

小岩体成(大)矿理论体系

汤中立, 焦建刚, 闫海卿, 徐 刚

(长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054)

[摘要] 小岩体成(大)矿思想于1979年从大量找矿实践中提出,经历了长期的理论研究和指导找矿实践,新发现了一批大型-超大型矿床,由此获得了越来越多的学者接受。本文通过总结小岩体成(大)矿的概念、内涵、范畴,提出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。将小岩体成(大)矿思想提升到小岩体成(大)矿的理论。通过大量的矿床成因研究后,提出了两类小岩体成(大)矿的成矿模式、成矿机制、成矿类型,其中镁铁质岩浆成矿表现为深部熔离(预富集)-脉动式贯入-终端岩浆房(尾部)聚集成矿,中酸性岩浆成矿表现为岩体头部成矿(气、液、矿质,流体头部成矿)与岩体前峰及外侧空间成矿。

[关键词] 小岩体成大矿;内涵;范畴;禀赋;成矿模式

[中图分类号] P612 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2015)02-0004-15

1 前言

20世纪人们崇尚的“基性大岩体中才能形成大矿床”传统理论指导了找矿勘查活动,20世纪后半叶,中国、俄罗斯、加拿大等地质勘查实践逐渐发现了一批大型、超大型矿床产于小岩体中。我国迄今并未发现像国外产出的那类“大岩体大矿床”,而在一些规模较小或很小的岩体中却发现了巨型、超大型或大型矿床。由此提出了“小岩体成大矿”概念,而且是幔源和壳源两类岩浆的“小岩体成大矿”^[1-3]。“小岩体成(大)矿”是指在地壳浅部、超浅部的规模相对较小的侵入体内部和/或附近的围岩中,形成了与小岩体有关的大型、超大型甚至世界级矿床。这种现实并非意味着巨量矿质主要来自小岩体自身,而是指深部熔融形成的含矿岩浆经历了复杂的上侵、演化与就位的过程,致使巨量矿质聚集或耦合到包含小岩体在内的现存空间的一种成矿作用。

2 小岩体成(大)矿理论内涵

小岩体成(大)矿体系是一种地壳浅成侵入岩浆成矿体系,其主要内容如下。

1)在规模较小的热侵入岩浆岩体的内部和/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 $n(n<10)\text{km}^2/\text{km}^3$,小到 $0.00n\text{km}^2/\text{km}^3$,一般会在 $1\text{km}^2/\text{km}^3$ 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

[收稿日期] 2014-12-03

[基金项目] 中国工程院咨询项目(2013-04-XY-001)

[作者简介] 汤中立,男,1934年出生,安徽安庆市人,中国工程院院士,主要从事矿产勘查与矿床学研究;E-mail:zytangzl@chd.edu.cn

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5~9 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,如金川47%,喀拉通克1号岩体60%,红旗岭7号岩体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)镁铁质岩浆的成矿作用:主要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V-Ti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贯入现存空间聚集成岩成矿。一般来说,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(如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”(如金川、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^[4]。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^[5]。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)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,产生钾交代。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盘岩化,如此循环直至岩浆固结^[6~8],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,还有一种中深成式-深成小岩体(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,如柿竹园钨-锡-钼-铋矿、个旧锡矿、西华山钨矿等。

3 小岩体成(大)矿的范畴与禀赋

基性小岩体的成矿作用包含小岩体Ni-Cu-PGE矿,V-Ti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,比如高温型的钨锡矿床等。世界最大的一些Ni-Cu-PGE矿床(如Noril'sk-Talnakh、金川、Bechenga、Voisey's Bay等),Cu矿床(如Chuquicamata、El Teniente、驱龙、德兴、玉龙等),W-Sn-Mo-Bi矿床(如大湖塘、柿竹园等),Mo矿床(如曹四夭、岔路口、沙坪沟、金堆城、河南上房沟(Mo-Fe)、南泥湖-三道庄(Mo-W))等都与小岩体关系密切(见表1)。

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和/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。

表1 小岩体成大矿床实例

Table 1 Example of small intrusions forming large deposits

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)	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 角闪橄 榄岩	1 508±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	[9, 10]
2	新疆	图拉 尔根	0.005 km ²	透镜状	角闪橄 榄岩-橄 榄辉 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	角砾晶屑凝 灰岩岩屑晶 屑凝灰岩	[11]
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 榄苏 长岩	282.5±4.8 Ma 287±5 Ma	大型	深熔- 脉冲式 贯入	Ni、Cu、 Co、Pt	砾岩、粉砂 岩、板岩、 硅质岩	[12]
4	云南	白马寨	0.009 km ²	扁柱状	辉长岩、辉 石岩、橄 榄岩	259±18 Ma	中型	深熔- 脉冲式 贯入	Ni、Cu、 Pt	板岩、变质 砂岩	[13]
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	黑云片麻 岩、花岗片 麻岩、角闪 岩、大理岩	[14]
6	俄罗斯	Noril'sk- Talnakh	3~6 km ³	席状	辉长粗玄岩	251.2±0.3 Ma	巨型	深熔- 贯入	Ni、Cu、 Co、Pt	煤系。蒸发 岩系	[15]
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	Tasiuyak 副 片麻岩和紫 苏花岗闪长 质片麻岩	[16]
8	俄罗斯	Pechenga	6 km ²	透镜状	辉长岩、辉 石岩、橄 榄岩 含长辉 橄岩、	1.98±0.01 Ga	巨型	深熔- 贯入	Ni、Cu、 Pt	凝灰质 沉积岩	[17]
9	云南	金宝山	1.95~ 3.17 km ²	岩席	橄岩、 辉长岩、闪 长岩 橄榄岩、二 辉岩、苏 长岩、	260.6±3.5 Ma 260.7±5.6 Ma	大型	深熔- 贯入	Pt、Pd	白云岩	[18]
10	新疆	黄山	3.04 km ²	透镜状	橄榄岩、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	黑云母片 岩、变粒岩、 斜长角闪 岩、绿泥石 英片岩	[19]

续表

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
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%) 橄榄辉长 岩、橄长岩、 辉长岩、辉 绿岩、玄 武岩	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 万吨	深部结 晶-复式 贯入	Fe、Ti、 P	斜长岩、 不含矿苏 长岩	[20]
12	新疆	磁海	360 m× 130 m 70 m× 180 m	楔形、 尾状 矿脉	橄辉长 岩、橄长岩、 辉长岩、辉 绿岩、玄 武岩	268 Ma (辉绿 岩 Rb-Sr)	中型	深部结 晶-矿浆 贯入	Fe、 (Co、 Ni、 Cu)	含矿黑云 母辉绿岩、 蓟县系的 大理岩夹 碎屑岩；	[21~ 23]
13	安徽	姑山	1 100 m× 880 m ×60.6 m	似穹窿 状(或 呈几字 形)	辉石闪 长玢岩	129.2±1.7 Ma	超大型 12 816 万吨	深部结 晶-矿浆 贯入	Fe、Ti	高岭土化 辉石闪长 岩、火山 岩、页岩	[24]
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 二长花岗 岩、花岗闪 长岩	135.5±2.2 Ma 139.1±2.3 Ma 140.0±2.6 Ma	大型	前锋式 小岩体	Cu、 Au、 Mo	白云岩、灰 岩、泥灰 岩、钙质页 岩 灰岩、矽卡 岩、二长花 岗岩	[25]
15	甘肃	小柳沟	≈1.5 km ²	岩株状	花岗斑岩、 二长花岗斑 岩、花岗闪 长斑岩	462±13 Ma (2σ)	大型	前锋式 小岩体	Mo、W		[26]
16	西藏	甲玛	隐伏	斑岩 脉、 岩枝	花岗斑岩、 二长花岗斑 岩、花岗闪 长斑岩	14.2±0.2 Ma 14.1±0.3 Ma	超大型 (Cu500 万吨)	前锋式 小岩体	Cu、 Mo	角岩、夕卡 岩、大理岩	[27]
17	陕西	金堆城	0.067 km ²	不规则 岩枝	碱长花 岗斑岩	140.95± 0.45 Ma 143.7±3 Ma	超大型	单式斑 岩小 岩体	Mo	细碧岩、石 英岩、碱长 花岗斑岩	[28, 29]
18	新疆	土屋	≈0.1 km ²	岩墙状	斜长花 岗斑岩	333±2 Ma 322.7±2.3 Ma	大型	单式斑 岩小 岩体	Cu、 Mo	玄武岩、凝 灰岩	[30]
19	江西	德兴 铜厂	0.7 km ²	三角形 岩株状	花岗闪 长斑岩	171±3 Ma	超大型	单式斑 岩小 岩体	Cu、 Mo	千枚岩、凝 灰质千 枚岩	[31]
20	西藏	玉龙	0.64 km ²	岩株状	花岗斑岩- 二长花岗 斑岩	~40 Ma 40.9±0.1 Ma	超大型	单式斑 岩小 岩体	Cu、 Mo、 W、Bi	砂页岩、 灰岩	[32]
21	安徽	沙坪沟	0.89 km ³	椭球 体状	花岗斑岩	111.5±1.5 Ma 120.7±1.1 Ma	巨型 (214.06 万吨)	单式斑 岩小 岩体	Mo	花岗岩、 正长岩	[33]
22	内蒙古	曹四夭	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	巨型(金 属量> 200 万吨)	单式斑 岩小 岩体	Mo、W	石榴浅粒 夹石榴斜 长石英岩、 矽线石榴 正长片 麻岩	[34]

续表

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					
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	超大型(金属量175万吨)	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	[35]
24	智利	丘基卡马塔	4 km ²	楔状	花岗斑岩	34.8±0.2 Ma	巨型(6 900万吨)	单式斑岩小岩体	Cu	安山岩、闪长岩、花岗岩	[36]
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 三道庄	超大型	夕卡岩-斑岩小岩体	Mo、Fe	白云石大理岩、夕卡岩	[37]
26	河南	南泥湖-三道庄	0.12 km ²	岩株状	斑状钾长花岗岩	145.4±2.0~144.5±2.2 Ma 南泥湖	超大型	夕卡岩-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	[38]
27	智利	埃尔特尼恩特	<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	巨型(5 767万吨)	复式斑岩小岩体	Cu、Mo	新近纪安山岩、沉积岩	[39]
28	印尼	格拉斯伯格	600 m×250 m	岩筒状	石英二长斑岩	3.33±0.12 Ma	巨型(Cu:2 160万吨,1.1%; Au:2 246吨,1.28×10 ⁻⁶)	复式斑岩小岩体	Cu、Au	粗面安山岩、凝灰岩、角砾岩、碳酸盐岩	[40]
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106万吨、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、闪长岩、变余云母细砂岩、千枚状页岩、板岩;	[41]
30	西藏	驱龙	0.15 km ² 0.75 km ²	岩枝状 岩株状	二长花岗斑岩	17.0±0.2 Ma 17.58±0.74 Ma	巨型	复式斑岩小岩体	Cu、Mo	黑云母二长花岗岩	[42, 43]
31	甘肃	大水	1.2 km ²	岩株状	辉石闪长岩-花岗闪长斑岩	202.9±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	[44, 45]
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	花岗闪长岩、花岗闪长斑岩、花岗斑岩、英安玢岩、引爆角砾岩	163±2 Ma	大型(Pb+Zn>50万吨)	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	[46, 47]
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、花岗斑岩脉	151.0±3.5 Ma 160~151 Ma	超大型	复式非斑岩小岩体	W、Mo、Sn、Bi	石灰岩	[48]

续表

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					
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 万吨	复式非 斑岩小 岩体	W、 Sn、 Mo、 Bi	寒武系浅变质岩	[49]

“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。

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。还有相当大的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,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,祁曼塔格昆仑造山带等都是小岩体成矿的重要远景区,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)。如铜矿大型50万吨,超大型250万吨,巨型1000万吨;镍矿大型10万吨,超大型50万吨,巨型200万吨;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)×100%)。如金川>47%;喀拉通克>60%;红旗岭7号岩体>90%;金堆城≥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,潜伏矿床往往规模更大、品位更高,尤其应当引起重视。

4 两类小岩体成(大)矿的成矿模式

4.1 镁铁-超镁铁质小岩体成大矿的成矿机制与类型

地幔橄榄岩部分熔融形成镁铁质岩浆上侵到地壳深部的中间岩浆房,经过初步的分异和成矿物质的预富集,形成不含矿岩浆、含矿岩浆和矿浆。然后这些含矿、不含矿岩浆、矿浆分批次脉动式上侵,在上侵过程和进入终端岩浆房后进一步分异。一般来说,先上侵的不含矿或含少量矿的岩浆(可以喷出地表或侵入浅部空间)分布的范围很大或较大,后来脉动式侵入的含矿岩浆、富矿岩浆或矿浆依次就位于现存较小的空间成岩成矿,形成所谓的小岩体大矿床。特别是,富矿岩浆和矿浆多位于岩体的底部或尾部,体现出尾羽成矿的特征。

4.1.1 成矿岩体的原生岩浆

这类岩体的原生岩浆一般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^[50](见图1)。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^[51],富斜方辉石岩浆有利于成矿。

4.1.2 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,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, 主要集中分布于 Talnakh、

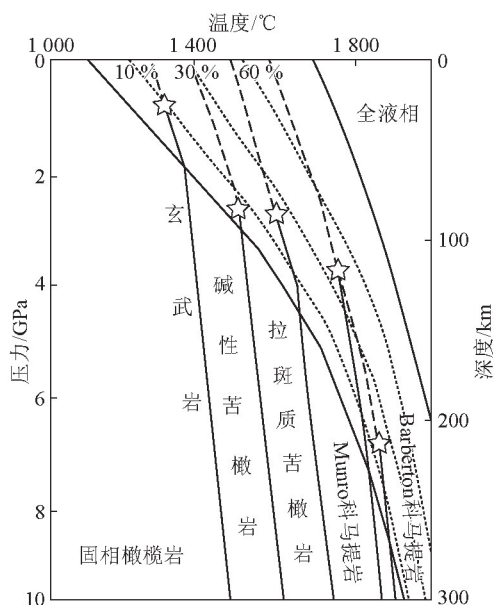


图1 岩浆熔融条件^[50]

Fig. 1 The condition of magma melting^[50]

Noril' sk 矿集区中。这些岩体侵入未变质的泥盆系-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 < 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的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, 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, 它们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。

4.1.3 两种硫源

矿床的硫源有两类。一类 $\delta^{34}\text{S}$ 变化很小, 基本接近于 0, 并呈塔式分布, 显示岩浆硫为主的特点, 没有迹象表明有较多地壳硫的加入, 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硫为主, 如力马河、Noril' sk、Voisey's Bay 等。

4.1.4 深部熔离-脉动式贯入成矿机制

结合小岩体矿床的成矿过程建立了小岩体的成矿模式(见图 2), 这个模式的主要内容包括: 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, 如 Noril' sk-Talnakh 上覆火山岩流中的 Nd 层^[52]; 四川杨柳坪地区铂族显著亏损的峨眉山玄武岩中段^[53, 54]; 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(前导性岩浆)是大量的、密度较小的、也是矿质亏损的。

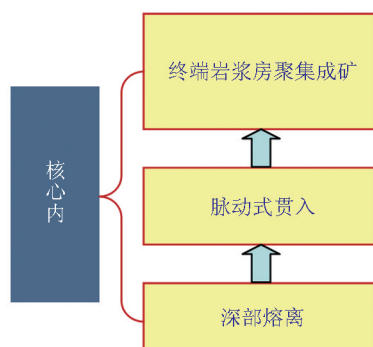


图2 镁铁质、超镁铁质小岩体成矿模式图

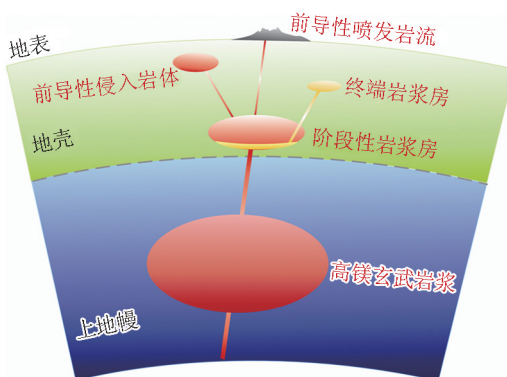


Fig. 2 Model of small intrusions mineralization

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)(继发性岩浆)。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,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,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。

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硫加入,致使岩浆达到硫过饱和,发生熔离作用和部分结晶作用,在重力作用下,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。一般来说,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)-脉动式贯入-终端岩浆房聚集成矿(见图2)。

4.1.5 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、Ni>1%的大型矿床,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、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>1%的大型矿床,如喀拉通克;中型矿床,如白马寨。

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、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>1%的大型、超大型矿床,如金川;又如大庙铁矿,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,并且形成以块状结构矿石为主要矿石类型的大型矿床。如磁海铁矿、姑山铁矿。

4.2 中酸性小岩体成(大)矿的机制与类型

中深部地壳部分熔融形成长英质岩浆,由于密度差异,岩浆自发上侵,随着压力降低和岩浆逐步结晶,导致岩浆中的挥发分达到过饱和,从岩浆中分馏出单独的流体相。流体相的出现具有双重效应:一方面导致岩浆房内蜕化沸腾,流体相萃取大部分成矿元素;另一方面,流体相会发生强力膨胀作用,在岩浆房上部及旁侧构造薄弱部位拓展出裂隙系统,富含成矿物质的流体会贯入这些裂隙系统,并在这些部位成矿。随着成矿流体向外喷射压力降低以及温度的降低,地下水会逐渐进入成矿系统。

4.2.1 成矿小岩体的原生岩浆

产Cu矿为主(Cu、Cu-Au、Cu-Mo)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^[55, 56]。以产Mo为主的小岩体其原生岩浆主要来自下地壳^[48],多属古板块碰撞造山导致的地壳重熔型花岗质岩浆^[57]。华南地区以W-Sn-Bi、稀有、稀土为主的小岩体金属矿床,近年研究表明,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^[58]。

4.2.2 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两个世纪,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^[8]。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,产生钾交代。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盘岩化,如此循环直至岩浆固结^[6-8],形成浅成、超浅成含矿小侵入体。这种含矿小侵入体体积很小,截面积也很小,但是,随着深度增加,截面积也逐渐变大。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,以及南北向和NE向小岩株,深部(>-2 500 m)则构成一个大岩体(岩基)。

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。

4.2.3 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℃)^[59]。对于以Cu为主或以Mo-W为主以及W-Sn-Mo-Bi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,即可发生夕卡岩矿化;如果围岩属花岗质岩、细碧岩、凝灰岩、千枚岩等,则相应发生钾化、硅化、绢云母化、粘土化、角岩化、青盘岩化等,同时伴以浸染状、细脉

浸染状或网脉状、脉状矿化。对于以Au为主的矿床如大水金矿床,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。

4.2.4 成矿类型

这里的成矿类型是以小岩体作为主导成矿因素,而有别于通常划分的矿床类型。共分以下6类。

1) 前锋式小岩体矿床。实例:西藏甲玛(Cu-Mo)、安徽狮子山(Cu-Au)(见图3)、甘肃小柳沟(W-Mo);在小岩体侵入的前锋围岩中和小岩体顶部成矿,且以前锋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、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夕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,以岩体外前锋式矿体为主。

2) 单式斑岩小岩体矿床。实例:安徽沙坪沟(Mo)、内蒙古曹四夭(Mo-W)、黑龙江岔路口(Mo-Pb-Zn)、陕西金堆城(Mo)、江西德兴铜厂(Cu-Mo)、西藏玉龙(Cu-Mo-W-Bi)、新疆土屋(Cu-Mo);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(Mo-Fe)、河南南泥湖-三道庄(Mo-W);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夕卡岩矿体,这些夕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(W、Sn)、西藏驱龙(Cu-Mo);两次或两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(Pb-Zn)、甘肃大水(Au);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(W)、湖南柿竹园(W-Sn-Mo-Bi);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。

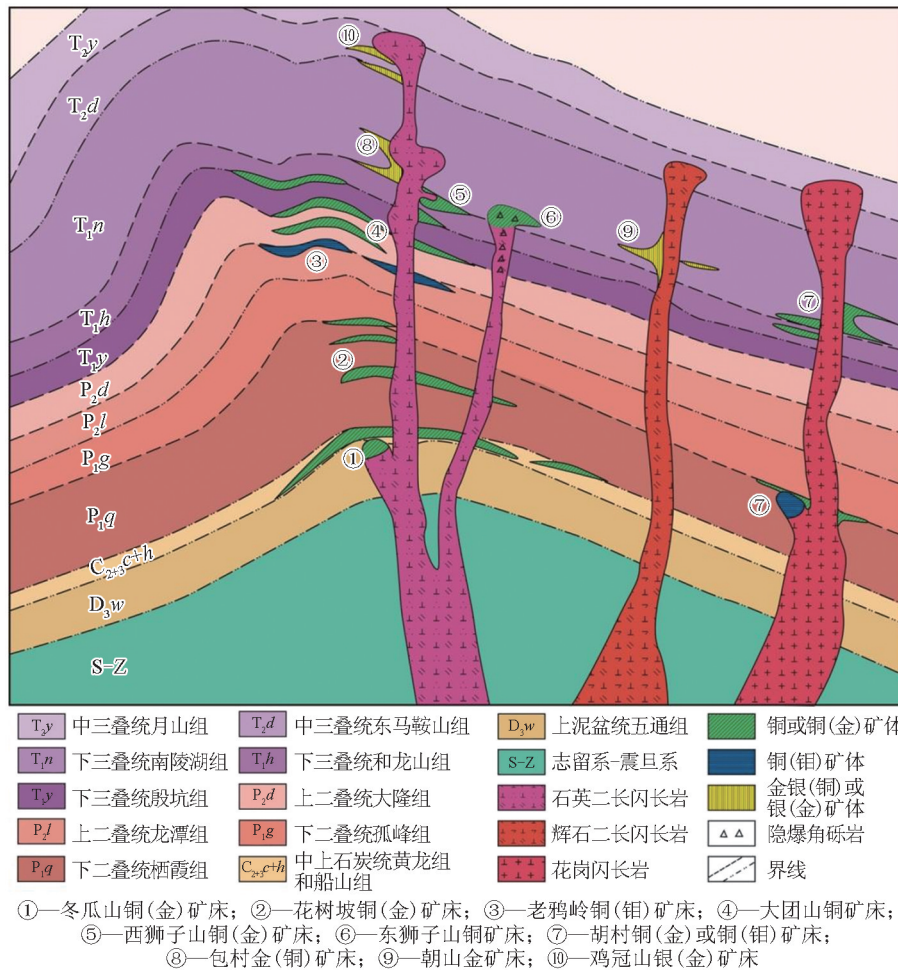


图3 安徽铜陵地区铜多金属成矿模式图^[25]

Fig. 3 Metallogenic model for the copper-gold-polymetallic deposits in Tongling area, Anhui^[25]

5 小岩体成(大)矿理论思考

尽管大型-超大型矿床往往与小岩体有关这一基本事实早就为矿床学界所认识^[60],但这种关系一直没有引起足够的重视。大部分成矿模型聚焦于岩浆相关矿床的具体成矿机制,忽略了大型-超大型矿床的直接侵入体是小岩体这样一个前提条件。小岩体成大矿理论一方面唤醒人们重新关注现存内生金属成矿理论中的一些重要缺陷,具有重要的理论意义;另一方面,小岩体将成为一种可填图找矿标志,表明该理论也具有现实意义。关于小岩体的内涵还存在一些争议^[61]:这些小岩体是独立小岩浆体固结的产物还是由大岩浆体所派生?岩浆熔离-贯入模式和通道堆积模式本质上还是涉及大岩浆体,是否存在独立的小岩浆体成矿作用?小岩体与大岩体到底有何不同?

5.1 小岩体成(大)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-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。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、钴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、钴以共生或伴生成分赋存于小岩体矿床中。在我国,金川矿床是最典型的小岩体矿床代表,红旗岭、金宝山、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。

对于镁铁-超镁铁质岩浆成矿而言,大岩体成矿以Bushveld为典型代表,成矿机制应属低硫化物岩浆就地分异成矿;而以金川为代表的岩体成矿机制应属高硫化物岩浆深部预富集贯入成矿。两种成矿机制的主要特征及差异如下。

5.1.1 “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,致使岩浆达到硫饱和或过饱和,而熔离出不混熔硫化物成矿。

2)不同岩浆的混合,结晶分异作用,壳源成分的污染,外来硫的加入等都可导致发生硫饱和或过饱和。在布什维尔德主要是由于不同岩浆的混合作用^[61-63]。

3)熔离出的硫化物一般仅占岩浆体积的0.5%~3%^[64],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分别产有超大型层状铬铁矿和钽钛磁铁矿^[64]。

5.1.2 “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,由于温度、压力等条件改变,致使岩浆达到硫饱和或过饱和,而熔离出不混熔硫化物,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”^[1]。

2)在深部岩浆房中,不同岩浆的混合,结晶分异作用,壳源成分的污染,外来硫的加入等都可导致发生硫饱和或过饱和。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混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。

由上可见,镁铁质大、小岩体成矿界定的主要标志即岩体规模的大小。其成矿机制最本质的差别就是大岩体以岩浆就(原)地成矿为主,小岩体以岩浆深部预富集再上侵成矿为主;长英质大岩体多构成岩基或基底,迄今,在其内部尚未发现产出重要的金属矿床,但是,其成矿(聚矿)作用多发育在突出去的岩瘤、岩枝等头部的小岩体部位。

5.2 小岩体成(大)矿与通道成矿之间的关系

地质学家们依据Noril'sk-Talnakh的研究和Voisey's Bay的发现和研究的,提出了通道成矿作用。所谓通道成矿作用是基于质量平衡的计算认为,成矿的岩浆房应当是一个开放系统,当新的岩浆注入时,主要由于围岩的同化混染或有外来硫的加入导致硫过饱和,发生硫化物的熔离作用,硫化物乳珠就地或沿通道移动到适当地方沉降下来形成矿体,而成矿元素亏损的岩浆随着新岩浆的不断补充而被挤出,形成新的不含矿岩体或喷出地表的熔岩流。通道中硫化物珠滴不断沉降富集的地方就形成了矿床(见图4)。

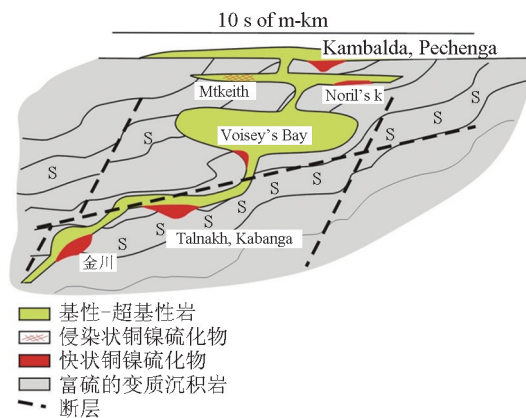


图4 岩浆铜镍硫化物矿床形成模式^[66]

Fig. 4 Metallogenic model for the magma Ni-Cu sulfide deposit^[66]

Li^[65]研究认为,Voisey's Bay超大型岩浆Ni-Cu-Co硫化物矿床形成的关键因素包括:a.相对分异的玄武岩浆上升进入地壳;b.岩浆和含硫副片麻岩的反应;c.不混溶硫化物液体产生后岩浆的持续流动;d.新的富Ni、Cu岩浆的重新上涌补给,并使已存在

的硫化物含量不断增高。岩浆通道成矿伴随 Voisey's Bay 超大型岩浆 Ni-Cu-Co 硫化物矿床的研究和勘查实践而提出,是岩浆流经的通道硫化物就地熔离和局部聚集的结果。

汤中立^[1]研究提出了中国铜镍岩浆硫化物矿床的深部熔离-贯入成矿机制,认为这种成矿作用是小岩体成大矿的理论基础,而就地熔离成矿作用机制是次要的。对金川岩体所做的成因矿物学研究表明,铬铁矿中 Ni 含量亏损、岩浆包裹体中少见金属硫化物子矿物,不混溶作用于硅酸盐矿物结晶之前;对金川稀有气体同位素的研究认为,硅酸盐矿物的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值 (0.239Ra) 略低于硫化物 (平均 0.456Ra),且从橄榄石 (平均 0.291Ra)、斜方辉石 (0.215Ra) 到单斜辉石 (0.174Ra) 逐渐降低, $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ - $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 分布于 MORB 与大陆地壳演化线之间,扣除放射性成因 $^4\text{He}^*$ 和 $^{40}\text{Ar}^*$ 后橄榄石和辉石中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 接近岩石圈地幔组成。He、Ne 和 Ar 同位素组成示踪表明成矿岩浆中存在岩石圈地幔、地壳和大气饱和流体三种端元成分,硫化物熔体的分离发生在岩浆结晶分异的早期。

硫化物熔离是岩浆铜镍硫化物矿床形成的必要条件,无论是通道成矿模式,还是小岩体成大矿模式,都是硫化物熔离的表现形式。深部预富集是小岩体成大矿的精髓,就地熔离则是通道成矿的表现。

5.3 小岩体成(大)矿的质量平衡

大型-超大型矿床往往与小岩体紧密联系在一起,这是一种客观存在。但是,从理想系统的质量平衡计算角度来看,小岩浆体无论如何也不能提供足够数量的成矿金属以满足形成大型-超大型矿床的要求。

金川岩体的体积约 1 km^3 ,其约 $5.45 \times 10^6\text{ t}$ 金属 Ni 储量需要约 300 km^3 的玄武岩浆参与成矿。俄罗斯 Noril'sk 地区含矿岩体的体积仅为约 3.5 km^3 ,而其金属 Ni 储量达 $2.3 \times 10^7\text{ t}$,意味着约 $1\ 000\text{ km}^3$ 的玄武岩浆参与了成矿^[64, 67]。基于质量平衡的计算表明,成矿的岩浆房可能是一个开放体系或存在多个岩浆通道,当岩浆注入近地表通道时,由于温度降低、硫逸度、氧逸度、压力等发生变化,硫化物达到饱和,硫化物乳滴沉降下来,残余岩浆继续前进,侵入到不同空间或喷出地表。

质量平衡研究发现,形成大型铜镍矿的地幔岩浆是大量的,铜镍等金属物质来自岩浆。由于成矿

的岩体往往很小,如金川、红旗岭、Voisey's Bay 等铜镍硫化物矿床,大量的岩浆到哪去了呢?是被剥蚀掉了还是侵入到其他空间?金川铜镍硫化物矿床研究显示,矿床西南方向 3 km 范围内,茅草泉镁铁-超镁铁质岩体由 50 多个小岩体组成。金川与附近的茅草泉镁铁-超镁铁质岩体群具有完整岩浆演化系列特征,空间上,金川与附近岩体平面距离小于 3 km ,而金川岩体自身长 6.5 km ,具有空间上的相关性;茅草泉岩体的单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 $832.5 \pm 1.5\text{ Ma}$ ^[68],金川岩体的锆石 U-Pb 年龄为 $831.8 \pm 0.6\text{ Ma}$ ^[10],在误差范围内一致,具有时间上的耦合性;岩石地球化学数值相似,都属于 EM I 型富集岩石圈地幔源区,具有同源岩浆特征;茅草泉小岩体群弥补了金川小岩体成大矿的岩相缺失、岩浆质量缺失^[68]。

在中酸性岩矿床勘查研究中,很多大规模的斑岩型铜、钼矿床往往产出在体积较小的中酸性岩枝或岩脉中,有的全岩矿化,甚至围岩也发生矿化。超大型铜矿德兴矿田的铜厂、朱砂红、富家坞三个矿床的斑岩体地表出露面积分别为 0.7 km^2 、 0.06 km^2 、 0.16 km^2 。内蒙古乌奴格吐山大型铜(钼)矿床的斑岩体出露面积为 0.5 km^2 。一些大中型矽卡岩铜矿床也是小岩体成矿。例如,安徽铜官山矿床的岩体出露面积为 1.5 km^2 ,湖北封山洞矿床的岩体出露面积为 0.72 km^2 ,江西武山矿床的岩体出露面积为 0.6 km^2 ,云南个旧卡房新山铜锡矿床的岩体出露面积为 0.32 km^2 。很明显,这类矿床的成矿物质不是来源于岩枝和岩脉本身,而应该是来源于体积更大的中酸性岩基^[69]或地层。

陕西金堆城钼多金属矿床研究显示,金堆城和老牛山花岗岩体单颗粒锆石 U-Pb 测年, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值分别为 $(143.7 \pm 3)\text{ Ma}$ 和 $(144.5 \pm 4.4)\text{ Ma}$,代表了岩体的结晶年龄,金堆城和老牛山花岗岩体为同期岩浆活动产物;金堆城和老牛山花岗岩体样品的地球化学数据证明岩石为高硅、富碱、过铝质系列、钙碱性岩石系列特征,高的 $\epsilon\text{Sr}(t)$ 、低的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值及 Pb 同位素比值图解证明岩体主要为下部地壳物质发生部分熔融形成,可能有少量地幔物质的加入。金堆城和老牛山花岗岩体成岩成矿年龄一致,岩石地球化学数据特征相似,暗示两个岩体的岩浆源区与岩石成因相同,推测老牛山岩体在深部发生分异演化,为金堆城小岩体提供了大量的热液和矿物质,从而出现了金堆城小岩体成大矿现

象^[70]。

总之,小岩体成(大)矿理论揭示了岩浆成矿系统的最本质方面,岩浆在很多矿床成矿过程中发挥了重要作用(提供热动力或提供矿物质或提供流体)。小岩体成(大)矿理论的发展方向是研究成矿的热力学原理、控矿因素等。小岩体成(大)矿理论目前尚未得到普及,重视不够,进一步的研究将促进打开新的找矿局面。

6 结语

1)提出了小岩体成(大)矿的范畴:基性小岩体的成矿作用包含小岩体Ni-Cu-PGE矿、V-Ti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,比如高温型的钨锡矿床等。总结出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。

2)研究表明,世界上最大的巨型镍、铜、钨、锡、钼、铋、金刚石等矿床主要产于小岩体和与小岩体邻近的围岩中,有些矿种如铂族、钴、铁、铬、金银、铅锌等都有小岩体超大型、大型矿床实例。

3)小岩体成(大)矿理论在基性-超基性小岩体矿床中表现为: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。在中酸性岩中成矿表现为: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。

4)完善了镁铁质-超镁铁质岩小岩体深部熔离(预富集)-贯入成矿机制,指出由于岩体小,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,发生熔离作用和部分结晶作用等深部地质过程,之后再向现存空间(地表或地壳浅部)一次或多次脉动式喷发-贯入成岩成矿。总结“小岩体成大矿”简要模式,即为深部熔离(预富集)-脉

动式贯入-终端岩浆房聚集成矿。该模式还显示了前导性岩浆与继发性岩浆作用的重要性,即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意义。进而总结了该模式下的4类主要成矿类型:深熔(深部结晶)-单式贯入成矿;深熔(深部结晶)-脉冲式贯入成矿;深熔(深部结晶)-复式贯入成矿;深部结晶-岩浆贯入成矿。

5)在镁铁-超镁铁质岩浆区,辨别前导性岩浆岩(体)和继发性岩浆岩(体),进而在继发行岩浆岩(体)中评价确定尾部含矿岩浆(体)、富矿岩浆(体)以及岩浆(体)是找矿突破的必然途径。如青海夏日哈木百万吨级超大型铜镍矿就是近年遵循这一过程取得的新区找矿重大突破。

6)在中酸性岩浆区或隐伏区,运用各种地、物、化探要素,判别确定小岩体头部可能隐伏地下的位置,然后部署工程找矿,达到找矿突破。安徽沙坪沟200多万吨巨型钼矿床就是前几年被安徽313队利用此方法发现的,一钻找到隐伏于地下200 m的小岩体头部厚大富钼矿体。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 汤中立. 中国的小岩体岩浆矿床[J]. 中国工程科学, 2002, 4(6): 9-12.
- [3] 汤中立, 闫海卿, 焦建刚, 等. 中国岩浆硫化物矿床新分类与小岩体成矿作用[J]. 矿床地质, 2006, 25(1): 1-9.
- [4] 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.
- [5] Yang K, Scott S D. Magmatic fluids as a source of metals in sea-floor hydrothermal systems[J]. Back-arc spreading systems: Geological, biological, chemical, and physical interactions, 2006, 163-184.
- [6] Shinohara H, Kazahaya K, Lowenstern J B. Volatile transport in a convecting magma column: Implications for porphyry Mo mineralization[J]. Geology, 1995, 23(12): 1091-1094.
- [7] Shinohara H, Hedenquist J W. Constraints on magma degassing beneath the Far Southeast porphyry Cu-Au deposit, Philippines [J]. Journal of Petrology, 1997, 38(12): 1741-1752.
- [8] Richards J P. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation[J]. Economic Geology, 2003, 98(8): 1515-1533.
- [9] 汤中立, 杨杰东, 徐士进, 等. 金川含矿超铁镁岩的Sm-Nd定年[J]. 科学通报, 1992, 37(10): 918-920.
- [10] Zhang Mingjie, Kamo S L, Li C S, et al. Precise U-Pb zircon - baddeleyite age of the Jinchuan sulfide ore-bearing ultramafic intrusion, western China[J]. Mineralium Deposita, 2010, 45(1): 3-9.
- [11] 三金柱, 秦克章, 汤中立, 等. 东天山图拉尔根大型铜镍矿区两个镁铁-超镁铁岩体的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(10): 3027-3035.

- [12] 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 科学通报, 2004, 49(22): 2324-2328.
- [13] 石贵勇, 孙晓明, 王生伟, 等. 云南白马寨铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(10): 2451-2456.
- [14] 冯光英, 刘燊, 冯彩霞, 等. 吉林红旗岭超基性岩体的锆石 U-Pb 年龄、Sr-Nd-Hf 同位素特征及岩石成因[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1594-1606.
- [15] Kamo S L, Czamanske G K, Krogh T E. A minimum U-Pb age for Siberian flood-basalt volcanism[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(18): 3505-3511.
- [16] Amelin Y, Li C S, Naldrett A J. Geochronology of the Voisey's Bay intrusion, Labrador, Canada, by precise U-Pb dating of coexisting baddeleyite, zircon, and apatite[J]. *Lithos*, 1999, 47(1): 33-51.
- [17] Bayanova T B, Voloshin A V. U-Pb dating of zircon megacrysts (8 cm) from Amazonite Rand-Pegmatite of Mt. Ploskaya, Baltic Shield[J]. *Proceedings of EUG-10, Strasbourg*, 1999(4): 153.
- [18] 陶琰, 马言胜, 苗来成, 等. 云南金宝山超镁铁岩体锆石 SHRIMP 年龄[J]. 科学通报, 2008, 53(22): 2828-2832.
- [19] Zhou Meifu, Leshen C M, Yang Zhengxi, et al. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusions in Huangshan district, eastern Xinjiang, northwest China: implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt[J]. *Chemical Geology*, 2004, 209: 233-257.
- [20] 赵太平, 陈福坤, 翟明国, 等. 河北大庙斜长岩杂岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 685-690.
- [21] 薛春纪, 姬金生, 杨前进. 新疆磁海铁(钴)矿床次火山热液成矿学[J]. 矿床地质, 2000, 19(2): 156-164.
- [22] 左国朝, 李绍雄, 于守南, 等. 新疆磁海铁矿床产出特征及成矿构造演化[J]. 西北地质, 2004, 37(2): 53-61.
- [23] 唐萍芝, 王京彬, 王玉往, 等. 新疆磁海铁矿镁铁-超镁铁岩地球化学特征及其地质意义[J]. 地球化学, 2010, 39(6): 542-552.
- [24] 范裕, 周涛发, 袁峰, 等. 宁芜盆地闪长玢岩的形成时代及对成矿的指示意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(9): 2715-2728.
- [25] 徐晓春, 范子良, 何俊, 等. 安徽铜陵狮子山矿田铜金多金属矿床的成矿模式[J]. 岩石学报, 2014, 4: 1054-1074.
- [26] Mao Jingwen, Zhang Zhaochong, Zhang Zuoheng, et al. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W (Mo) deposit in the northern Qilian mountains and its geological significance[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(11): 1815-1818.
- [27] 应立娟, 唐菊兴, 王登红, 等. 西藏甲玛铜多金属矿床矽卡岩中辉钼矿铼-钨同位素定年及其成矿意义[J]. 岩矿测试, 2009, 28(3): 265-268.
- [28] 朱赖民, 张国伟, 郭波, 等. 东秦岭金堆城大型斑岩钼矿床 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成矿动力学背景[J]. 地质学报, 2008, 82(2): 204-220.
- [29] 焦建刚, 汤中立, 钱壮志, 等. 东秦岭金堆城花岗斑岩体的锆石 U-Pb 年龄, 物质来源及成矿机制[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2010(6): 1011-1022.
- [30] 刘德权, 陈毓川, 王登红, 等. 土屋-延东铜钼矿田与成矿有关问题的讨论[J]. 矿床地质, 2003, 22(4): 334-344.
- [31] 王强, 赵振华, 简平, 等. 德兴花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Sr 同位素地球化学[J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 315-324.
- [32] 郭利果, 刘玉平, 徐伟, 等. SHRIMP 锆石年代学对西藏玉龙斑岩铜矿成矿年龄的制约[J]. 岩石学报, 2006, 22(4): 1009-1016.
- [33] 孟祥金, 徐文艺, 吕庆田, 等. 安徽沙坪沟斑岩钼矿锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄[J]. 地质学报, 2012, 86(3): 486-494.
- [34] 李香资, 班宜红, 权知心, 等. 内蒙古兴和县曹四夭钼矿床地球化学特征及成矿模型探讨[J]. 地质调查与研究, 2012, 35(1): 39-46.
- [35] 聂凤军, 孙振江, 李超, 等. 黑龙江岔路口钼多金属矿床辉钼矿铼-钨同位素年龄及地质意义[J]. 矿床地质, 2011, 30(5): 828-836.
- [36] Reynolds P, Ravenhurst C, Zentilli M, et al. High-precision $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of two consecutive hydrothermal events in the Chuquicamata porphyry copper system, Chile[J]. *Chemical Geology*, 1998, 148(1): 45-60.
- [37] 燕长海, 宋要武, 刘国印, 等. 河南栾川杨树凹-百炉沟 MVT 铅锌矿带地质特征[J]. 地质调查与研究, 2004, 27(4): 249-254.
- [38] 李永峰, 毛景文, 白凤军, 等. 东秦岭南泥湖钼(钨)矿田 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 2003, 49(6): 652-659.
- [39] MaksaeV V, Munizaga F, McWilliams M, et al. New chronology for El Teniente, Chilean Andes, from U/Pb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Re/Os and fission-track dating: Implications for the evolution of a supergiant porphyry Cu-Mo deposit[J]. *Andean Metallogeny: New Discoveries, Concepts Update. Society of Economic Geologists, Special Publication*, 2004, 11: 15-54.
- [40] Pollard P J, Taylor R G. Ages of intrusion, alteration, and mineralization at the Grasberg Cu-Au deposit, Papua, Indonesia [J]. *Economic Geology*, 2005, 100(5): 1005-1020.
- [41] 林黎, 占岗乐, 喻晓平. 江西大湖塘钨(锡)矿田地质特征及远景分析[J]. 资源调查与环境, 2006, 27(1): 25-32.
- [42] 莫济海, 梁华英, 喻亨祥, 等. 冈底斯斑岩铜矿带冲江及驱龙含矿斑岩体锆石 ELA-ICP-MS 及 SHRIMP 定年对比研究[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 4: 504-509.
- [43] 王亮亮, 莫宣学, 李冰, 等. 西藏驱龙斑岩铜矿含矿斑岩的年代学与地球化学[J]. 岩石学报, 2006, 30(4): 1001-1008.
- [44] 闫海卿, 贾慧敏, 胡彦强, 等. 甘肃大水金矿岩浆岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 矿床地质, 2010, 29(增): 529-530.
- [45] 李红阳, 李英杰, 袁万明, 等. 甘肃大水闪长岩型金矿床的矿物地球化学特征[J]. 地质与勘探, 2007, 43(4): 41-45.
- [46] 马丽艳, 路远发, 梅玉萍, 等. 湖南水口山矿区花岗闪长岩中的锆石 SHRIMP-U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(10): 2475-2482.
- [47] 喻亨祥, 刘家远. 水口山矿田花岗质潜火山杂岩与多金属成矿[J]. 地质找矿论丛, 1997, 12(4): 35-44.
- [48] 毛景文, 李红艳, Guy B, 等. 湖南柿竹园矽卡岩-云英岩型 W-Sn-Mo-Bi 矿床地质和成矿作用[J]. 矿床地质, 1996, 15(1): 1-15.
- [49] 刘家齐. 西华山花岗岩及其成矿作用[J]. 中国地质科学院院报, 1989, 19: 83-105.
- [50] Arndt N, Leshner C M. Mantle-derived magmas and magmatic Ni-Cu-(PGE) deposits[J]. *Economic Geology, 100th Anniversary volume*, 2005, 5-24.
- [51] Naldrett A J. World-class Ni-Cu-PGE deposits: key factors in their genesis[J]. *Mineralium deposita*, 1999, 34(3): 227-240.
- [52] Naldrett A J. A model for the Ni-Cu-PGE ores of the Noril'sk region and its application to other areas of flood basalt[J]. *Economic Geology*, 1992, 87(8): 1945-1962.
- [53] Song Xieyan, Zhou meifu, Cao Zhimin, 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.
- [54] Song Xieyan, Zhou Meifu, Wang C Y, et al. Role of crustal contamination in formation of the Jinchuan intrusion and its world-class Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, northwest China[J]. *International Geology Review*, 2006, 48(12): 1113-1132.
- [55] 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.
- [56] 芮宗瑶, 李光明, 张立生, 等. 西藏斑岩铜矿对重大地质事件的响应[J]. *地学前缘*, 2004, 11(1): 145-152.
- [57] 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: 地球科学)*, 2000, 30(增): 64-72.
- [58] 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.
- [59] 陈毓川, 朱裕生. 中国矿床成矿模式[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [60] 郭文魁. 我国主要矿产成矿条件的基本特征[J]. *科学通报*, 1965, 3: 189-201.
- [61] 李德东, 罗照华, 周久龙, 等. 岩墙厚度对成矿作用的约束: 以石湖金矿为例[J]. *地学前缘*, 2011, 18(1): 166-178.
- [62] Barnes S J, Maier W D. Platinum-group element distributions in the Rustenburg layered suite of the Bushveld Complex, South Africa In: Cabri, L.(Ed.), *The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of platinum-group elements* [M]. Special Issue 54 of Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2002.
- [63] Sharpe M R, Irvine T N. Melting relations of two Bushveld chilled margin rocks and implications for the origin of chromitite[J]. *Carnegie Institute Washington Yearbook*, 1983, 82: 295-300.
- [64] Naldrett A J. *Magmatic sulfide deposits: geology, geochemistry and exploration*[M]. New York: Springer, 2004.
- [65] Li C S, Lightfoot P C, et al. Contrasting petrological and geochemical relationships in the Voisey's Bay and Mushuau intrusions, Labrador, Canada: implications for ore genesis[J]. *Economic geology*, 2000, 95(4): 771-799.
- [66] Maier W D, Groves D I. Temporal and spatial controls on the formation of magmatic PGE and Ni-Cu deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 2011, 46(8): 841-857.
- [67] 宋谢炎, 陈列锰. “小岩体成大矿”的核心-岩浆通道系统成矿原理、特征及找矿标志[J]. *西北地质*, 2012, 45(4): 117-127.
- [68] 焦建刚, 汤中立, 闫海卿, 等. 金川铜镍硫化物矿床的岩浆质量平衡与成矿过程[J]. *矿床地质*, 2012, 31(6): 1135-1148.
- [69] 李文渊, 牛耀龄, 张照伟, 等. 新疆北部晚古生代大规模岩浆成矿的地球动力学背景和战略找矿远景[J]. *地学前缘*, 2012, 19(4): 41-50.
- [70] 焦建刚, 汤中立, 钱壮志, 等. 东秦岭金堆城花岗斑岩体的锆石 U-Pb 年龄、物质来源及成矿机制[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2010, 35(6): 1011-1022.

Theoretical system for (large) deposit formed by smaller intrusion

Tang Zhongli, Jiao Jiangang, Yan Haiqing, Xu Gang

(School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

[Abstract] The idea that most of the larger deposits were formed by smaller intrusion was firstly proposed on the basis of much prospecting practice in 1979. Through a long term of theoretical researches and guiding prospections, many large and super large deposits have been discovered, so the thought was accepted by more and more scholars. By summarizing the conception, connotation and category of the theory for large deposits formed by smaller intrusion, this paper pointed out that the five key features of this theory are “small, wide, large, high and shallow (potential)”. Through many studies on the ore genesis, we developed the idea of the large deposit formed by smaller intrusion into a theory, and presented metallogenic models, metallogenic mechanisms and metallogenic types for two kinds of large deposit formed by smaller intrusion. One kind is the deposit formed by mafic magma which has experienced deep segregation (preconcentration) at first, then emplacement by pulses and finally concentration into a deposit in the terminal of magma chamber; the other kind is the deposit formed by intermediate-acidic magma, which is presented as mineralization at the head of intrusion (mineralization at the head of gas, liquid, mineral, fluid), and mineralization in the front of intrusion and lateral space.

[Key words] small intrusions forming large deposits; connotation; category; characteristics; metallogenic model