

透岩浆流体成矿作用理论简介^{*}

罗照华 高 飞

教授,中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室,北京 100083; 高级工程师,河南省地质矿产勘查开发局第二地质勘查院,许昌 461000

^{*}国家自然科学基金对外交流与合作项目(40911120079)和河南省地质矿产重大科技攻关计划项目(26417)联合资助

关键词 透岩浆流体 内生金属矿床 成矿作用 高位火成岩 成矿体系

近十年来中国学者在内生金属成矿理论研究方面取得了一系列重要进展,可以用透岩浆流体作用将这些研究进展整合在一起,称为透岩浆流体成矿理论。与传统的岩浆热液成矿理论不同,岩浆与含矿流体被看作是两个完全不同的地质体系,它们的耦合有利于成矿物质的迁移,解耦导致成矿作用。该理论更注重成矿预测的宏观标志,有助于矿产资源的快速预测。本文的目的是以与高位火成岩相关的成矿作用为例,简要介绍透岩浆流体成矿作用理论模型。

与岩浆活动有关的矿床是人类获取固体矿产资源的主要矿床类型,阐明该类矿床的形成机制是重要的科学问题。近十年来,有关岩浆相关矿床的成因研究取得了许多重要的进展,主要包括:大规模成矿作用往往与小岩体有关^[1];成矿作用发生在混沌边缘^[2-4]或地壳中物理化学条件急剧变化的部位^[5];成矿作用是一种地质时间尺度上的瞬时过程(小于1百万年,实际上位于同位素测年方法误差范围之内),且受控于岩石圈性质^[6],因而岩石圈灾变伴随着成矿作用大爆发^[7];在同一能量驱动机制下,形成一系列具有成因联系的矿床类型^[8-10];地球内部含有大量的流体^[11-13],流体中成矿物质的溶解度强烈依赖于压力^[14],因而成矿作用与深部流体紧密相关^[15]。所有这些研究进展可以用科尔任斯基在1952年提出的透岩浆流体假说整合在一起,形成一个框架性模型,称为透岩浆流体成矿作用理论^[15]。根据这个模型,岩浆和含矿流体是两个完全不同的地质体系,它们因相互需要而常常形成耦合关系;当岩浆体系与流体体系解耦时,就导致了成矿作用的发生。

1 透岩浆流体的基本概念

一般认为物质有三种赋存状态:固体、液体和气体。在高温高压条件下,液体和气体之间的性质差异不再明显可分,称为流体。流体是由大量不断作热运动而且无固定平衡位置的分子构成,其基本特征是没有一定的形状和具有流动性。由于地球科学的研究对象具有宽泛

得多的温度压力条件,地质学家所称的流体不完全等同于物理学家的精确定义,某些作者甚至将岩浆也称为流体。本文所称的流体系指在常温常压下容易挥发的化学组分,有时又称为挥发分。

流体具有很强的溶解金属元素的能力,被认为是成矿元素的有效载体和搬运介质,因而在内生金属矿床的成因解释中占有重要的地位。可以说,内生金属成矿作用的基本解就是成矿元素从含矿流体中沉淀出来,因为所有的内生金属矿床都广泛发育围岩蚀变,而所有的围岩蚀变都必须有流体的参与。但是,流体中成矿元素的溶解度并不是很高,意味着内生金属成矿作用必须有巨量的流体参与。然而,大量实际观察表明,大规模成矿作用往往与小岩体有关^[1],小体积岩浆能否提供巨量的成矿物质是矿床学家必须回答的科学问题。

例如,最新的溶解度实验表明,在 $T = 300 \sim 360$, $P = 39 \sim 154$ bars 条件下,水蒸汽(流体)中 MoO_3 的溶解度介于 $1 \sim 29$ ppm 之间^[16]。按此计算,形成一个 65 万 t 金属钼储量的超大型矿床至少需要约 27 km^3 的流体。一般含矿岩体的体积不足 1 km^3 ,远远小于所需含矿流体的体积,不可能析出如此巨量的含矿流体。这就是说,还必须有额外的、更深源的流体。因此,矿床学家经常设想含矿岩体之下有一个大的岩浆房,后者提供了成矿作用所需要的流体和金属。

但是,这样的设想与许多地质事实相矛盾。例如,矿区出露的火成岩经常具有近同时形成、小体积和宽成分谱系的特点^[17]。基于浮力原理,如果含矿岩体之下有一个密度较小的大型花岗岩岩浆的岩浆房,密度较大的

中基性岩浆必然不能穿过它到达地壳浅部。因此,成矿流体和金属必须有其他的来源,这就是为什么引入“透岩浆流体”假说的原因。

简单说来,透岩浆流体就是超过熔浆溶解度的那部分流体,它透过岩浆进行活动,就象热气球中的气体与气球一起升向天空那样。因此,透岩浆流体成矿理论将岩浆和含矿流体看作是两个性质完全不同的地质体系,它们的耦合有利于上升侵位,解耦导致成矿作用。透岩浆流体作用现象在自然界屡见不鲜,如山东临朐山旺火山岩中的管状气孔(图 1),五大连池火山岩中的喷气叠锥(图 2),都是流体从下向上注入岩浆的纪录。



图 1 山东山旺玄武岩中的管状气孔。熔岩流压盖在湖相沉积物之上,沉积物中的水受热后变成蒸汽,产生强大的压力,透入熔岩并在岩浆中向上运动形成管状通道。同时,熔岩流继续向东流动(向右箭头),其上下运动速率的不一致导致管状气孔发生歪斜(向左箭头)。硬币直径 1.9 cm



图 2 五大连池熔岩中的喷气叠锥。当岩浆冷却较慢或黏度较小时,进入岩浆的水蒸汽可以透出,形成各式各样的喷气口

2 大规模成矿作用发生在混沌边缘

引入透岩浆流体的概念可以较好地解决成矿作用所需流体数量的问题。就象河水一样,虽然水流的规模有限,但河流中的水可以从水源地得到源源不断的补

充。但是,从资源勘查的角度来说,人们更关心在什么地方可以找到矿床或矿体,而不是成矿物质的来源。於崇文院士^[2,3]的高度概括为我们指明了方向:矿床发生在混沌边缘,或者说成矿作用发生在地壳中物理化学条件急剧变化的部位^[15]。仍以河流为例,悬浮物堆积在流速减小的部位,如河流拐弯处和河床变宽的地方。

透过岩浆运动的高温流体其性质与河水差别很大,成矿物质主要是呈络合物的形式溶解在流体中,其溶解度随着温度和压力的增加而增加^[14]。特别是当压力减小的时候,流体中成矿物质的溶解度急剧降低。因此,深部流体必须快速上升才能携带足够多的成矿物质。否则,成矿物质就有可能在流体上升的过程中丢失。换言之,流体上升的速度必须大于成矿物质的沉淀速度。

值得注意的是,成矿物质的溶解方式与沉淀方式是不同的。例如,铜在搬运过程中是以络合物的形式溶解在流体中,而在成矿过程中是以硫化物的形式沉淀。这种转换需要一定的时间,暗示成矿过程中流体的运动状态和物理化学性质在某个时间段内发生突然改变。这种改变应当发生在有限的空间位置上,如构造裂隙膨大部位和有能力与含矿流体发生强烈化学反应的围岩所在的位置(图 3)。有基于此,矿床学家可以很好地对矿床或矿体进行定位。

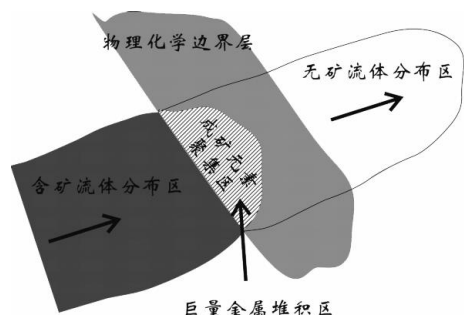


图 3 流体成矿作用示意图。箭头表示流体运动的方向

形成小岩体的岩浆体也是一种混沌边缘。由于岩浆体的渗透率随着温度的降低而快速下降,岩浆的冷却速率决定了含矿流体是被圈闭在岩浆体内还是析出进入围岩中。

3 透岩浆流体成矿体系

根据以上所述,可以根据含矿流体的圈闭情况构筑透岩浆流体成矿体系(图 4)。

3.1 正岩浆成矿体系

如果岩浆体系与流体体系同步运动且岩浆冷却速

度足够快,含矿流体有可能完全或大部分被圈闭在岩浆体内,随着岩浆体的冷却而发生成矿作用形成正岩浆矿床。这种情况通常暗示岩浆侵位较浅或岩浆与围岩的温度差较大,岩浆体的表壳快速固结形成密封层,绝大部分含矿流体都被封存在岩浆体内,只有位于岩浆体表层的含矿流体有可能部分散失到围岩中。这时,可能发生以下两种情况:

(1) 岩浆体的体积较小,整个岩浆体从边缘向内部较快速地冷却,因而在岩浆体边部形成流体阻隔层,几乎所有含矿流体都被圈闭在岩浆体内,形成正岩浆成矿亚体系。

(2) 岩浆体的体积较大时,冷却速率将明显变慢。一方面流体可以从岩浆中不断向上运动集中,另一方面流体的增加可以有效地降低岩浆的固相线温度,可以有效延缓岩浆渗透率的降低速度,因而含矿流体可以从岩浆中溢出。当岩浆体的顶板围岩为流体阻隔层时,岩浆的发泡作用可以导致部分流体聚集在岩浆体的顶部,从而形成边缘伟晶岩成矿亚体系。

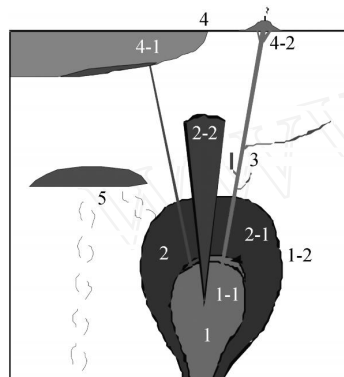


图4 透岩浆流体成矿系统。1表示正岩浆成矿体系,包括正岩浆成矿亚体系(1-1)和边缘伟晶岩成矿亚体系(1-2);2表示接触带成矿体系,接触交代成矿亚体系(2-1)和爆破角砾岩型成矿亚体系(2-2);3表示远程热液成矿体系,包括破碎带蚀变岩成矿亚体系、热液脉状成矿亚体系和微细浸染型成矿亚体系;4表示火山热液成矿体系,包括水底喷流沉积成矿亚体系(4-1)和潜火山成矿亚体系(4-2);5表示无机油气成矿体系

3.2 接触带成矿体系

当岩浆体的封闭条件较差时,从岩浆中析出的挥发分可以进入围岩,并与围岩发生物质交换。这个过程的发生取决于许多因素,包括围岩的物理性质、化学性质、岩浆侵位深度和速率、挥发分浓度、挥发分出溶速率等。如果岩浆侵位较深,岩浆冷却固结的速度将会较慢,因

而大部分含矿流体可以溢出岩浆体外进入围岩中,形成接触带型矿床。

(1) 接触交代成矿亚体系。从岩浆出溶的流体具有很强的交代围岩的能力,依围岩成分不同形成各式各样的交代岩。这个过程由于流体与围岩发生了物质交换,成矿金属的溶解度降低,可以在相应的位置上形成不同类型的矿床。特别是围岩为容易发生离子交换反应的岩层(如碳酸盐岩层、膏盐层)时,常形成接触交代型矿床,如矽卡岩矿床。

如果围岩为裂隙发育的脆性岩层,可以快速释放出溶挥发分的流体压力,成矿物质将充填这些裂隙形成网状裂隙充填型矿床。实际上,根据透岩浆流体成矿作用理论,岩浆-流体混合物是快速上升的,不可避免地对上覆围岩产生巨大的冲击压力,顶板岩石常常发育网状裂隙,是成矿物质大规模堆积的良好场所。因此,必须重视矿田构造的研究。

(2) 爆破(隐爆)角砾岩型成矿亚体系。如果出溶流体的内压力远远大于上覆围岩的静岩压力,可能导致爆破或隐爆作用,从而形成爆破(隐爆)角砾岩型矿床。

3.3 远程热液成矿体系

如果流体运动的通道条件好,含矿流体可以快速逸出并沿着有利通道(导矿构造)向远离源的方向运动。这种情况通常发生在岩浆侵位相对较深的情况,因为其冷却固结的速率更慢,从岩浆体内溢出的含矿流体甚至不能在其直接围岩中停留,而是沿着构造裂隙向浅部高速运移。在这个过程中,含矿流体将会逐渐冷却或进入流动条件较差的次级构造裂隙、甚至喀斯特溶洞中,并从中沉淀出造矿矿物,形成远程热液矿床。离岩浆体越远,流体的温度越低,因而在这个路径上可以依次形成高、中、低温热液矿床,矿体赋存在不同深度的次级构造裂隙中或界面内。同时,流体超压可能对通道两侧的岩石造成破坏^[18],破坏程度随着远离源的方向逐渐减弱。按此设想,从深到浅可依次形成破碎带蚀变岩成矿亚体系、热液脉状成矿亚体系和微细浸染型成矿亚体系。

3.4 火山热液成矿体系

如果流体通道十分通畅,含矿流体将直接喷出地球表面,形成火山爆发或火山喷气。这将造成含矿流体大规模散失在大气中,不利于成矿作用。但是,如果含矿流体喷出于深水环境中,高水压将可以阻止含矿流体的散失,并同时冷却和稀释含矿流体,导致水底喷流沉积成矿亚体系的产生。此外,火山机构本身也可能成为有利的成矿场所,当火山通道堵塞时,可以导致潜火山成

矿亚体系。

3.5 无机油气成矿体系

由于流体中的成矿物质溶解度有限,大规模成矿作用必然伴随着大规模流体活动。因此,还必须考虑金属元素沉淀以后残余流体的去向问题。已经有一些研究证明幔源 CO_2 通过还原反应生成烃类化合物的可能性^[19],也有大量的油气田的确发现有深源气体,热液流体也可以为干络根的分解提供必要的驱动能量^[20],所有这些促使我们考虑成矿金属沉淀后的残余流体有可能渗透到沉积岩层中形成油气的可能性,至少可以催化烃源岩的生烃过程。因此,无论透岩浆流体本身是否直接转化为油气,对于油气成因都具有重要的意义。此外,对无机成油气有重要意义的还有另外两方面的流体来源:从深部渗透上升的深部流体;深部流体活动过程中活化了了的封存流体。

4 深部流体储库与流体的释放机制

上述内容以透岩浆流体假说为纲,将“小岩体成大矿”、“成矿作用发生在混沌边缘”、“深部流体成矿”、“成矿系列”等矿床学研究进展有机地结合在一起。但是,我们尚不清楚为什么深部流体会突然大规模上升导致成矿作用。

岩石圈-软流圈系统渗透率的有限性、成矿作用的瞬时性及其对成矿流体的数量要求暗示深部流体一定有一个成矿前聚集过程,或者说存在深部成矿流体库。大地电磁测深研究揭示的地球内部高导层^[21]可能就是这样的流体库。根据 Nover^[22]对岩石导电性的解释,这种高导层最可能的解释是流体聚集带。如果这种解释是正确的,这些部位也应当是构造破碎带和容易产生岩浆的部位,因为层间构造剪切可以为流体的储存提供空间,而流体又可以降低源区岩石的固相线温度,使其更容易发生部分熔融形成岩浆。这种推测与万天丰等^[23]发表的最新研究成果不谋而合。

流体库的存在暗示其上覆岩层的渗透率小于下伏岩层,因而含矿流体的释放有赖于上覆岩层的结构破坏。从这个角度来说,岩石圈灾变过程伴随着成矿作用大爆发的论述^[7]应当是正确的。太行山北段发育造山后脉岩组合及其相关的铜多金属矿床,被认为是岩石圈拆沉作用和深部流体大规模上涌的结果^[17,24]。与此相应,电性结构剖面反映的岩石圈厚度只有约 70 km,软流圈顶部的高导层厚度约 10 km^[21]。相反,太行山南段没有造山后脉岩组合及其相关的铜多金属矿床,岩石圈厚

度约为 155 km,软流圈顶部的高导层厚达 50 km。

由此,来自构造、岩浆、成矿、大地电磁测深等方面的证据均表明,地球深部存在含矿流体库,流体的快速释放有赖于岩石圈拆沉作用。

5 总 结

透岩浆流体成矿理论可以较好地前人的研究成果整合在一起,更注重成矿作用的必然性而不是可能性。新疆阿拉套山和河北省涞水县安妥岭矿区的初步检验表明,根据透岩浆流体成矿理论,可以利用一系列宏观地质特征进行找矿预测和矿体定位。目前,该理论尚处在初步阶段,有可能发展成为一种有效的成矿与找矿理论。

(2009 年 5 月 11 日收到)

- [1] 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.
- [2] 於崇文. 大型矿床和成矿区(带)在混沌边缘(1)[J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 85-102.
- [3] 於崇文. 大型矿床和成矿区(带)在混沌边缘(2)[J]. 地学前缘, 1999, 6(2): 195-230.
- [4] 於崇文. 矿床在混沌边缘分形生长(上)[M]. 合肥:安徽教育出版社, 2006: 705.
- [5] 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.
- [6] BIERLEIN F P, GROVES D I, GOLDFARB R J, et al. Lithospheric controls on the formation of provinces hosting giant orogenic gold deposits[J]. Miner Deposita, 2006.
- [7] 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等. 中国东部燕山期岩石圈-软流圈系统大灾变与成矿环境[J]. 矿床地质, 1999, 18(4): 309-315.
- [8] 陈毓川, 裴荣富, 宋天锐, 等. 中国矿床成矿系列初论[M]. 北京:地质出版社, 1998: 104.
- [9] 陈毓川, 裴荣富, 王登红. 三论矿床的成矿系列问题[J]. 地质学报, 2006, 80(10): 1501-1508.
- [10] 翟裕生. 论成矿系统[J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 13-28.
- [11] 杜乐天. 地球的 5 个气圈与中地壳天然气开发[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(1): 25-35.
- [12] 朱永峰. 地幔流体与地球的放气作用[J]. 地学前缘, 1998, 5(增刊): 71-75.
- [13] RICHARD G, MONNEREAU M, INGRIN J. Is the transition zone an empty water reservoir Inferences from numerical model of mantle dynamics[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 205: 37-51.
- [14] LOUCKS R R, MAVROGENES J A. Gold solubility in supercritical hydrothermal brines measured in synthetic fluid inclusions[J]. Science, 1999, 284: 2159-2163.
- [15] 毛景文, 李晓峰, 张荣华, 等. 深部流体成矿系统[M]. 北京:中国大地出版社, 2005: 365.
- [16] REMPEL K U, MIGDISOV A A, WILLIAMS-JONES A E. The solubility and speciation of molybdenum in water vapour at elevated temperatures and pressures: implications for ore genesis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70: 687-696.

(下转第 276 页)

们的一生。

盖尔·亚姆和伦纳德据此在他们的报告中说:“很明显,这不是 NGC 266_LBV 1 的归宿。因此,我们的观测结果支持了以前的意见,即至少有某些大质量特超巨星,在猛烈的类似高光度蓝变星的喷发阶段内,或者在这阶段之后很短时间内,就爆发成为富氢的超新星……”。

紧跟在盖尔·亚姆和伦纳德的研究报告发表之后,2009年4月24日出版的美国《科学》杂志上,发表了丹麦哥本哈根大学的孟德(J. R. Maund)和英国贝尔法斯特女王大学的斯玛特(S. J. Smartt)合作的研究报告,声称证实了两颗 II 型超新星的前身星的消失。其中一颗是 IIP 型超新星 SN 2003gd 的前身星,是一颗红超巨星,初始质量约为 8 倍太阳质量。另一颗是 IIB 型超新星 SN 1993J 的前身星,也是一颗红超巨星,但略偏黄,初始质量为 15 倍太阳质量。后一颗前身星是一个双星系统的成员,其伴星是一颗蓝超巨星,质量略小,在超新星爆发后依然可见。SN 2003gd 和 SN 1993J 的前身星的消失证实了这两颗超新星是由红超巨星产生的,这与现有的大质量恒星演化理论是一致的。

超新星前身星的证认虽然很困难,但是可以相信,今后像上述这样的成功证认将会越来越多。随着更多的超新星前身星得到确切证认,对大质量恒星演化理论的改进和完善将会获得有力的推动。

(2009 年 5 月 26 日收到)

- [1] BURROWS A. Supernova explosions in the universe [J]. Nature, 2000, 403: 727-733.
- [2] HEGER A, FRYER C L, WOOSLEYS E, et al. How massive single stars end their life[J]. Astrophysical Journal, 2003, 591: 288-300.
- [3] ARNETT W D, BAHCOLL J N, KIRSHNER R P, et al. Supernova 1987A[J]. Annu Rev Astron Astrophys, 1989, 27: 629-700.
- [4] GAL-YAM A, LEONARD D C. A massive hypergiant star as the progenitor of the supernova SN 2005gl [J]. Nature, 2009, 458: 865-867.
- [5] MAUND J R, SMARTT S J. The disappearance of the progenitors of supernovae 1993J and 2003gd[J]. Science, 2009, 324: 486-488.

The Death of Massive Stars and the Supernova Explosions

WANG Jia-ji

Professor, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

Abstract Supernovae are catastrophic explosions of stars in their last phase of evolution. The fate of a single star depends on its initial mass and metallicity. There are the different courses of death for the single massive stars with different initial mass. Reliable identification of supernova progenitors is strongly impelling to improve and refine the evolution theory of massive stars.

Key words star, supernovae, progenitor, stellar evolution, initial mass, metallicity

(责任编辑:温文)

(上接第 257 页)

- [17] 罗照华,魏阳,辛厚田,等. 造山后脉岩组合的岩石成因——对岩石圈拆沉作用的约束[J]. 岩石学报, 2006, 22(6): 1672-1684.
- [18] LENSKEY N G, NIEBO R W, HOLLOWAY J R, et al. Bubble nucleation as a trigger for xenolith entrapment in mantle melts[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 245: 278-288.
- [19] BERNDT M E, ALLEN D E, SEYFRIED J R W E. Reduction of CO₂ during serpentinization of olivine at 300 °C and 500 bar [J]. Geology, 1996, 24(4): 351-354.
- [20] HILL R J, ZHANG ET, KATZ B J, et al. Modeling of gas generation from the Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 501-521.
- [21] 魏文博,叶高峰,金胜,等. 华北地区东部岩石圈导电性结构研究——减薄的华北岩石圈特点[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 204-216.
- [22] NOVER G. Electrical properties of crustal and mantle rocks—a review of laboratory measurements and their explanation[J]. Surveys in Geophysics, 2005, 26: 593-651.
- [23] 万天丰,王亚妹,刘俊来. 中国东部燕山期和四川期岩石圈构造滑脱与岩浆起源深度[J]. 地学前缘, 2008, 15(3): 1-35.
- [24] 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.

Introduction to the Metallogenic Theory by Transmagmatic Fluids

• 276 •

LUO Zhao-hua, GAO Fei

Professor, State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; Senior Engineer, NO. 2 Geoexploration Party of Henan Bureau of Geoexploration and Mineral Development, Xuchang 461000, China

Abstract Last decade, the Chinese scientists have achieved a series of important progresses in researching of mineralization of the endogenic metal deposits. These progresses can be integrated into a mineralization theory which is called as “metallogenic theory by transmagmatic fluids”. Differing with the traditional magmatic hydrothermal metallogeny, the magma and the ore-bearing fluid were regarded as two independent geological systems. Their coupling improves the transport process of the ore-forming materials, and their decoupling triggers the mineralization processes. This theory emphasizes the gross features for mineralogenic prognosis and hence improves the efficiency of prospecting mineral resources. The author aimed at simply introducing the theoretical model in terms of mineralization related to the high-level igneous rocks.

Key words transmagmatic fluid, endogenic metal deposit, mineralization, high-level igneous rock, metallogenic system

(责任编辑:丁嘉羽)