

侵入体出露面积一般小于 1 km^2 ，多数小于 0.4 km^2 。某些致矿侵入体（如汝阳东沟岩体）被认为其水平截面积向下增大，但也不超过 1.35 km^2 （黄凡等，2009）。可见，东秦岭-大别山地区钼矿的观察结果与小岩体成大矿理论相一致。然而，也应当承认，图 1 展示的面积-储量关系并不清晰，很难说致矿侵入体的出露面积与金属储量具有确定性联系，甚至似乎可以根据图 1 否定岩体出露面积与成矿潜力的联系。因此，小岩体成大矿理论遭遇的重要科学问题之一就是岩体规模与金属储量的关系。实际上，更重要问题在于大多数小岩体并不含（致）矿。换句话说，大型矿床与小岩体有关，但小岩体却常常与成矿作用无关。因此，如何理解和进一步完善小岩体成大矿理论成为当前矿床学面临的重要科学问题。

罗照华等（2007，2009）试图从透岩浆流体作用的角度来理解小岩体与成矿作用的关系。理论上，外来流体（透岩浆流体）进入岩浆体的能力取决于岩浆的黏度，而后者则取决于岩浆的成分、温度、侵位深度和几何尺度，并决定了岩浆的运动速率。因此，岩浆黏度越小，就可以优越多的流体进入岩浆中，而这些流体的加入又进一步减小岩浆的黏度。如果流体供给充分，这种方式可以导致岩浆的黏度越来越小，流体/熔体比值越来越大，岩浆上升速度越来越快，岩浆成矿潜力越来越大。相反，岩浆黏度越大，含矿流体越难以进入，岩浆越容易固结成为含矿流体的圈闭介质。可见，小岩体的成矿潜力直接受控于含矿流体的体积，而不是岩浆体的体积。这样，含矿流体的成矿作用与岩体出露面积的关系就可能存在几种变化：①岩体出露面积太小，含矿流体不能有效进入，因而不含矿。②岩体出露面积太大，岩浆固结速率缓慢，不能有效圈闭含矿流体，岩体也不含矿。③岩体出露面积适中，含矿流体及可以大量透入，又不会大规模散失，成矿作用或者发生在岩浆体内，或者在直接围岩中，或二者兼而有之。

2 小岩体成大矿理论的科学意义

传统上，岩浆系统的研究主要以理想系统的热力学为基础。这样的研究只能阐明什么样的认识是错误的，却不能肯定什么样的模型是正确的。例

如，理论上大多数晶体与其寄主岩浆之间都存在密度差，因而岩浆系统中晶出的矿物有可能在演化过程中与残余岩浆重力分异。但是，这种分异过程是否具有明显的地质意义则不能得到肯定。因此，除了热力学准则之外，岩浆系统的研究还需要动力学准则，岩浆系统的物理过程于是成为当今研究的前沿领域。特别需要注意的是，在热力学理论框架下，岩浆系统的研究忽略岩浆过程的时间尺度，绝大多数研究都是以较大体积的火成岩为基础。在这种情况下，某些岩浆过程的时间尺度显得不重要。例如，根据 Candela（1991）给出的公式 $x = 0.28 t^{1/2}$ （其中 x 为冷却前锋到岩体边缘的距离，单位为厘米； t 为冷却到 x 处所需要的时间，单位为秒），直径为 2 km 的岩浆体固结的时间需要 $\sim 0.1 \text{ Ma}$ 年。对于规模更大的岩浆侵入体，其冷却时间更长，甚至达到 10 Ma （如内华达的 Tuolumne 岩基）。在这样的时间尺度范围内，岩浆的冷却过程一般不会抑制其他过程（如分离结晶作用）的发生，在镁铁质岩浆系统中尤其如此。

但是，如果岩浆的体积足够小，岩浆体将快速上升和固结，分离结晶过程将没有实质意义。例如，金伯利岩岩浆的上升时间以小时计或以天计，橄榄石捕虏晶含量甚至可高达 $70 \text{ vol. \%}$ ，可以看作是没有发生分离结晶作用的重要证据。同样，大多数长英质含矿斑岩中都见有暗色微粒包体和复杂的锆石组合（其密度均大于寄主岩浆），也是岩浆未经受分离结晶作用的可靠证据（罗照华等，2010，2011）。因此，必须考虑固结过程对其他岩浆过程的制约。在小岩体的框架下，传统岩浆系统研究得出的许多结论将不再适应，学者们突然面临着大量新的科学问题需要解决。

例如，对于致矿小岩体的定义，汤中立等（2006）总结为“截面积可以大到 n （ $n < 10$ ） km^2 ，小到 $0.00n \text{ km}^2$ ，一般在 1 km^2 左右或更小”。这种根据实际观察得出的截面积变化范围要求有理论证据。为此，李德东等（2011）设计了一个透岩浆流体连通管模型：①岩墙岩浆性质相同的条件下，含矿流体优先进入宽度较大的岩墙中。②岩墙宽度相同的条件下，含矿流体优先进入岩浆黏度较小的岩墙中。李德东等（2011）假定岩浆侵位于 6 km 深度水平，基于岩浆冷却速率和岩浆-围岩温度差计算了岩墙作为含矿流体通道的最小临界厚度（图

2);再根据岩墙的统计性长宽比,计算出岩墙的最小临界出露面积。如果岩墙与“岩体”的差别仅仅在于赋存空间的形态(岩体=等轴状岩墙,罗照华等,2008),这一最小临界出露面积可以认为既适应于岩墙,也适应于岩体。根据李德东等(2011),致矿侵入体的最小临界出露面积分别约为 $312\sim 1516\text{ m}^2$ (玄武质岩体), $0.014\sim 0.068\text{ km}^2$ (石英闪长玢岩)和 $0.011\sim 0.034\text{ km}^2$ (花岗斑岩)。但是,岩浆固结的时间尺度与地热梯度、围岩传热机制和热导率、岩浆的成分和侵位深度等因素均有关,上述数值仅仅是一个参考值,有必要继续深入研究。此外,也需要进一步模拟致矿侵入体的最大临界出露面积,以更好地服务于找矿实践。

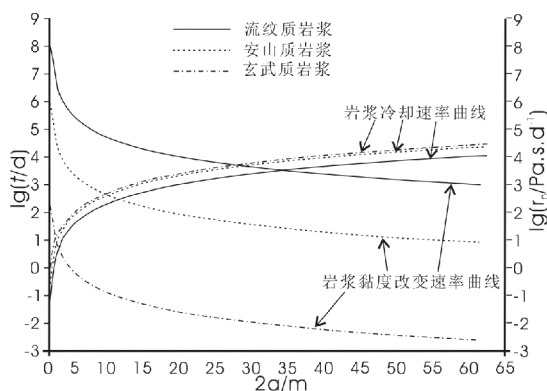


图2 岩墙冷却时间(t)与粘度变化投影图

(据李德东等,2011简化)

1, 4. 花岗斑岩; 2, 5. 辉绿岩; 3, 6. 石英闪长玢岩。

据此,可以将小岩浆体和大岩浆体作为岩浆系统的两个端元来讨论岩浆系统的演化。假定小岩浆体可以演化形成大岩浆体,可以引入岩浆系统成熟度(maturity of magma system)的概念。大岩浆体具有慢得多上升速率和长得多的固结时间,许多岩浆过程都是在近热力学平衡条件下发生的;相反,小岩浆体则是以热力学不平衡为特征,保留有各种过程的“残留”。因此,岩浆系统的成熟度可以表述为岩浆系统达到热力学平衡的程度。极端情况下,岩浆系统的演化与传统认识完全一致;大多数情况下则需要依据具体的观察结果再造岩浆系统的时空结构。换句话说,只有在复杂科学的基础上才能理解小岩体成大矿理论的深刻含义。

由此可见,小岩体成大矿理论不仅提出了新的矿床学问题,而且提出了新的岩石学和地球动力学

问题。因此,可以认为小岩体成大矿理论的提出具有重大的理论意义,将推动岩浆系统研究的快速进步,并为全面理解岩浆系统的地球动力学背景创造了良好的平台。

3 小岩体成大矿理论的现实意义

如上所述,尽管许多学者认识到大型矿床与小岩体有关,而小岩体却未必与成矿作用有关。这种观察事实促使学者们试图建立致矿小岩体和非致矿小岩体的识别标志,特别是地球化学标志。然而,这样的努力基本上未获得成功,一个基本原因是多数学者没有从四维空间的角度考察各种控矿因素的权重。因此,谈论找矿标志时往往指的是近矿标志。

从成矿系统的时空结构来看,复杂成矿系统具有多重分支现象,每一次分岔主要受控于一种特定的控矿因素,因而也产生特定的找矿标志。因此,尽管一个矿床的产生受控于多种地质过程,找矿预测却应当遵循由远及近的原则,逐渐逼近矿体。换句话说,不仅需要注意近矿找矿标志,也要注意远矿找矿标志。当前,“攻深找盲”越来越受到重视,远矿找矿标志的厘定迫在眉睫。

如上所述,含矿流体透过岩浆活动时可能发生三种情况,与岩浆的固结速率有关,后者又与岩浆的成分、温度、侵位深度等因素密切相关。如果岩体出露面积低于最低临界面积,岩浆快速冷却导致岩浆黏度急剧增加,不利于含矿流体的注入。这时,岩浆体的主要功能是堵塞多余的流体通道,使含矿流体可以相对集中形成规模较大的矿床和/或矿体。以这种方式形成的小岩体(岩墙)可能含有成矿物质,属于致矿侵入体。然而,小岩体中成矿金属含量有限,不能形成具有工业意义的矿床(体)。相反,含矿流体有可能全部逃逸,岩浆体内部将不形成有工业意义的矿体,但直接围岩中有可能形成具有工业意义的矿床(如矽卡岩型矿床)。介于二者之间时,既可能形成斑岩型矿床,也可以形成矽卡岩矿床,或者两类矿床的紧密共生。因此,小岩体或者是赋矿侵入体,或者是一种远矿找矿标志。无论是哪一种情况,小岩体都具有重要的成矿指示意义。

例如,在南阿拉套山填图过程中,较详细地标

示了岩墙出露情况。南阿拉套山地处中国的西北边疆,研究程度较低,很难利用综合分析方法进行成矿预测。为此,罗照华等(2012)尝试根据岩墙的属性 and 产出情况来进行找矿预测。已有资料的分析表明,南阿拉套山的二叠纪岩墙群属于宽谱系岩墙群,这种岩墙群的产出应当伴随着内生金属成矿作用。因此,问题在于矿床产出的具体位置,以及快速矿床定位的方法及其理论基础。根据透岩浆流体成矿理论,内生金属成矿作用受控于主应力分布在竖直方向上的局部应力场。据此,岩墙的分布密度和产状可用来查明应力场的中心位置,进而可根据物理化学边界层的空间展布特征定位有利的找矿靶区。根据这种分析,在区内预测了6个找矿靶区,涵盖了区内已发现19个内生金属矿床(点)中的15个(罗照华等,2012),暗示了预测方法的有效性。这表明,即使矿体不产在岩墙中,岩墙的产出特征仍可以用来定位矿床(体)的产出位置。需要指出的是,如果岩墙分布区产有小岩体或宽度较大的岩墙,它们将是成矿金属富集的更有利位置(罗照华等,2009)。

遗憾的是,无论是区域地质还是区域矿产调查,对小岩体(包括岩墙)这一类重要的地质体都没有给予应有的重视。特别是露头上未见矿化现象时,小岩体常常被有意忽略。因此,笔者对小岩体的理解还非常少,包括它们的岩浆起源、成矿作用和动力学背景。国内迄今尚没有一幅正式的小岩体分布图,充分证明了这一点。实际上,小岩体(包括岩墙)的形成具有特殊的构造应力背景,小岩体可作为远矿标志,也可作为近矿标志,有时小岩体本身就是矿体。由于“攻深找盲”是今后相当一段时间国内找矿的一种趋势,小岩体成大矿理论对找矿实践具有重要的指导意义。

4 结论

综上所述,小岩体成大矿理论蕴含了丰富的科学内容。首先,小岩体是形象可见的填图标志,有利于资源勘查工程师理解和应用。更重要的是,小岩体成大矿理论的提出将岩浆系统的研究推向了动

力学的高度,而不仅仅是热力学水平。多年来,尽管许多文献都谈到了动力学的问题,大多仅限于“纯”学术范围,因而岩浆成矿系统的动力学研究缺乏紧迫性。小岩体成大矿理论的提出使人们看到了动力学研究的紧迫性,因为必须了解成矿作用已经发生,才能有效进行资源勘查。因此,小岩体成大矿理论不仅具有重要的科学意义,而且具有实际利用价值。但是,该理论目前尚不完善,还有许多问题有待进一步研究和完善。

参考文献:

- 黄凡,罗照华,卢欣祥,等.东沟含钼斑岩由太山庙岩基派生?,矿床地质[J].2009,28(5):569-584.
- 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.
- 卢欣祥.河南省秦岭-大别山地区燕山期中酸性小岩体的基本特征和成矿作用[J].中国区域地质,1985.(13):115-123.
- 罗照华,陈必河,江秀敏,等.利用宽谱系岩墙群进行勘查靶区预测的初步尝试:以南阿拉套山为例[J].岩石学报,2012,28(7):1949-1965
- 罗照华,卢欣祥,陈必河,等.透岩浆流体成矿作用导论[M].北京:地质出版社,2009.
- 罗照华,卢欣祥,刘翠,等.岩浆热液成矿理论的失败:原因和出路[J].吉林大学学报(地球科学版),2011,41(1):1-11.
- 罗照华,卢欣祥,王秉璋,等.造山后脉岩组合与内生成矿作用[J].地学前缘,2008,15(4):1-12.
- 罗照华,莫宣学,卢欣祥,等.透岩浆流体成矿作用—理论分析与野外证据[J].地学前缘,2007,14(3):165-183.
- 汤中立,李小虎.两类岩浆的小岩体成大矿[J].矿床地质,2006,25(增刊):35-38.
- 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.
- Candela P A. Physics of aqueous phase exsolution in plutonic environments. American Mineralogist [J]. 1991. 76, 1081-1091.