

地球科学发展趋势的思考 ——以地球动力学和超大型矿床形成机制为例

刘光莲¹, 张爱奎^{1,2}

1. 青海省第三地质矿产勘查院, 西宁 810029
2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要 从地球动力学和超大型矿床这两个地球科学前沿问题着手,初步探讨了地球科学的发展趋势。地球动力学旨在解决地球形成和演化的关键性问题,它涵盖了岩石圈板块动力学、地幔动力学、地核动力学及核-幔动力学,地球动力来源是地球动力学研究的焦点,它涉及了地球整体性和各圈层相互作用研究范畴。超大型矿床,尤其是非常规超大型矿床,是特定因素在特定条件下的耦合,超大型矿床形成机制同样涉及了地球圈层相互作用。通过地球动力来源和超大型矿床形成机制初步探讨,认为地球科学总的发展趋势是向着整体性和系统性方向发展,地球单一圈层的研究已很难适应地球科学的发展,需要从系统科学的角度去研究。

关键词 地球系统科学;地球动力学;超大型矿床

中图分类号 P61

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.11.020

Reflections on earth science development trend: Geodynamics and formation mechanism of superlarge mineral deposits

LIU Guanglian¹, ZHANG Aikui^{1,2}

1. No. 3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources of Qinghai Province, Xining 810029, China
2. College of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract Earth science has been profoundly transformed in the direction of system science. Grasping the development trend of earth science is helpful for understanding the general direction of earth science research. This paper inquires into the trend of earth science development, focusing on two frontier issues in earth science, geodynamics and superlarge deposits. Geodynamics is pivotal for studying earth formation and evolution, including lithospheric plate dynamics, mantle dynamics, core dynamics and core-mantle dynamics. The key to geodynamic studies is the power source of earth, involving integrity of the whole earth and interactions of earth spheres. Superlarge deposits, especially non-conventional ones, are formed with specific factors under specific conditions. The formation mechanism of superlarge deposits is also related to the interaction of earth spheres. Based on discussion of the aforementioned issues, earth science is considered to develop toward holistic and systematic orientation. Studies of a single earth sphere cannot meet the requirement of earth science development. Earth science research needs to be oriented toward systemization.

Keywords earth system science; geodynamics; superlarge mineral deposits

科学的发展总是在前人研究的基础上不断取得进步的,任何科学进步,都离不开对科学前沿问题和发展趋势的思索。因此,作为地质工作者,了解当前地球科学的发展趋势

和前沿问题有着重要意义。本文在初步总结地球科学进展现状的基础上,对地球动力来源、超大型矿床的形成机制和预测问题进行了初步探讨,试图说明地球科学发展的趋势。

收稿日期:2014-11-17;修回日期:2015-03-12

基金项目:青海省格尔木市野马泉地区铁多金属矿整装勘查区找矿部署研究项目(青地调勘[2012]62号)

作者简介:刘光莲,工程师,研究方向为科技项目管理,电子信箱:542664379@qq.com

引用格式:刘光莲,张爱奎.地球科学发展趋势的思考——以地球动力学和超大型矿床形成机制为例[J].科技导报,2015,33(11):114-119.

1 地球科学发展面临的问题及发展趋势

20世纪地球科学在许多领域取得了突飞猛进的发展,板块构造学说的诞生和发展,很好地把海洋和大陆、地壳和地幔有机地联系起来,极大地促进了地球科学各个领域的研究进展。国际深海/大洋/整合大洋钻探计划(DSDP/ODP/IODP)、大陆钻探(ICDP)、国际地圈生物圈计划(IGBP)等取得重大进展,验证了板块学说,为洋脊扩张提供最有说服力的地质证据。但目前板块学说动力学机制问题尚未解决,在解释中生代以来的部分板块运动方向的多变和放射状水平运动、大火成岩省和板内成矿等问题上存在困难^[1,2]。在层析成像基础上形成的地幔羽假说在解释上述现象时显得更合理一些,但地幔羽假说对于解释中生代以前的板块运动缺乏足够的资料,对解释每隔几千万年板块运动方向发生突变也不适用^[1]。

在深海/大洋钻探计划和大陆钻探实施过程中,发现了新型清洁能源——气水化合物和海底硫化物,发现深部存在人们预想不到的流体,观察到现代海底成矿事实。这些发现很大程度上推进了矿床成矿理论的认识和发展,沉积喷流型(SEDEX)矿床理论得到空前发展,并在找矿方面取得了重大进展^[3-6]。随着人类对资源需求的不断增长,矿床理论不断发展,以及超大型矿床带来的巨大经济效益和在国民经济中的重要作用,超大型矿床研究的重要性日益凸显。在超大型矿床研究过程中,发现其形成机制相当复杂,传统的成矿理论不能适应和解释某些矿床的形成过程。

在人类不断探索地球形成和演化,以及在研究与人类生存息息相关的资源和环境等问题时,发现传统研究地球单一圈层的地质作用已不能适应地质现象的解释。如生物集群绝灭、全球气候变化、全球海洋系统变化、大火成岩省等事件也很难用地球单一圈层的地质作用解释。必须从地球的不同层圈、层圈相互作用综合思考。天文因素也不容忽视。如王鸿祯^[7]在研究大陆动力学过程中,发现很多重大事件和自然现象是密切关联的,地球节律现象很可能与银河效应有关。

地球科学问题的复杂性,必须从系统科学的角度出发,研究地球大系统及其子系统,即地球整体及其各圈层内部以及圈层之间的运动变化全过程、形成机制以及可能发生的变化趋势。

《地球系统科学》^[8]阐述了地球系统科学的观点。地球系统科学是各地学学科的集成与整合,将对资源、能源、环境、生态、灾害等学科的发展起到促进作用^[9]。

当前,地球科学正朝着地球系统科学的方向进行着深刻地改造,地球整体性和各圈层相互作用是现代地球科学的核心。本文选择地球动力学和超大型矿床这2个地球科学前沿问题,介绍地球科学的整体性和系统性研究思维,探讨地球科学的发展趋势。

2 地球动力学

地球动力学是解决地球形成、演化的关键性问题,是地

球系统科学中一个极其复杂而又极其诱人的前沿性课题,是一个涉及领域很宽、覆盖学科众多、争论也最激烈的热点问题。地球动力学由著名弹性力学家勒夫1911年首次提出,真正得到发展是在板块构造学说建立之后,在广泛的国际合作,如国际地球物理年、上地幔计划、地球动力学计划、岩石圈计划的推动下,逐步从浅层到深部,从局部到全球乃至更大范围,从定性到定量方向发展。地球动力学重点是探讨地球运动的动力来源、动力机制和动力相互作用方式,它涉及和涵盖了岩石圈板块动力学、地幔动力学、地核动力学及核-幔动力学。

2.1 地核动力学、地幔动力学和核-幔动力学

地核动力学、地幔动力学及核-幔动力学是随着天体地质学、高新探测技术、高温高压实验和计算机技术发展,获得天体动力学及丰富深部观测资料、实验数据和计算结果的基础上发展起来的。

地核动力学牵涉磁流体动力学,在这方面研究资料较少。Song等^[10]于1996年报道,从长期地震波资料分析,发现地球内核不均一,内核对称轴比地球旋转轴每年向东偏移 1.1° ,内核的转速比地球其他部分略快(1年将比地表对应点多转过19 km),而外核则看不出变化,说明内核相对外核运动。这个结果为核动力学以及地幔流动分析都提供了一个重要的约束。但核-幔是如何相互作用,它们之间物质和能量如何进行传递?这涉及到核-幔边界的研究。

核-幔边界是地球内部一个非常重要的边界,也是地球内部反差最强烈的边界。在核-幔边界顶部存在“D”层,其最显著的特点是半径方向上地震波速的不连续变化。由于核-幔边界之间的巨大温度差,下地幔底部肯定存在热边界层(TBIJ),这就使得不少学者认为“D”层所具有的特征是由于地幔底部的热边界层引起的,“D”层的低速是高温造成的,层内的不均匀亦是由温度分布的不均匀引起的。但是,刘亮明等^[11]根据“D”层内地震波速的特点和突发性变化,认为这不可能是仅仅由温度变化引起的,推断“D”层与上覆地幔之间可能存在化学上的显著差异,“D”层内亦可能存在显著的化学不均匀性。侯胃等^[12]也认为“D”层内可能存在化学分界层(CBIJ)。但核-幔边界的化学反应机制现在存在一定分歧,Ito等^[13]通过高温高压实验,发现在24 GPa和2550°C的条件下,硅酸盐的Si(地幔物质)溶解进入熔融铁(地核物质)中的量达2%。但Boehler等^[14]曾用实验证明钙钛矿(地幔物质)与铁(地核物质)之间的反应只有在少量水的情况下才能发生,在核-幔边界干的条件下不会发生。近来,Murakami等^[15]通过高温高压实验,证实“D”层存在后钙钛矿相。这一新成果对人们深入开展地球内部成分以及结构的研究具有重要意义,但这种矿物相变对板块构造运动有何影响,研究涉及甚少^[16]。而对于核-幔间热量传递,刘亮明等^[11]认为核-幔间热量传递对地幔动力学不可低估。外核内部热量的径向传递是通过对流机制进行,外核顶部向地幔底部传热则是通过传导机制进行,这种传热机制的转换是在核-幔边界的热边界

层内进行。核-幔间的动量传递肯定存在,是通过核-幔耦合作用进行,但具体通过何种机制,还有待于更深入地研究。

以地震波研究为主要手段的地球物理方法对地球深部的勘查,肯定了岩石圈以下软流圈的存在,发现了上地幔中存在的物质不均一性。1963年Wilson^[17]提出“热点”构造,1971年,Morgan^[18]提出地幔柱理论,1990年Campbell等^[19]模拟地幔柱对流实验取得成功后,地幔柱假说开始盛行。日本学者在地震层析和圈层界面方面进行了大量的研究,发展了幔柱构造体系。地幔中任何部位都可能存在某种形式的对流,这一点无需争论。问题是地幔是如何对流的?Anderson^[20]最早将核-幔间的化学反应与地幔柱的形成联系起来,认为地核化学反应还在继续,化学反应过程中上浮残余物可能对地幔柱的形成有贡献。地幔能不能对流,决定于地幔的物质、热结构及能源。Peltier^[21]对地幔对流研究进行了系统的总结,目前对地幔对流有不同认识,是全地幔对流还是双层对流?傅容珊等^[22]建立了与大地水准面异常相关的热动力学模型,认为地幔热力学过程是一个统一的过程,使用这些模型进行模拟的结果表明,在Rayleigh数加大时出现双层对流,因此认为对流在空间尺度上表现了多重性和复杂性,次一级对流的存在正是解决全地幔对流和双层对流的关键。叶正仁等^[23]利用地形、板块运动的速度等地表观测的资料,对全地幔对流进行数值模拟,得到较为满意的结果。解决地幔对流问题的一个关键是弄清670 km深处物质的性质,地幔对流的性质可因温度的升或降出现时间上的变化,地幔中很可能交替出现以双层地幔对流为主和以总体地幔对流为主的时期^[24]。关于地幔对流、地幔柱起源及其中物质上升、下降的过程及机制现阶段还不清晰,有待进一步深入研究。

通过以上事实表明,地核动力学、地幔动力学和核-幔动力学在近年来的研究中确实有了很大的进步,但由于受深部物质组成和物质化学反应、质量及能量传递等过程和机制约束,地球物理反演和高温高压实验存在的不确定性,实际资料积累不足,弄清地球深部的动力学还存在较多困难。

2.2 板块动力学

板块构造学说的提出和发展,使得全球性构造运动得到了较圆满的解释。当前热点问题是板块动力来源,是什么力使得巨大的板块进行着复杂的运动?有如下几种最主要的观点。

一类观点认为板块运动受地球自转控制,人们很早就认识到由于地球自转惯性的作用,影响了大气环流和河流的流向,因而许多学者认为地球自转惯性推动板块运动。此假说的致命弱点在于地球自转速度变化引起的构造应力值仅在几个帕,为实测地壳构造应力值(几十至上百兆帕)的百万分之一,这样小的应力完全不可能引起板块运动^[1,2]。

另一类观点认为板块运动与热力、重力有关,如膨胀-收缩假说和重力失稳假说,但根据计算,地球膨胀速率约为0.025 mm/a,由于陨石撞击,地球在最近40亿年体积增加了1.8%,质量增加了六分之一,不足以造成板块大规模水平运动^[1,2]。

还有一类观点认为板块本身有关系的力使板块运动,如洋脊的推力、板块的负浮力、上涌物质的推力及海沟的吸力。对各种可能驱动力的定量估计是确定板块运动动力源的关键。Forsyth等^[25]比较了作用于板块上的各种力的相对大小后,认为俯冲带上的负浮力是板块运动的主要动力。但藏绍先^[26]考虑俯冲过程中温度、密度等物性参数随深度的变化,结合几种典型的俯冲带的不同俯冲速度、深度及板块厚度,计算了负浮力及对板块形成的拉应力,发现拉应力与俯冲深度、速度、板块厚度及俯冲的稳定状态有关,得到俯冲速度2~8 cm/a,板块厚度60~80 km条件下,等效拉应力的范围为0.04~0.29 GPa。这比预料的应力值低很多,也不足以引起板块大规模运动。

当前最盛行的动力来源解释是地幔羽假说。地幔羽通常认为是一团相对热的、低密度的地幔,由于它具有浮力而可以上升。在地幔羽内,存在热流体上升运移现象,根据地震层析成像资料,地幔羽一般可来自670 km间断面或核幔边界。地幔羽驱动岩石圈板块运动的假说,强调由于地幔热流体的大量上升和地幔头部的上顶,在岩石圈底面造成局部熔融,岩浆向上侵位,引起岩石圈上部的放射状张裂,有时还可以使原来的一个岩石圈板块张裂成几个板块,由于岩浆的大量上涌就不断地推动了板块在水平方向上和朝四周扩张、裂开^[1,2]。中生代前的地幔羽经常遇到证据被破坏或证据不足,公认程度不高。中生代以来的几个超级地幔羽证据比较多,如200 Ma北美洲、南美洲和非洲之间可能存在一个超级地幔羽^[1,2]。地幔羽假说虽然在了解地球演化方面取得了进展,但还存在很多争论,如地幔羽位置与热点不对应,热点地区岩浆的高热流未得到确切的岩石学证据,有些地幔柱缺失代表“地幔柱柱头”的大火成岩省,而有些大火成岩省缺失与“地幔柱柱尾”有关的随时间变年轻的火山岩轨迹^[27]。但以宋晓东的研究为基础,万天丰^[1]认为由于存在固态内核转动较快的现象,在液态外核和固态地幔之间发生摩擦、产生旋涡,从而可能诱发地幔羽形成。地幔羽假说对板块水平运动的解释完全不依赖于地幔对流速度,跟过去所有的假说相比,显得更合理一些,然而中生代以前地幔羽尚存在资料不足,还远不能解释整个地质历史时期的岩石圈板块的所有运动变化,也不太适用于解释每隔几千万年板块运动方向发生突变的现象。

当前,陨石撞击地球受到重视,巨大陨石撞击时间周期性(太阳系穿越银道面(33±3) Ma)与地球演化周期性的关系十分密切。由于陨石撞击,在陨石坑附近产生巨大的质量亏损,为保持重力均衡,可诱发地幔物质的上涌,形成地幔羽和大规模的岩浆活动,从而派生出放射状和环状的张断裂,可推动板块向四周运动。实际上,陨石撞击和地幔羽假说并不矛盾,且可以起到互补的作用^[1]。

2.3 地球动力学的一些思考

地球动力学涉及的范围远不止动力来源问题,如地球应力场的特点、地球动力形成机制和相互作用形式、动力演化及动力对地球运动的控制等都是地球动力学研究的主要内

容,尤其是板块构造的动力学研究,与人类关系更为密切。这些问题的研究都离不开动力学来源的研究,地球动力来源问题的深入研究可能是解决这些问题的关键所在。

1) 地球的动力来源研究是解决地球动力学的关键,而动力来源问题又受制于对地球物质的了解,尤其是深部物质组成、状态的详细研究,这有赖于岩石学、地球化学、地球物理、实验岩石学等学科的深入交叉、渗透。

2) 地球的动力来源问题是否可以从能量角度研究?从具有放射性和矿物相转变等地球物质本身产生的能量,以及地外物质对地球的能量贡献方面考虑地球动力来源问题。

3) 由于对地核了解的程度较低,地核对地球动力的贡献长期以来受关注程度不高,但宋晓东等^[10]的研究,已为这方面今后的发展提供了方向。

4) 地球内部的层圈界面特征,物质和能量的交换是研究动力学的关键所在。

总之,在地球动力学研究过程中,现在困惑科学家的问题是地球深部物质组成、性质和状态的不确定,地球系统的开放性,地球状态的非平衡及地球动力学的非线性,导致了地球动力学研究的复杂性。这样一个复杂的问题,需要多学科深入交叉、渗透,开展深部地球物质研究,发展探测技术和高温高压实验技术,以系统性思维和复杂性思维不断进行探索。

3 超大型矿床形成机制

3.1 超大型矿床特征

超大型矿床在定义上存在很大分歧。1983年,Laznicka^[28]提出以矿床已获得的某一金属储量与该金属的地壳平均含量的比值作为划分依据,超过此比值 10^{11} 倍者称为巨型矿床,超过 10^{12} 倍的则称为超巨型矿床。由于该定义仅适用于金属矿床,无法适用于非金属矿床,同时,元素的地壳丰度值的计算方法及数值本身各家说法不一,直接影响矿床规模的划分。故该方案虽提出较早,但响应者甚少。涂光焜^[29]率先在中国倡导超大型矿床研讨,提出超大型矿床的含义,即拥有国际惯例大型矿床3到5倍储量以上的矿床可称为超大型矿床。

超大型矿床的巨大经济效益是其他矿床无法比拟。同时,由于其形成具有特殊的过程和机制,尤其是“点型”^[29]分布的超大型矿床携带有特殊的地球演化历史和演化机制信息,如加拿大Sudbury铜镍硫化物矿床可能代表了一次重大的陨石撞击事件。因此,超大型矿床的研究和寻找不仅具有巨大的经济效益,而且对地球科学发展具有重要的理论意义。研究和探索异常成矿作用的“基因”是当代成矿学研究的一项重大前沿性课题^[30]。

人们已针对超大型矿床进行了较多的围绕矿床成因、分布规律、控矿因素、蚀变特征、矿石组成、找矿模式等方面的研究。

超大型矿床一类为“点型”分布的非常规型,即同一类型矿床在大面积内,甚至在世界范围内,均尚未发现第二个。裴荣富等^[31]认为“点型”超大型矿床只有在地质、地球化学和

地球物理等有利因素发生非常罕见的耦合条件下才能形成,它们是受特殊地质事件激发的正常成矿“引潮共振”而发生的异常成矿作用造就的。

另一类为“面型”或“线型”分布的常规型(如斑岩铜矿),即同一类型矿床的大、中、小型矿床分布较广和两类之间的过渡类型^[29]。

成矿类型上,涂光焜在研究中发现,尽管每一种金属和非金属超大型矿床在矿化类型上都各有其特点,但超大型矿床对矿化类型的选择性十分明显。涂光焜经过对中国已知超大型矿床矿化类型的剖析,发现钼矿仅斑岩型具超大型规模;锡矿仅锡石硫化物型具超大型规模;超大型汞矿多为层控矿床;超大型铅锌矿除一个斑岩型外,其他都是层控矿床;超大型铜矿除1个是层控型外,其他为斑岩型;超大型金矿为花岗岩-绿岩带型和陆相火山岩型^[29]。世界范围内,某些类型超大型矿床具有全球性分布,如沉积喷流型(SEDEX),密西西比河谷型(MVT),斑岩型,层型Cu、Pb、Zn超大型矿床。但有些类型的超大型矿床则具有明显的区域特点,以Au矿最具代表,如花岗-绿岩带型Au矿主要分布于加拿大;古砾岩型Au矿主要分布于南非;卡林型Au矿主要分布在美国^[32]。

空间分布上,板块碰撞带(尤其是洋壳消解带)、活动大陆边缘、大陆裂谷带、大陆内部巨型断裂及其交汇部(包括古构造)等部位都是形成超大型金属矿床的有利构造环境。

时间上,许多超大型矿床产出常表现为成矿的时控性、突变性和周期性,从矿种分析,Fe、U大多为前寒武纪;W、Sn、Mo、Ag则集中在中-新生代;Au、Cu、Pb、Zn等超大型矿床在各时代都可形成,但有所侧重: Au以前寒武纪和新生代为主,Pb、Zn以元古宙和古生代为主,Cu则以元古宙和新生代为主。这些情况反映了地球化学元素在地球长期演化过程中运移轨迹的差异^[33]。从成矿系统角度分析认为,太古宙时地壳较薄,镁铁质火山活动强烈,地表的VMS(灿岩块状硫化物)矿床及BIF(条带状铁建造)矿床占较大比重;古元古代和中元古代时大陆壳逐渐加厚,以SEDEX、VMS型Pb,REE(稀土元素),Cu和绿岩型Au,U等矿床为特征;显生宙以来,板块构造运动明显,壳幔层圈发育趋于成熟,生物有机质大量繁衍并参与成矿,热液矿床数量剧增,生物成因矿床大量形成,多种稀有元素、分散元素等经过地质历史上反复多次浓集而形成花样繁多的矿床类型^[9]。

3.2 超大型矿床形成机制的思考

虽然针对超大型矿床进行了较多的围绕矿床成因、分布规律等方面的研究,但超大型矿床的形成机制仍当前研究的难点和关键所在。

已发现的超大型矿床形成机制非常复杂,尤其是对非常规超大型矿床,都是特定因素在特定条件下的耦合。如白云鄂博矿床形成机制特殊性在于其沉积喷流作用,这种作用与碳酸岩岩浆有关,但具热液性质。目前,这种不寻常的喷流热液仅见于非洲大裂谷,估计在地质历史中它也很少出现,不像岩浆碳酸岩那样普遍^[34]。加拿大Sudbury铜镍硫化物矿床则被普遍认为是一次陨石事件。虽然超大型矿床形成机

制非常复杂,但主要应取决于:1)有巨大的成矿物质来源;2)有利的成矿物质活化机制;3)有利的运移、浓集沉淀机制;4)具有良好的保存条件。

巨大的成矿物质来源受控于成矿源区的物质供应能力,这与元素的性质具有一定关系。丰度高的元素组合易在地球的早期富集,丰度低的元素组合易在地球演化的晚期富集。例如Fe及亲Fe元素Ni、Au、碱金属及被碱溶液活化转移的U,成矿时代较早;亲硫元素Cu、Pb、Zn其次;W、Sn、Sb、Hg成矿时代最晚^[35]。但不同元素具有不同超大型矿床数,明显反映了不同金属元素形成超大型矿床的能力是不同的。Cu最容易形成超大型矿床,其次是Au和Fe,再次为Ag、Cr、Mo等,而Th、Y、Te则难以形成超大型矿床。这一规律不能用元素性质解释^[36]。说明超大型矿床成矿源区的物质供应能力除受元素性质决定外,还受到物质来源区原始成分的制约。如中国华南W、Sn、Mo超大型矿床发育,与该区花岗岩发育有关。而超大型矿床密集区的研究表明,矿床的形成与地幔具有明显关系^[37]。易建斌^[38]在研究全球铈矿的成矿特征时,发现超大型铈矿床与一般规模铈矿的背景差异主要是超大型矿床分布的范围有以煌斑岩脉为代表的幔源岩浆活动;黄瑞华^[39]论证了莫霍面的形态对中国岩金矿床的分布具有控制作用;冉崇英^[40]等的研究显示康滇地轴的层控铜矿的成矿物质都与幔源有关。肖志峰等^[36]认为,超大型矿床的分布和形成与地幔的不均一性,甚至与地球形成时原始不均一有关。综上所述,对超大型矿床而言,巨大的成矿物质来源受到元素性质和物源区原始成分的共同制约。

形成超大型矿床,仅有巨大的成矿物质来源是不够的,有利的成矿物质活化机制非常关键,这主要受体系的状态控制,如体系成分、温度、压力、pH值、Eh值(氧化还原电位)的改变,导致元素不稳定,从而引起元素的迁移。引起体系状态的改变有很多因素,超大型矿床元素的活化多与大型构造、壳幔物质的混合、岩浆同化和混合作用、挥发份的改变、流体性质变化等有关。如超大型斑岩矿床多产在俯冲板块的上盘;MVT型通常位于造山带内,多在地台型碳酸盐岩的伸展地带;SEDEX型多位于被动大陆边缘或陆内夭折裂谷中的活动伸展盆地;众多的超大型岩浆铜镍硫化物矿床与岩浆同化作用相关,等等。

有利的成矿物质运移、浓集沉淀机制对超大型矿床形成非常关键。流体在这个过程中起到了很重要的作用。不同类型流体的大量混合是形成超大型矿床的重要机制,很多矿床的地质和稳定同位素研究证明了这一论断。在对奥林匹克坝矿床的成因研究中,Haynes等^[41]又提出了新的混合流体成矿模式,即在中元古宙克拉通边缘构造活动带中,火山-侵入活动显著,有大规模地热异常存在,地表有古盐湖,火山喷发和破碎构造带沟通了下渗卤水和上涌的深部流体,在两种流体大量混合的地带形成了U、Cu、REE等金属的巨量富集,构成举世瞩目的世界级矿床。超临界流体对形成超大型矿床的成矿元素迁移、聚集有一定意义。由于超临界流体是一种可压缩的高密度流体,超临界流体分子间力很小,类似气

体,而密度则很大,接近液体,是一种气液不分的状态,没有气液相界面,也就没有相际效应,因而其溶解能力和萃取能力大为提高。超临界流体的黏度是液体的百分之一,自扩散系数是液体的100倍,因而具有良好的传质特性^[42]。超临界地质流体从矿源中萃取金属和非金属成矿元素,形成多组分的成矿混合溶液。超临界热液的溶解能力较强,极易与围岩发生相互作用,一方面能有效地溶解成矿物质,另一方面形成各种构造裂隙或次生溶孔,改善运移条件^[43]。纳米流体是由流体与纳米粒子组成的悬浮体,迁移速度惊人,某些超大型矿床形成可能与纳米流体相关,但这方面研究很少,还有待进一步研究。

矿床在形成后,又经历了不同程度的变形、变质、热液改造、风化剥蚀等复杂变化。这些变化影响到矿床是继续保存,还是被破坏消失。如斑岩型矿床在形成后,多快速抬升,因此发现的斑岩矿床多数时代较新。

4 结论

地球系统科学是当前地球科学的总方向,地球整体性和各圈层相互作用是现代地球科学的核心,地球科学前沿问题的产生离不开地球整体性和各圈层相互作用这2个主题。地球动力学、超大型矿床形成机制、全球变化、地球深部物质研究、生物集群绝灭、地质灾害预测等问题都很好体现了地球的系统性,都需要从系统科学的角度去研究地球的整体性和各圈层相互作用。

参考文献(References)

- [1] Wan T F. The tectonics of China: Data, maps and evolution[M]. Beijing, Dordrecht Heideiberg, London and New York: Higher Education Press and Springer, 2011: 1-501.
- [2] 万天丰. 论构造地质学和大地球构造学的几个重要问题[J]. 地学前缘, 2014, 21(1): 132-149.
Wang Tianfeng. Discussion on some important problems in structural geology and tectonics[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(1): 132-149.
- [3] 韩发, 孙海田. Sedex型矿床成矿系统[J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 140-163.
Han Fa, Sun Haitian. Metallogenic system of Sedex type deposits: A review[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(1): 140-163.
- [4] 罗俊杰, 张建芳. Sedex型矿床地质特征及成矿物质来源示踪[J]. 资源环境与工程, 2010, 24(1): 36-40.
Luo Junjie, Zhang Jianfang. Geological characteristics of Sedex type deposit and tracing for sources of metallogenic material[J]. Resources Environment and Engineering, 2010, 24(1): 36-40.
- [5] 郑明华. 矿床地质学之复兴[J]. 地学前缘, 2014, 21(5): 1-12.
Zheng Minghua. The renaissance of economic geology[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(5): 1-12.
- [6] 张长青, 吴越, 王登红, 等. 中国铅锌矿床成矿规律概要[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2252-2268.
Zhang Changqing, Wu Yue, Wang Denghong, et al. Brief introduction on metallogeny of Pb-Zn deposits in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(12): 2252-2268.
- [7] 王鸿祯. 地球的节律与大陆动力学的思考[J]. 地学前缘, 1997, 4(3): 1-12.
Wang Hongzhen. Speculations on earth's rhythms and continental dynamics[J]. Earth Science Frontiers, 1997, 4(3): 1-12.
- [8] 陈泮勤, 马振华, 王庚辰. 地球系统科学[M]. 北京: 地震出版社, 1992: 1-189.
Chen Panqin, Ma Zhenhua, Wang Gengchen. Earth system science[M].

- Beijing: Seismological Press, 1992: 1-189.
- [9] 翟裕生. 地球系统科学与成矿学研究[J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 1-10.
Zhai Yusheng. Earth system sciences and the study on metallogenesis [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(1): 1-10.
- [10] Song X, Richards P G. Seismological evidence for differential rotation of the earth's inner core[J]. Nature, 1996, 382(6588): 221-224.
- [11] 刘亮明, 彭省临. 核-幔相互作用及其地球动力学意义[J]. 高校地质学报, 1997, 3(4): 438-444.
Liu Liangming, Peng Shenglin. Core-mantle interaction and its geodynamical implication[J]. Geological Journal of China Universities, 1997, 3(4): 438-444.
- [12] 侯渭, 谢鸿森. 关于地核和核幔边界区物质的成分及运动特征的研究进展[J]. 地球科学进展, 1996, 11(2): 204-208.
Hou Wei, Xie Hongsen. The progresses in composition and movement of materials in core and core-mantle boundary region[J]. Advance in Earth Sciences, 1996, 11(2): 204-208.
- [13] Ito E, Katsura T. Dissolution of silicon and oxygen in molten iron at high pressure and temperature[J]. Proceedings of the Japan Academy, Series B, 1991, 67: 153-158.
- [14] Boehler R. Core-mantle reaction[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1993, 74(43): 415.
- [15] Murakami, Hirose K, Kawamura K, et al. Post perovskite phase transition in $MgSiO_3$ [J]. Science, 2004, 304(5672): 855-858.
- [16] 张苑, 舒良树. 21世纪实验岩石学的重大突破—核幔边界D'层研究[J]. 地质学刊, 2010, 34(2): 113-116.
Zhang Yuan, Shu Liangshu. On research achievements in earth's D' layer in core-mantle boundary an important breakthrough in 21st experimental petrology[J]. Journal of Geology, 2010, 34(2): 113-116.
- [17] Wilson J T. A possible origin of the Hawaiian islands[J]. Canadian Journal of Physics, 1963, 41: 863-870.
- [18] Morgan W J. Convection plumes in the lower mantle[J]. Nature, 1971, 230(5288): 42-43.
- [19] Campbell I H, Griffiths R W. Implications of mantle plume structure for the evolution of flood basalts[J]. Earth Planet Science Letter, 1990, 99: 79-93.
- [20] Anderson D L. Chemical plume in the mantle[J]. Geological Society of America Bulletin, 1975, 86: 1593-1600.
- [21] Peltier W R. Mantle convection plate tectonics and global dynamics [M]. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1989.
- [22] Fu R S, Huang J H, Wei Z X. The upper mantle flow beneath the North China platform[J]. Pageoph, 1996, 146(3): 649-660.
- [23] 叶正仁, 白武明, 藤春凯. 地幔对流的数值模拟及其与表面观测的关系[J]. 地球物理学报, 1993, 36(1): 27-36.
Ye Zhengren, Bai Wuming, Teng Chunkai. The numerical modelling of mantle convection and its relationship to surface observations[J]. Acta Geophysica Sinica, 1993, 36(1): 27-36.
- [24] 王仁. 我国地球动力学的研究进展与展望[J]. 地球物理学报, 1997, 40(增1): 50-59.
Wang Ren. Progress and outlook of geodynamic research in China[J]. Acta Geophysica Sinica, 1997, 40(Suppl 1): 50-59.
- [25] Forsyth D, Uyeda S. On the relative importance of the driving forces of plate motion[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1975, 43: 163-200.
- [26] 藏绍先. 我国地球动力学的研究进展与展望[J]. 地球物理学报, 1994, 37(增1): 114-127.
Zang Shaoxian. Advance and prospect in the study of geodynamics in China[J]. Acta Geophysica Sinica, 1994, 37(Suppl 1): 114-127.
- [27] Foulger G R. 地幔柱: 为什么现在怀疑?[J]. 科学通报, 2005, 50(17): 1814-1818.
Foulger G R. Mantle plumes: Why the current skepticism?[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(17): 1814-1818.
- [28] Laznicka P. Giant ore deposits, a quantitation approach[J]. Global Tectonics and Metallogeny, 1983(2): 41-63.
- [29] 涂光炽. 关于超大型矿床的寻找和理论研究[J]. 矿物岩石地球化学通讯, 1989(3): 163-168.
Tu Guangchi. On prospecting and theoretical research of superlarge mineral deposits[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 1989(3): 163-168.
- [30] 裴荣富, 梅燕雄, 李进文. 特大型矿床与异常成矿作用[J]. 地学前缘, 2004, 11(2): 323-331.
Pei Rongfu, Mei Yanxiong, Li Jinwen. Exceptional large ore deposits and anomalous ore-forming process[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(2): 323-331.
- [31] 裴荣富, 梅燕雄, 瞿泓滢, 等. 大型-超大型矿床找矿新认知[J]. 矿床地质, 2013, 32(4): 661-671.
Pei Rongfu, Mei Yanxiong, Qu Hongying, et al. New recognized intellect for prospecting large-superlarge mineral deposits[J]. Mineral Deposits, 2013, 32(4): 661-671.
- [32] 赵振华, 刘秉光, 李朝阳. 我国与寻找超大型矿床有关的基础研究进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(2): 184-188.
Zhao Zhenhua, Liu Bingguang, Li Chaoyang. Advance in basic researches pertaining to exploration of superlarge ore deposits in China [J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(2): 184-188.
- [33] 翟裕生. 金属成矿学研究的若干进展[J]. 地质与勘探, 1997, 33(1): 13-18.
Zhai Yusheng. Progresses on metallization research[J]. Geology and Prospecting, 1997, 33(1): 13-18.
- [34] 涂光炽. 试论非常规超大型矿床物质组成、地质背景、形成机制的某些独特性——初谈非常规超大型矿床[J]. 中国科学: D辑, 1998, 28(增1): 1-6.
Tu Guangchi. The unique nature in ore deposition, geological background and metallogenic mechanism of non-conventional superlarge ore deposits: A preliminary discussion[J]. Science in China: Series D, 1998, 28(Suppl 1): 1-6.
- [35] 柳志清. 超大型矿床密集区的成因及预测[J]. 地球科学进展, 1989, 6: 21-36.
Liu Zhiqing. The causes and prediction of superlarge deposit concentrated region[J]. Advance in Earth Sciences, 1989, 6: 21-36.
- [36] 肖志峰, 欧阳自远, 林文祝. 地球原始不均一性对超大型矿床分布的制约[J]. 地质地球化学, 1995, 5: 75-80.
Xiao Zhifeng, Ouyang Ziyuan, Lin Wenzhu. The restriction of earth original non-homogeneity to the distribution of super ore deposit[J]. Geological Geochemistry, 1995, 5: 75-80.
- [37] 岳宗玉, 刘建忠, 吴淦国, 等. 地球的原始不均一性起源及其对超大型矿床分布的制约[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005, 24(4): 357-362.
Yue Zongyu, Liu Jianzhong, Wu Ganguo, et al. Initial heterogeneity of the earth and origin of super-large scale ore deposit[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2005, 24(4): 357-362.
- [38] 易建斌. 全球锑成矿学基本特征及超大型锑矿床成矿背景初探[J]. 大地构造与成矿学, 1994, 18(9): 191-198.
Yi Jianbin. Characteristics of global antimony metallogeny and preliminary study on geological background of the superlarge antimony mineralization[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1994, 18(9): 191-198.
- [39] 黄瑞华. 中国莫霍面形态与岩金矿分布关系[J]. 大地构造与成矿学, 1994, 18(3): 191-198.
Huang Ruihua. Moho shape and distribution of rock gold deposit[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1994, 18(3): 191-198.
- [40] 冉崇英, 张智筠, 刘卫华, 等. 康滇裂谷旋回与铜矿层楼结构及其地球化学演化[J]. 中国科学: B辑, 1994, 24(3): 325-330.
Ran Chongying, Zhang Zhijun, Liu Weihua, et al. Kangdian rift cycle copper ore layers structure and its evolution[J]. Science in China: Series B, 1994, 24(3): 325-330.
- [41] Haynes D W, Ciooss K C, Bills R T, et al. Olympic dam ore genesis: A fluid-mixing model[J]. Economic Geology, 1995, 90(2): 281-307.
- [42] 温志坚, 毛景文. 超临界流体的研究进展及其对成矿地球化学研究的启示[J]. 地质论评, 2002, 48(1): 106-112.
Wen Zhijian, Mao Jingwen. Progress in supercritical fluid technology and its implication for metallogenesis[J]. Geological Review, 2002, 48(1): 106-112.
- [43] 王传远, 杜建国, 刘巍, 等. 超临界流体的地质意义[J]. 西北地质, 2005, 38(2): 49-53.
Wang Chuanyuan, Du Jianguo, Liu Wei, et al. Geological applications of supercritical fluids[J]. Northwestern Geology, 2005, 38(2): 49-53.

(责任编辑 王媛媛)