄[J]. 地质学报, 2012, 86 (3): 486-494.
- Meng Xiangjin, Xu Wenyi, Lü Qingtian, et al. Zircon U-Pb dating of ore-bearing rocks and molybdenite Re-Os age in Shapinggou porphyry molybdenum deposit, Anhui province [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86 (3): 486-494.
- 毛景文. 超大型钨多金属矿床成矿特殊性——以湖南柿竹园矿床为例[J]. 地质科学, 1997, 32 (3): 351-363.
- Mao Jingwen. Metallogenic speciality of super giant poly-metallic tungsten deposit: taking the Shizhuyuan deposit as an example [J]. Scientia Geologica Sinica, 1997, 32 (3): 351-363.
- 谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 等. 鄂东南地区大型夕卡岩型铁矿床金云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素年龄及其构造背景初探[J]. 岩石学报, 2008, 24 (8): 1917-1927.
- Xie Guiqing, Mao Jingwen, Li Ruiling, et al. ^{40}Ar - ^{39}Ar phlogopite dating of large skarn Fe deposits and tectonic framework in southeastern Hubei Province, Middle-Lower Reaches of the Yangtze River, eastern China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24 (8): 1917-1927.
- 薛传东, 侯增谦, 刘星, 等. 滇西北北衙金多金属矿田的成

- 岩成矿作用:对印-亚碰撞造山过程的响应[J]. 岩石学报, 2008, 24 (3): 457-472.
- Xue Chuandong, Hou Zengqian, Liuxing, et al. Petrogenesis and metallogenesis of the Beiya gold-polymetallic ore district, northwestern Yunnan province, China: Responses to the Indo-Asian collisional processes [J]. Acta Petrologica Sinica, 24 (3): 457-472.
- 王磊, 胡明安, 屈文俊, 等. 粤北大宝山多金属矿床 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义 [J]. 中国地质, 2012, 39 (1): 29-42.
- Wang Lei, Hu Ming'an, Qu Wenjun, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb and molybdenite Re-Os dating of the Dabaoshan polymetallic deposit in northern Guangdong Province and its geological implications [J]. Geology in China, 2012, 39 (1): 29-42.
- 姚书振, 周宗桂, 吕新彪, 等. 秦岭成矿带成矿特征和找矿方向 [J]. 西北地质, 2006, 39 (2): 156-178.
- Yao Shuzhen, Zhou Zonggui, Lü Xinbiao, et al. Mineralization characteristics and prospecting potential in the Qinling metallogenic belt [J]. Northwestern Geology, 2006, 39 (2): 156-178.
- 李文渊, 董福辰, 姜寒冰, 等. 西北地区重要金属矿产成矿特征及其找矿潜力 [J]. 西北地质, 2006, 39 (2): 1-16.
- Li Wenyuan; Dong Fuchen; Jjiang Hanbing, et al. Metallogenic Characteristics and Prospecting Potential of Major Metallic Minerals in Northwest China [J]. Northwestern Geology, 2006, 39 (2): 1-16.
- 李文渊. 岩浆 Cu-Ni-PGE 矿床研究现状及发展趋势 [J]. 西北地质, 2007, 40 (2): 1-28.
- Li Wenyuan. The Current Status and Prospect on Magmatic Ni-Cu-PGE Deposits [J]. Northwestern Geology, 2007, 40 (2): 1-28.
- 罗照华, 卢欣祥, 许俊玉, 等. 成矿侵入体的岩石学标志 [J]. 岩石学报, 2010, 26 (8): 2247-2254.
- Luo Zhaohua, Lu Xinxiang, Xu Junyu, et al. Petrographic indicators of the ore-bearing intrusions [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26 (8): 2247-2254.
- 芮宗瑶, 张立生, 陈振宇, 等. 斑岩铜矿的源岩或源区探讨 [J]. 岩石学报, 2004, 20 (2): 229-238.
- Rui Zongyao, Zhang Lisheng, Chen Zhenyu, et al. Approach on source rock or source region of porphyry copper deposits [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20 (2): 229-238.
- 侯增谦, 潘小菲, 杨志明, 等. 初论大陆环境斑岩铜矿 [J]. 现代地质, 2007, 21 (2): 332-351.
- Hou Zengqian, Pan Xiaofei, Yang Zhiming, et al. Porphyry Cu- (Mo-Au) Deposits no Related to Oceanic-Slab Subduction; Examples from Chinese Porphyry Deposits in Continental Settings [J]. Geoscience, 2007, 21 (2): 332-351.
- 陈衍景, 李超, 张静, 等. 秦岭钼矿带斑岩体锶氧同位素特征与岩石成因机制和类型 [J]. 中国科学 (D 辑), 2000, 30 (增刊): 64-72.
- Chen Yanjing, Li Chao, Zhang Jing, et al. Strontium, Oxygen isotope characteristics and genetic mechanism, types of porphyries in the Qinling molybdenum ore belt [J]. Science in China (Series D), 2000, 30 (Supplement): 64-72.
- 陈毓川, 王登红. 华南地区中生代岩浆成矿作用的四大问题 [J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36 (3): 315-321.
- Chen Yuchuan, Wang Denghong. Four main topics concerning the metallogeny related to Mesozoic magmatism in South China [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2012, 36 (3): 315-321.
- 唐永成, 吴言昌, 储国正, 等. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质 [M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- Tang Yongcheng, Wu Yanchang, Chu Guozheng, et al. Geology of copper-gold polymetallic deposits along the Yangtze River, Anhui province [M]. Geological Publishing House, Beijing, 1998.
- 陈毓川, 朱裕生. 中国矿床成矿模式 [M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- Chen Yuchuan, Zhu Yusheng. Metallogenic Models for ore deposits in China [M]. Geological Publishing House, Beijing, 1993.
- 汤中立. 中国岩浆硫化物矿床的主要成矿机制 [J]. 地质学报, 1996, 70 (3): 237-243.
- Tang Zhongli. The main mineralization mechanism of magma sulfide deposits in china [J]. Acta Geologica Sinica, 1996, 70 (3): 237-243.
- 芮宗瑶. 西藏斑岩铜矿和铬铁矿矿床 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 1985, 2: 61-63.
- Rui Zongyao. The porphyry copper and chromite deposits in Tibet [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1985, 2: 61-63.
- 曲晓明, 侯增谦, 黄卫. 冈底斯斑岩铜矿 (化) 带: 西藏第二条“玉龙”铜矿带? [J]. 矿床地质, 2001, 20 (4): 355-366.
- Qu Xiaoming, Hou Zengqian, Huang Wei. Is gangdese porphyry copper belt the second/“Yulong” copper belt? [J]. Mineral Deposits, 2001, 20 (4): 355-366.

- 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 等. 东秦岭地区钼矿床的铼-钼同位素年龄及其意义[J]. 矿床地质, 1994, 13 (3): 221-230.
- Huang Dianhao, Wu Chengyu, Du Andao, et al. Re-Os isotope ages of molybdenum deposits in East Qinling and their significance [J]. Mineral Deposits, 1994, 13 (3): 221-230.
- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 长江中下游铜铁成矿带[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- Chang Yinfo, Liu Xiangpei, Wu Yanchang. The Copper-Iron Belt of the lower and middle reaches of the Changjiang River [M]. Geological Publishing House, Beijing, 1991.
- 翟裕生, 姚淑晨, 林新多, 等. 长江中下游地区铁、铜等成矿规律研究[J]. 矿床地质, 1992, 11 (1): 1-12.
- Zhai Yusheng, Yao Shuchen, Lin Xinduo, et al. Metallogenic regularity of iron and copper deposits in the middle and lower valley of the Yangtze river [J]. Mineral Deposits, 1992, 11 (1): 1-12.
- Lightfoot P C, Keays R R, Doherty W. Chemical evolution and origin of Ni sulfide mineralization in the Sudbury Igneous Complex, Ontario, Canada [J]. Economic Geology, 2001, 96: 1855 - 1876.
- Maier W D, De Waal. Why are there no major Ni-Cu sulfide deposits in large layered mafic-ultramafic intrusion [J]. The Canadian Mineralogist, 2001, 39: 547-556.
- Naldrett A J. World class Ni-Cu-PGE deposits: key factors in their genesis [J]. Mineralium Deposita, 1999, 34 (3): 227-240.
- Yang K H and Scott S D. Magmatic fluids as a source of metals in seafloor hydrothermal systems [J]. Geophysical Monograph Series, 2006, 166: 163-184.
- Burnham C W. Magmas and hydrothermal fluids. In Barnes H L (ed.) Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits [M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1979.
- Shinohara H, Kazahaya K and Lowenstern J B. Volatile transport in a convecting magma column: Implication for porphyry Mo mineralization [J]. Geology, 1995, 23: 1091-1094.
- Shinohara H, Hedenquist J W. Constraints on magma degassing beneath the Far Southeast porphyry Cu-Au deposit, Philippines [J]. Journal of Petrology, 1997, 38: 1741-1752.
- Richards J P. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation [J]. Economic Geology, 2003, 98: 1515-1533.
- Richards J P. Cumulative factors in the generation of giant calc-alkaline porphyry Cu deposits [A]. In: Porter T M, ed. Super-porphyry copper & gold deposits: A global perspective [C]. PGC Publishing, Adelaide, 2005, 7-25.
- Arndt NT, Lesher C, Czamanske G. Mantle-derived magmas and magmatic Ni-Cu- (PGE) deposits [J]. Economic Geology 100th Anniversary Volume, 2005, 34: 5-23.
- Naldrett A J, Lightfoot P C, Fedorenko V A, et al. Geology and geochemistry of intrusions and flood basalts of the Noril'sk region, USSR, with implication for the origin of the Ni-Cu-PGE ores [J]. Economic Geology, 1992, 87 (4): 975 - 1004.
- Song X Y, Zhou M F, Cao Z M, et al. Ni-Cu- (PGE) magmatic sulfide deposits in the Yangliuping area, Permian Emeishan Igneous province, SW China [J]. Mineralium Deposita, 2003, 38 (7): 831-843.
- Song X Y, Zhou M F, Wang Y, et al. Role of crustal contamination in the formation of the Jinchuan Ni-Cu-PGE deposit, NW China [J]. International Geological Review, 2006, 38: 1113-1132.
- Sharpe M R, Irvine T N. Melting relations of two Bushveld chilled margin rocks and implications for the origin of chromitite [J]. Carnegie Inst of Washington Year Book, 1983, 82: 295-300.
- Harmer R E, Sharpe M R. Field relations and Sr isotope systematics of the marginal rocks of the eastern Bushveld Complex [J]. Economic Geology, 1985, 80: 813-837.
- Barnes S-J, Maier W D. Platinum-Group Element Distributions in the Rustenberg Layered Suite of the Bushveld Complex South Africa [A]. In the Geology Geochemistry Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements [C]. Ottawa Ontario: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum 2002, 54: 431-458.
- Naldrett A J. Magmatic sulfide Deposits [M]. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2004.
- Kerrich R, Richard G, Groves D. The characteristics, origins, and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2000, 43 (Supplement 1): 1-68.
- Cooke D R, Hollings P, Walshe J L. Giant porphyry deposits: Characteristics, distribution, and tectonic controls [J]. Economic Geology, 100: 801-818.
- Hou Z Q, Ma H W, Zaw K, et al. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: Product of large-scale strike-slip

faulting in Eastern Tibet [J]. *Economic Geology*, 2003, 98: 125-145.

Hou Z Q, Yang Z M, Qu X M, et al. The Miocene Gang-

dese porphyry Cu belt: Generated during post-collisional extension in the Tibetan orogen [J]. *Ore Geology Reviews*, 2009, 36: 25-51.

The New Exploration of Magmatic Mineralization: Small Intrusion Mineralization and Geological Prospecting Breakthrough

TANG Zhong-li^{1,2}, XU Gang¹, WANG Ya-lei³,
QIU Gen-lei¹, DAI Jun-feng²

(1. *College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China;*

2. *School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;* 3. *Key laboratory for the study of Focused Magmatism and Giant ore Deposits, MLR, Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, China*)

Abstract: Many geological exploration breakthrough are more closely related to the small intrusions deposits in recent years. The small intrusions deposit that is one of the major exploration research directions has received increasing attention. The author clarified the connotation of small intrusions mineralization, improved the main mechanism (the deep segregation/crystallization-penetration mechanism of mafic-ultramafic magma and the gas, liquid, mineral aggregate in the head of acidic magma mineralization mechanism) of the two types of magma of small intrusion mineralization and ten mineralization types. The author also pointed out the essential differences between the large-scale intrusions mineralization and small intrusions mineralization, and the relationship between the porphyry and small intrusions mineralization, and summarized the superior characteristics (Small, Broad, Large-scale, High, Shallow/Latent) of small intrusions mineralization. All of the above work on the basis of study about the small intrusions mineralization of the two types of magma (2006), The scope and geological attributes of small intrusions mineralization (2008) and The small intrusions mineralization system (2011). In addition, we should pay more attention to the typical characteristics, prospecting direction and the important prospecting areas of small intrusions mineralization in the new round of magmatic deposits exploration work in the future.

Key words: Two types of magma; small intrusions mineralization; metallogenic mechanism; metallogenic types; prospecting breakthrough